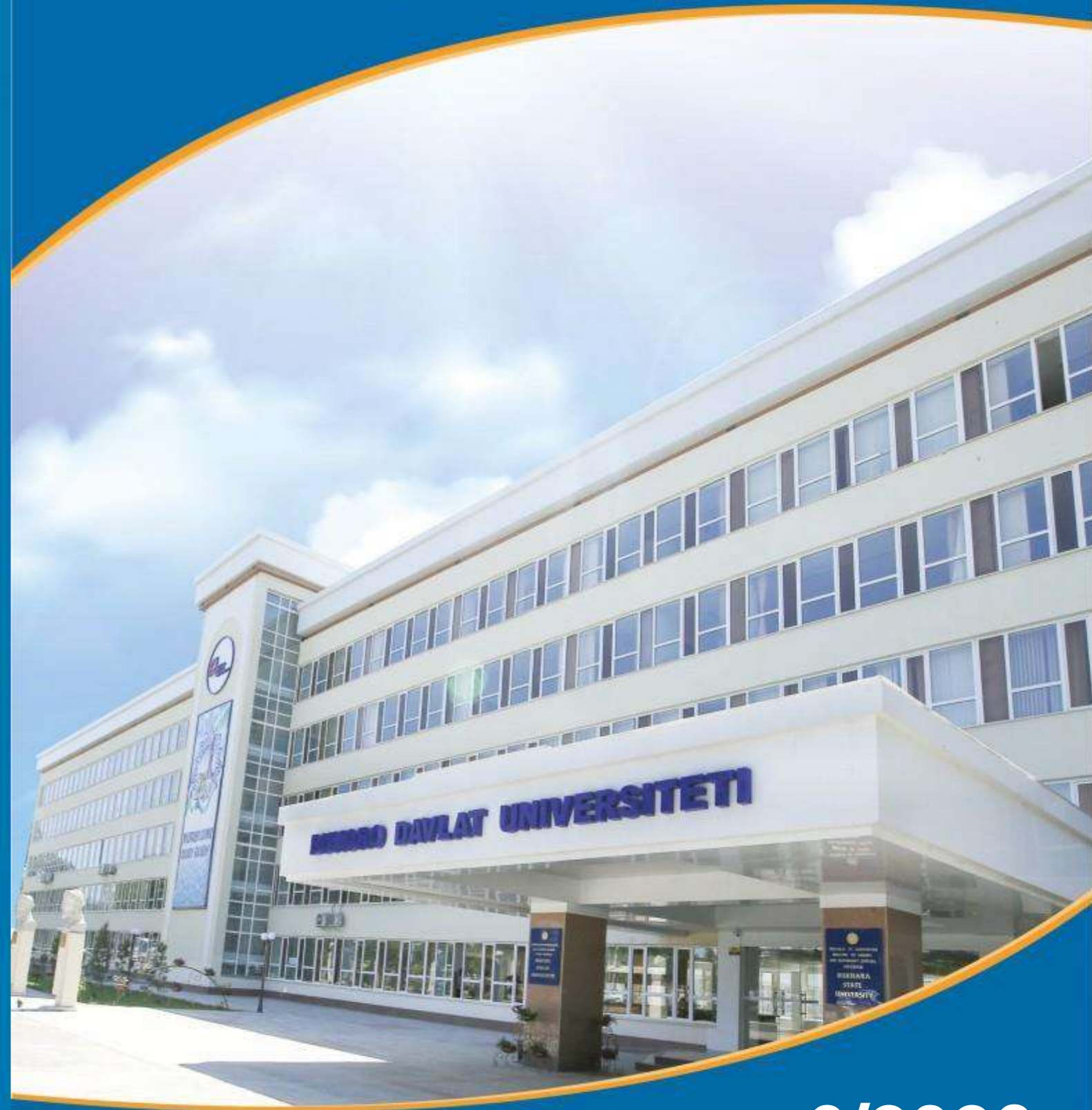




BUXORO DAVLAT UNIVERSITETI ILMIY AXBOROTI



Научный вестник Бухарского государственного университета
Scientific reports of Bukhara State University

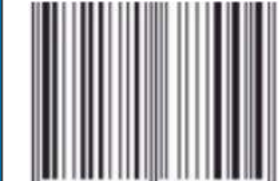
6/2026

E-ISSN 2181-1466



9 772181 146004

ISSN 2181-6875



9 772181 687004



@buxdu_uz



@buxdu1



@buxdu1



www.buxdu.uz

6/2026

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

Ilmiy-nazariy jurnal
2026, № 6, iyun

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 guvoohnoma 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 Shoira 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**

Муллагалиева Ф.Г., Румянцева Е.В.	Специализированные кремниевые детекторы для научных исследований ядерного излучения	4
Shodiev Z.M., Akhtamov J.Sh., Boboqandova N.K., Sulaymanov O.A., Sayfiyev U.N.	Investigation of the magnetic and electronic properties of the ercu intermetallic compound using the dft+u method	14
Muzafarova S.A., Axmedova N.A.	Gaz tashish usulida o'stirilgan $ZN_xCd_{1-x}S$ qattiq qorishmali yupqa qatlamining morfologik tahlili	19
Fayziyeva M.A., Sharipov M.Z., Nazarov E.S.	$SM_3Ga_5O_{12}$ kristali optik yutilish spektri va uning xususiyatlari	23
Akramov M.E., Xashimova F.S.	Grafiklardagi diskret nolokal chiziqli bo'lmagan shredinger tenglamasi: diskret tarmoqlarda pt-simmetrik solitonlarning dinamikasi	28
Dadamirzayev M.G'., Qosimova M.O., G'aniyeva A.K.	Turli temperaturalarda tunnellanish koeffitsiyentining tashqi elektr maydon ta'sirida o'zgarishi	39
Urazkulova D.M., Turgunboev A.Y., Long Y., Kuvondikov V.O.	PDMS elastomer asosidagi cho'ziluvchan organik fotovoltaik elementlarning morfologik va fotovoltaik xususiyatlari	44
Gulomov G., Majidova G.N., Madumarova S.Q.	Inas geterostrukturali diodlarning tashqi ta'sirlar natijasida parametrlarini o'zgarishi	53
Matkarimova Sh.U., Vapayev M.E., Davletov I.Y.	Nanosekund impulsli lazer yordamida n-tip kremniy namunalarning libs spektral va plazma xususiyatlarini tadqiq etish	57
Nurolliyev N.Sh., O'taganova A.U., Jontemirova X.S., Muminova S.K.	Fizik qonunlarning simmetriyasi va fundamental saqlanish qonunlari	65
Pardayeva Z.U.	Aniq integralning fizikaga tatbiqi	69
Rustamova R.A.	Harorat, namlik va havo oqimini nazorat qilish sensorlari	74
Salaxitdinova M.K., Aliqulova M.E.	^{60}CO gamma quant va 5 mev elektronlar ta'siridan keyin strontiy geksaferrit keramikalarining magnetlanishi	79
Akhmedzhanov F.R., Toshpulatov I.Sh., Tursunov I.B.	Anisotropy of effective elastic constants in si crystals	84

Турсунов С. У., Астанов С. Х., Касимова Г., Мухаммадова А.Б.	Применение методов спектроскопии для сохранения цветности абрикосового сока	89
Имамназаров Д.Х., Журакулова Х.Х.	Электронные и магнитные свойства интерметаллического соединения dufe_2 , исследованные методом dft+u	95
Музафарова С.М.	Квантовая запутанность: физические основы, математическое описание и современные интерпретации	101
Расулов Р.Я., Муминов И.А., Фармонов И., Мухаммадаминов С.Х.	К теории однофотонных оптических переходов в полупроводниках кубической и тетраэдрической симметрии. 2-часть	107
Нурмуродов Л.Т.	Плотности потоков радоне в почвах нуратинского и отрогах зарафшанского хребтов	114
Расулов В.Р., Маматова М.А., Фармонов И., Толипов Ж.	К теории однофотонных оптических переходов в полупроводниках кубической и тетраэдрической симметрии 1-часть	118
Рахимов Ш.А., Малышева М.Е.	Особенности спектров люминесценции и магнитной циркулярной поляризации люминесценции редкоземельного иона tb^{3+} в $\text{tb}_3\text{ga}_5\text{o}_{12}$	126
Расулов Р.Я., Муминов И.А., Толипов Ж.Р., Мухаммадаминов С.Х.	Межзонное двухфотонное поглощение поляризованного света в широко- и узкозонных полупроводниках	131
Кувандиков О.К., Хамраев Н.С., Ражабов Р.М., Хамраева Н., Очилов М.	Гальваномагнитные, электрические свойства и электронные зонные параметры двойных твердых растворов системы mo-pb	139
Хамраев Ю.Б., Каршиев К., Абдурахманов М.	Анализ температурного эффекта по данным мюонного телескопа	148
Onarkulov K.E., Zokirov A.I.	Anomalous photovoltaic effect in obliquely deposited cdse thin films under monochromatic and broadband illumination	154
Kulabdullayev G.A., Kim A.A., Abdullayeva G.A., Yuldashev J.O.	Tabiiy gadoliniy izotoplarining neytron qamrash jarayonida yutilgan energiyaga fraksion hissasini geant4 modeli asosida baholash	159
Mamarasulova Kh.D.	Effect of plastic deformation on carbon concentration in silicon crystals	168
Jamilov Y.Y., Muxammadiyeva M.S., Aslonova M.O.	Quyosh energiyasini o'lash va hisoblash usullari	173

Akbarov M.M., Uzoqova Sh.I., Egamberdiyeva M.X.	Bolalar ovqatlanishi uchun fermentlangan sut mahsulotlari mikrobiologiyasi	181
Shaxriddinov F.F., Normatov A.M.	Bug‘doy unining mineral tarkibini oshirishda biotexnologik usullardan foydalanish	189
Xudoyberdiyev Sh.Sh., Mirzayeva Sh.U.	Qizil lavlagi (beta vulgaris l.) va betalainlar: biokimyoviy xususiyatlari va inson salomatligiga ta’siri	195
Yusufova D.R., Umurkulova F.S.	Bolalar ovqatlanishida funksional oziq-ovqatlarning ahamiyati va fermentlarning inson mikrobiotasiga ta’siri	200
Шахриддинов Ф.Ф., Норматов А.М.	Методы снижения потерь минеральных веществ при получении муки с высокой пищевой ценностью из зерна пшеницы	204
KIMYO *** CHEMISTRY *** ХИМИЯ		
Yulchiyeva S.T., Smanova Z.A.	Removal of pb(ii), cd(ii), and hg(ii) ions from aqueous systems using silk fiber-based adsorbent	211
INFORMATIKA *** INFORMATICS *** ИНФОРМАТИКА		
Jo‘raqulov A., Jo‘raqulov U.J.	Microlocal analysis of the wave front set for distributions with compact support	215
Xusenov M.Z., Ro‘ziyeva S.A.	Virtual reallik (vr 360°) asosida universitetning raqamli modelini yaratish metodikasi va baholash natijalari	220
Мардонов Ш.З., Фаттоева Н.А.	Push-уведомления как триггеры возобновления прерванных мобильных квизов в lms: обзор и практические рекомендации	225
Sobirov Sh.S., Turdimatov M.M.	Kripto-aktivlar bilan bog‘liq jinoyatlarni aniqlashda blokcheyn kriminalistikasining o‘rni	230
Xasanov A.A., Xamrayev X.K., Abdujalilov J.A.	Ketma-ket chiziqli va noliyniy filtrlashga asoslangan gibrud o‘lchamlarni qisqartirish modelining statistik tahlili	237
Xasanov A.A.	Qalqonsimon bez hujayralari regulyator mexanizmlarini matematik va kompyuter modellashtirish	240
TEXNIKA *** TECHNIQUE *** ТЕХНИКА		
Odilova M.G‘.	O‘zbekistonda metrologiya sohasining xalqaro tashkilotlar bilan integratsiyasi: hozirgi holat va istiqbollar	245
EKOLOGIYA *** ECOLOGY *** ЭКОЛОГИЯ		
Alimova V.B.	Ekologik muammolar va spekulyativ badiiyat: cli-fi janrining estetik va axloqiy o‘lchamlari	250

**СПЕЦИАЛИЗИРОВАННЫЕ КРЕМНИЕВЫЕ ДЕТЕКТОРЫ ДЛЯ НАУЧНЫХ
ИССЛЕДОВАНИЙ ЯДЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ**

Муллагалиева Фануза Галлиевна,
Физико-технический институт имени С.А. Азимова Академии наук республики
Узбекистан, старший научный сотрудник, г. Ташкент, Узбекистан
mullagalievamfg@gmail.com

Румянцева Екатерина Владимировна,
Физико-технический институт имени С.А. Азимова Академии наук республики
Узбекистан, г. Ташкент, Узбекистан
katerina-1989@bk.ru

Аннотация. Одной из приоритетных задач ядерной спектрометрии является разработка узкоспециализированной аппаратуры для фундаментальных исследований и диагностических систем. Подобные приборы, разрабатываются под конкретные условия научных исследований и уникальных установок — ускорителей, токамаков и времяпролетных спектрометров.

Особое место в этом ряду занимают полупроводниковые кремниевые детекторы, обладающие высокой разрешающей способностью и компактностью. Создание таких систем требует учета радиационной стойкости материалов, так как детекторы в ускорителях и термоядерных реакторах подвергаются интенсивному воздействию жесткого излучения и нейтронных потоков. Оптимизация топологии p-n переходов и использование планарных технологий позволяют минимизировать токи утечки и значительно снизить порог регистрации частиц.

Ключевые слова: полупроводниковый детектор, объёмная активность, детектор тепловых нейтронов, обеднённая область объёмного заряда.

**IXTISOSLASHTIRILGAN KREMNIY DETEKTORLARI
YADRO NURLANISHI ILMIIY TADQIQOTLARI UCHUN**

Annotatsiya. Yadro spektrometriyasining ustuvor vazifalaridan biri fundamental tadqiqotlar va diagnostika tizimlari uchun tor ixtisoslashgan apparaturalarni ishlab chiqishdir. Bunday asboblar ilmiy tadqiqotlar va noyob qurilmalar - tezlatkichlar, tokamaklar va vaqt oralig'idagi spektrometrlarning aniq sharoitlariga mos ravishda ishlab chiqilmoqda.

Bu qatorda yuqori ajrata olish qobiliyatiga va ixchamlikka ega bo'lgan yarimo'tkazgichli kremniyli detektorlar alohida o'rin tutadi. Bunday tizimlarni yaratish materiallarning radiatsiyaga chidamliligini hisobga olishni talab qiladi, chunki tezlatgichlar va termoyadro reaktorlaridagi detektorlar qattiq nurlanish va neytron oqimlarining kuchli ta'siriga uchraydi. P-n o'tishlar topologiyasini optimallashtirish va planar texnologiyalardan foydalanish sizib chiqish toklarini minimallashtirish hamda zarrachalarni qayd etish chegarasini sezilarli darajada kamaytirish imkonini beradi.

Kalit so'zlar: yarimo'tkazgichli detektor, hajmiy aktivlik, issiqlik neytronlari detektori, hajmiy zaryadning kambag'allashgan sohasi.

**SPECIALIZED SILICON DETECTORS
FOR SCIENTIFIC RESEARCH ON NUCLEAR RADIATION**

Abstract. One of the priority tasks of nuclear spectrometry is the development of highly specialized equipment for fundamental research and diagnostic systems. Such instruments are developed for specific conditions of scientific research and unique installations such as accelerators, tokamaks, and time-lapse spectrometers.

Semiconductor silicon detectors, which possess high resolution and compactness, occupy a special place in this series. Creating such systems requires considering the radiation resistance of materials, as detectors in accelerators and thermonuclear reactors are subjected to intensive exposure to harsh radiation and neutron flows. Optimizing the topology of p-n transitions and utilizing planar technologies allows for minimizing leakage currents and significantly reducing the particle registration threshold.

Keywords: semiconductor detector, volumetric activity, thermal neutron detector, depleted region of volumetric charge.

Введение. Спектрометрия ядерного излучения с помощью полупроводниковых детекторов (ППД) зародилась в начале 60-х годов. Начиная с 1965 года ППД начали разрабатываться в Узбекистане – в ОКБ ПО «ФОТОН», с 1969 г. – в ФТИ, ИЯФ АН, ОКБ ФТИ, с 80-х годов – в НПО «Академасоб». Сфера применения ППД разнообразна: от решения классических задач ядерной спектрометрии до управляемого термоядерного синтеза и исследования радиационных поясов Земли, рентгеносканов на пунктах пропуска и т.д.

Кроме того, полупроводниковые детекторы (ППД) играют ключевую роль в развитии портативных систем радиационного мониторинга, необходимых для оперативного контроля экологической обстановки в труднодоступных и высокогорных районах. В энергетике их применение расширяется до систем диагностики состояния активных зон реакторов и оптимизации работы мобильных энергетических установок, где важны малые габариты и высокая чувствительность.

В биомедицине на базе специализированных кремниевых структур создаются прецизионные дозиметрические системы для лучевой терапии, позволяющие с высокой точностью контролировать поглощенную дозу в реальном времени. В аэрокосмической отрасли ППД незаменимы для изучения воздействия космического излучения на бортовую электронику спутников. Таким образом, эволюция этих приборов не только расширяет границы фундаментальной науки, но и напрямую способствует повышению безопасности и технологической независимости в стратегически важных отраслях промышленности.

Методика исследования. Наиболее простыми в изготовлении являются поверхностно-барьерные ППД. Из них наиболее распространены Si-Au ППД. Толщина чувствительной области – слоя p-n перехода в поверхностно-барьерных ППД не превышает обычно 0,2-0,5 мм [1]. И вычисляется по формуле:

$$W = 3,2 \cdot 10^{-5} (pU)^{\frac{1}{2}} \text{ см} \quad (1.1)$$

для p-Si и

$$W = 5,3 \cdot 10^{-5} (pU)^{\frac{1}{2}} \text{ см} \quad (1.2)$$

для n –Si. Здесь ρ – удельное сопротивление ПП, U –напряжение обратного смещения. Из этих выражений видно, что величину W можно увеличить двумя способами:

- повышая напряжение смещения U,
- увеличивая удельное сопротивление материала, т.е. уменьшая число примесных атомов.

Если образец достаточно толстый, то увеличение U действительно приводит к росту толщины обедненного слоя, который может раздвинуться до металлических контактов ППД. Однако в этом случае электрическое поле начинает вытягивать электроны из металла и через ПП возникает ток инжекции, который значителен. Поэтому при создании ППД с большой толщиной чувствительной области используются неинжектирующие электроды и высокоомные полупроводники. ППД p-n – структуры используются, в основном, для спектрометрии заряженных частиц – осколков деления, α -частиц, протонов с энергией до 5 МэВ/а.е.м. и электронов до энергий 500 кэВ.

Одним из направлений, имеющих целью улучшение характеристик ППД и создания новых, являются гетеропереходы.

Гетеропереход – потенциальный барьер на границе контакта двух различных полупроводников с различной шириной запрещённой зоны, постоянная решёток которых одинакова, а кристаллическая структура идентична [2]. Наиболее используемыми материалами, отвечающие этим требованиям являются Ge и Si.

Поверхностно-барьерные и гетеропереходные детекторы используются для спектрометрии короткопробежных частиц, а с dE/dx (тонкие детекторы) детекторами в спектрометрах-телескопах.

Для спектрометрии заряженных частиц высоких энергий: электронов с $E_e \geq 0,5$ МэВ и тяжёлых частиц с $E \geq (3-5)\sqrt{M}$ МэВ, где M – масса частиц в а.е.м., применяются кремниевые ППД, выполненные по литий-дрейфовой технологии [3].

Изготовление dE/dx ППД отличается сложностью и требует большого внимания, так как они должны удовлетворять следующим требованиям:

- однородность толщины детектора должна быть очень высокой, чтобы разброс энергии частицы, проходящей через тонкий ППД, определялся только статистическими флуктуациями;
- тыльный контакт должен быть не инжектирующим во избежание избыточного шума;
- во избежание эффекта каналирования направление, в котором частицы проходят через ППД (обычно перпендикулярно к поверхности), не должно совпадать ни с одной кристаллической осью или плоскостью монокристалла;

- толщина нечувствительной области должна быть минимальной.

Основная трудность технологии “тонких” dE/dx детекторов состоит в получении плоскопараллельности чувствительной области. Она возрастает с уменьшением толщины ППД, когда даже небольшие уменьшения толщины могут привести к существенному разбросу в потерях энергии проходящих частиц.

Основные операции изготовления dE/dx ППД сводятся к следующим: изготовление плоскопараллельных пластин механическим способом, очистка поверхностей после механической обработки от загрязнений, химическое травление с сохранением плоскопараллельности пластин, формирование перехода, нанесение контактов и установка ППД в корпус. С помощью шлифовки шайбы получаются с минимальным разбросом толщины $\leq 1,0$ мкм.

Далее пластины травятся с обеих сторон на глубину до 150 мкм в смеси кислот HF , HNO_3 , COOH по методике [1], обеспечивающей высокую однородность толщины пластин. Суть её заключается в следующем: динамическое травление ПП пластин производится на специально разработанной установке (рисунок 1).

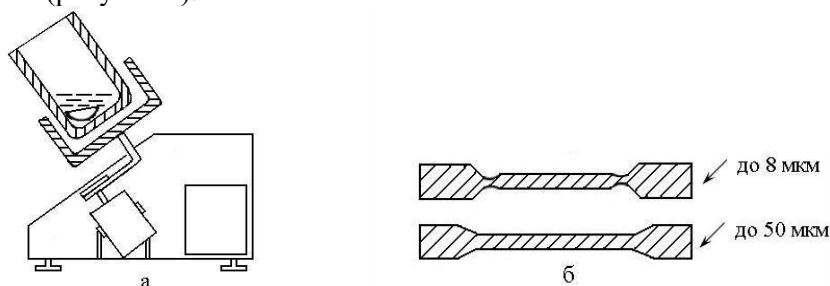


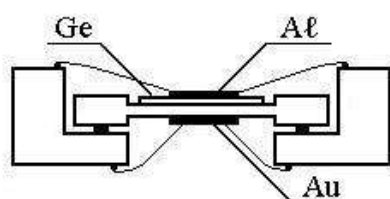
Рис.1. а – установка автоматического динамического травления тонких кристаллов; б – диаметрально сечение сверхтонких кристаллов после процесса динамического травления

Травление проводится в тефлоновом стакане диаметром 70-90 мм и высотой 100-120 мм, ось вращения которого установлена под углом 37° к вертикали, поштучно, причём ПП пластина крепится с помощью воска на тефлоновый шаровой сегмент диаметром 30-35 мм ($R_{\text{ш}}=100$ мм) и вращается вместе с ней. Скорость вращения 60-80 мин^{-1} .

При изготовлении ППД с $W \leq 20$ мкм, для повышения механической надёжности, метод травления пластин несколько отличался: после приклейки пластины на тефлоновый диск поверхность её покрывалась по периметру раствором полистирола в толуоле шириной 3 мм и сушилась. Травление производилось в два этапа: сначала с полистиролом, затем плёнка полистирола снималась с поверхности, и пластина травилась второй раз. Аналогично травилась вторая сторона пластины. В результате чего получалась гантельного типа в сечении, обеспечивающая необходимую механическую надёжность [4]

Следует отметить, что предложенная технология обработки кремниевых пластин обеспечивает плоскопараллельность в центральной части чувствительной области детекторов; во всех случаях с уменьшением толщины пластин ниже 20 мкм наблюдалось увеличение скорости травления с краев чувствительной области и при толщине центральной части менее 8 мкм, в ряде случаев наблюдалось сквозное протравливание пластин по краям чувствительной области. Процесс нарушения однородного травления нетрудно контролировать визуально, так как кремний при толщине 15 мкм и менее становится полупрозрачным и на просвет имеет коричневую, затем светло-коричневую и жёлтую окраску. Таким образом, в первом приближении, однородность толщины чувствительной области сверхтонких dE/dx детекторов можно контролировать по степени однородности её окраски (светопропускания) в ближнем ИК диапазоне.

Электрические контакты получали напылением золота и алюминия. Электрическая связь электрода ППД с проводами осуществлялась специальной проводящей пастой. Для dE/dx ППД с толщиной и диаметром чувствительной области 8 – 500 мкм и 8-28 мм соответственно и минимальной толщиной «мёртвого слоя» (нечувствительная часть ППД) входного и выходного окна



оптимальной является поверхностно – барьерная технология; для более толстых ППД применимы все разновидности технологий, однако в условиях повышенных требований к стабильности и сроку службы ППД предпочтительно использование гетеропереходов (рисунок 2).

Рис.2 Конструкция детектора с гетеропереходом.

Для спектрометрии β -частиц, γ -квантов, низких энергий и тяжёлых заряженных частиц высоких энергий, необходима большая толщина чувствительного слоя, чем у поверхностно-барьерных, гетеропереходных и диффузионных ППД. Её можно значительно расширить, если в p -полупроводник (Ge или Si) ввести донорную примесь Li методом диффузии с последующим дрейфом в электрическом поле. Детекторы полного поглощения энергии заряженных частиц (E-детекторы) выполняются по литий-дрейфовой технологии.

Высокоомный кремний и германий, в основном компенсированное и высокое сопротивление материала достигается именно за счёт компенсации, а не за счёт очистки остаточной примеси. Это объясняется сложностью устранения примесей, ответственных за уменьшение сопротивления. В частности, из кремния наиболее трудно удалить бор, являющийся акцептором. Для увеличения удельного сопротивления исходные материалы, содержащие акцепторные примеси, компенсируют специально вводимыми донорными примесями, и наоборот. Акцепторные примеси в кристаллах p – кремния и германия можно компенсировать путём введения лития, являющегося донором. Литий обладает высокой подвижностью и энергия ионизации его очень мала. Эти свойства позволяют сначала осуществить температурную диффузию, а затем дрейф ионов лития с помощью электрического поля далеко в глубь кристалла. Компенсированный слой называют i – слоем. Соответственно детекторы с таким слоем называют детекторами с p - i - n -структурой. Так как i – слой получают методом дрейфа лития, то такие детекторы называют кремний – литиевыми – Si (Li).

Путём исследования состава и структуры материала можно заранее прогнозировать энергетическое разрешение детекторов электронов и, таким образом, имеется возможность отбирать исходный материал для получения детекторов заряженных частиц с высоким энергетическим разрешением [5]

Технология литий-дрейфовых детекторов позволяет обеспечить процент выхода годных приборов в пределах 50-90%, что является очень высокой для такого прецизионного класса полупроводниковых приборов.

Полупроводниковые детекторы с протяжённой чувствительной областью, полученные по классической литий-дрейфовой технологии [1,4,6] имеют один существенный недостаток: тыльный контакт, представляющий собой диффузионную область, обогащённую литием, занимает, как правило, не менее 10% объёма кристалла и является нечувствительной к ионизирующему излучению, а толщина чувствительной области не превышает нескольких мм. Между тем, для решения ряда задач ядерной физики необходимы рабочие объёмы ППД с толщиной чувствительной области до сантиметра и более. В реальных условиях дрейф ионов лития в p -кремний с целью получения протяжённой компенсированной структуры становится экономически нецелесообразным уже при толщине 3-4 мм, так как время дрейфа, а следовательно, затраты растут с ростом толщины компенсированной области вначале квадратично, затем ещё быстрее. Кроме того, наблюдается эффект перекомпенсации литием областей, примыкающих к диффузионному слою, приводящий к неоднородности электрического поля со всеми вытекающими последствиями.

Поэтому проблема уменьшения толщины тыльного контакта является для Si (Li) актуальной и решение её позволило бы получать детекторные сборки (в частности, для телескопических систем, используемых в исследованиях ядерных взаимодействий) с общей толщиной чувствительной области до десятка миллиметров и более. Кремниевые детекторы, в которых толщиной входного и выходного окна по сравнению с толщиной чувствительной области можно пренебречь (т.е., если они не вносят существенных искажений в аппаратный спектр исследуемого излучения), называются детекторами с полностью обеднённой областью объёмного заряда (ДКПО). К ним могут относиться как детекторы с p - n , гетеро-, либо с поверхностно-барьерным переходом, так и Si (Li) ППД.

Спектрометрические характеристики ППД во многом определяются токами утечки и шумами, что в свою очередь, зависит, опять таки от свойств тыльного контакта, характеристики которого особенно существенны в Si(Li)- p - i - n детекторах, предназначенных для применения при низких температурах.

При использовании ППД в телескопических системах одним из важных требований является обеспечение минимальной толщины мёртвого слоя.

Для E – детекторов это достигается, в частности, оптимальным выбором режима дрейфа и диффузии [7], при котором размытие диффузного слоя минимально, с последующим дозированным

облучением [8]. При облучении Si (Li) p-i-n структур γ -излучением ^{60}Co дозой $2,9 \times 10^{13} \text{ см}^2$ концентрационный профиль лития становится круче, p-р переход смещается к поверхности, через которую проводилась диффузия лития, улучшаются радиометрические характеристики ППД [8,9].

Существенное уменьшение толщины выходного окна возможно при сочетании литий-дрейфовой и ионно-лазерной технологии [10]. Такая технология позволяет получать Si (Li) ППД с толщиной МС $d_{\text{MC}} < 1 \text{ мкм}$ с обеих сторон структуры при толщине чувствительной области с очень высокой степенью однородности $d_w \cong 2-3 \text{ мм}$. При длительности лазерного импульса не более 20 нс и энергиях менее $0,2 - 0,5 \text{ Дж/см}^2$ облучение не вызывает нарушений структуры детектора и, что очень важно, - перераспределения быстро диффундирующей при температурах св. 70°C примеси – лития, а 90% имплантированных ионов электрически активируются уже при плотностях энергии $> 0,05 \text{ Дж/см}^2$. К сожалению, для производства таких ППД необходимы уникальные технологические лазеры с однородным распределением энергии по сечению пучка и поэтому широкого развития приборы не получили.

Исследование заряженных частиц в условиях космического пространства имеет свои специфические трудности. Это неколлимированные пучки, широкий диапазон энергий и концентраций, фон, от которого необходимо отстроиться, фон электромагнитного излучения (УФ-излучение, рентгеновские и гамма лучи и др.) [11]. Поэтому на выбор того или иного прибора помимо спектрометрических требований существенно влияют специфические эксплуатационные условия, которые, зачастую, являются определяющими.

Детекторы для космических исследований. Благодаря многим свойствам ППД удобны для радиационных измерений в космическом пространстве. Они легки, компактны, достаточно прочные, имеют относительно низкое напряжение питания, их легко компоновать в телескопы, состоящих из двух или более элементов. Кроме того, они обладают лучшими характеристиками: имеют высокое энергетическое разрешение; малую толщину мёртвого слоя, что очень важно при регистрации низкоэнергетических частиц; можно в широких пределах варьировать толщину чувствительного слоя, получать очень тонкие пролётные dE/dx -детекторы.

При проведении исследований в космическом пространстве необходимо точно идентифицировать частицы с различной массой и зарядом, а также измерить их амплитудное распределение в зависимости от энергии и типа частиц.

Среди существующих методов идентификации частиц большое распространение получил метод, в котором одновременно измеряется энергия частицы E и её удельная ионизация dE/dx [12].

На этом методе основан принцип работы телескопов с полупроводниковыми детекторами (по крайней мере, с двумя). Первый пролётный dE/dx -детектор, имеет конечную толщину, поэтому реально измеряется не dE/dx , а некоторая величина ΔE -потери энергии в данном детекторе:

$$\Delta E = (dE/dx) \cdot x \quad (2.1)$$

Второй детектор измеряет энергию $E - \Delta E$. Расчёты потерь энергии на единицу пути, т.е. удельных ионизационных потерь энергии, были проведены Ливингстоном и Бете [13], которые получили следующую формулу:

$$\frac{dE}{dx} = \frac{4\pi e^4 Z^2}{mV^2} Nz \left[\ln \frac{2mV^2}{E_i} - \ln(1 - \beta^2) - \beta^2 \right], \quad (2.2)$$

где dE/dx -удельные потери энергии; e , m -заряд и масса электрона; Z , V -заряд и скорость частицы, z -атомный номер вещества поглотителя; β -отношение скорости частицы к скорости света; E_i -средняя энергия ионизации атомов поглотителя.

Пренебрегая двумя последними членами в уравнении (2.2) (т.к для нерелятивистских частиц $\beta \ll 1$) получим выражение:

$$\frac{dE}{dx} = K_1 (MZ^2/E) \ln(K_2 E/M) \quad (2.3)$$

где K_1 , K_2 – константы; M , Z , E - масса, заряд, и энергия частицы, соответственно.

Так как величина логарифмического члена в уравнении (2.3) слабо зависит от энергии частицы, можно записать:

$$\frac{dE}{dx} = \frac{K_3 MZ^2}{E} \quad (2.4)$$

$$\frac{dE}{dx} \cdot E = KMZ^3 = \Pi \quad (2.5)$$

Уравнение (2.5) лежит в основе работы радиоэлектронных устройств, осуществляющих идентификацию сигналов Е-детектора от частиц с разной массой или зарядом. Другой метод идентификации, связывающий пробег частиц с энергией был предложен Гольдингом [14].

Для регистрации высокоэнергетических частиц применяются телескопические системы с большим количеством (в зависимости от пробега регистрируемого излучения) ППД. Детекторная система в виде телескопа, состоящего из нескольких ППД – пролётного dE/dx, пробежного Е-детектора и антисовпадательного детектора, может регистрировать электроны на фоне частиц с высокими энергиями. Если энергия частицы больше регистрируемой, т.е. её пробег превышает толщину Е-детектора, срабатывает антисовпадательный, который блокирует всю систему спектрометра.

Это классическая и очень эффективная схема для идентификации частиц и измерения их характеристик. Такая конфигурация превращает набор детекторов в «умный» фильтр, который отсекает лишний фон и гарантирует, что мы измеряем энергию только тех частиц, которые полностью остановились в рабочем объеме. Для регистрации тяжелых заряженных частиц (протонов и α-частиц) с помощью полупроводниковых детекторов (ППД) крайне важно минимизировать толщину входного окна. Это связано с тем, что такие частицы характеризуются высокими удельными потерями энергии и могут полностью поглотиться еще до попадания в активную зону прибора. Для регистрации протонов высоких энергий, чтобы обеспечить полное поглощение пробега частицы, требуются детекторы с глубокой чувствительной областью. Для этого используют литий-дрейфовые детекторы либо телескопы с ППД. Для выделения импульсов от протонов более высоких энергий, пробег которых превышает ширину обеднённой области, используются телескопические системы с антисовпадательными ППД, либо метод дискриминации по форме импульса [12].

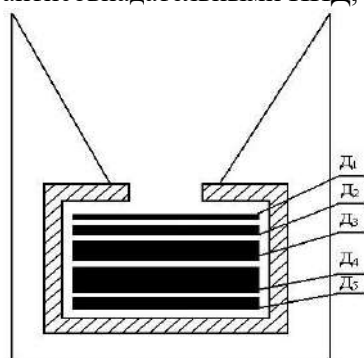
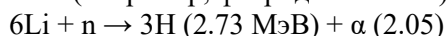


Рис.3. Строение телескопа.

Телескоп позволяет исследовать с высокой эффективностью азимутальные, угловые, массовые, зарядовые, импульсные и другие распределения частиц, входящих в состав космических лучей, в частности, спектрометрии электронов в диапазоне энергий $0,15 \div 3,5 \text{ МэВ}$, а также тяжёлых заряженных частиц в энергетическом диапазоне $0,050\sqrt{M} < E < 30\sqrt{M} \text{ МэВ}$, где М-масса частиц в а.е.м. На рисунке 3, показано строение телескопа в разрезе. Такое построение телескопа позволяет решать широкий класс задач по идентификации и исследованию спектрального состава заряженных частиц с различными E, z, m, и, в частности, исследовать энергетические спектры электронов в интервале энергии 0,015 до 3,5 мЭв [15].

Бикристалльные детекторы тепловых нейтронов. Широкое использование полупроводниковых детекторов нейтронов сдерживалось невысокой эффективностью регистрации, которая составляла для тепловых нейтронов (ТН) 12%. ППД ТН представляют собой, бикристалльные системы с одним Li-конвертором между двумя планарными Si ДМ. Литий используется в виде соединений (например, фторид лития LiF). [16].

Конструкция с «эндвич-структурой», где тонкий конвертор зажат между двумя кремниевыми полупроводниковыми детекторами (ППД), является одним из самых эффективных промышленных решений для регистрации тепловых нейтронов. Такая схема (часто называемая детектором с двойным кремниевым диодом) решает главную проблему полупроводников: кремний сам по себе практически «прозрачен» для тепловых нейтронов, конвертор необходим для запуска ядерной реакции, продукты которой уже могут быть зафиксированы детектором. В основе лежит ядерная реакция на изотопе лития-6: используется в виде соединений (например, фторид лития LiF).

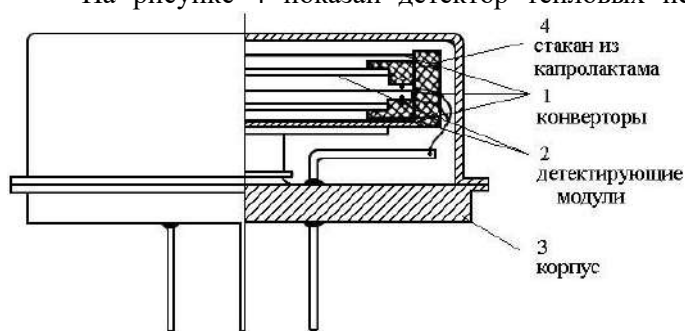


Нейтрон попадает в слой конвертора и поглощается ядром изотопа с высоким сечением захвата. В результате происходит ядерная реакция с испусканием заряженных частиц (альфа-частиц, ядер отдачи, протонов). Эти частицы покидают конвертор, попадают в кремниевые детекторы (ДМ) и создают в них электронно-дырочные пары, которые регистрируются как электрический сигнал. Тонкий слой лития ${}^6\text{LiF}$ наносится на подложку. Его толщина критична. Если сделать его слишком толстым, нейтронов поглотится много, но рожденные заряженные частицы просто «застрянут» внутри самого конвертора, не долетев до кремния, если слишком тонкий — падает эффективность

захвата нейтронов. Поэтому толщина литиевого конвертора обычно составляет от нескольких единиц до десятков микрометров

Кремниевые детекторы располагаются по обе стороны от конвертора. Это позволяет реализовать схему совпадений. Продукты реакции реакции (3H и α) разлетаются строго в противоположные стороны Два детектора позволяют «поймать» частицы, летящие как «вверх», так и «вниз», увеличивая геометрическую эффективность регистрации почти в два раза. Гамма-квант обычно вызывает сигнал только в одном из детекторов (или сигналы со случайной амплитудой). Нейтронное событие характеризуется строгой одновременностью (совпадением) двух импульсов с конкретными энергиями. Это позволяет отсечь фон с ювелирной точностью. Складывая сигналы с обоих ППД, можно восстановить полную энергию реакции 4.78 МэВ, что дает очень четкий пик на спектрограмме, который невозможно спутать с шумами. Однако кремний чувствителен к повреждениям от быстрых нейтронов, что ограничивает срок службы детектора вблизи активных зон реакторов. Эффективность для тепловых нейтронов составляет порядка 20–30%, что ниже, чем у газонаполненных счетчиков, но бикристалльные ППД выигрывают за счет компактности и отсутствия высокого напряжения (нужного для газовых трубок). Кремниевые пластины одновременно служат герметичным корпусом для слоя конвертора.

На рисунке 4 показан детектор тепловых нейтронов ДТН состоящая из двух полностью



обеднённых ППД с толщиной чувствительной области 200÷250 мкм и трёх конверторов плотностью 0,54 г/см³ и толщиной 120 мкм, состоящих из 92%Li⁶ и 8% Li⁷. Данная структура может повышать эффективности регистрации тепловых нейтронов в 2,5÷2,7. Детекторные модули помещались в специальный стакан из капролактама. Сборка ДТН производилась в камере, наполненной ³He при давлении 1-3 атм [16].

Рис.4. Строение ДТН

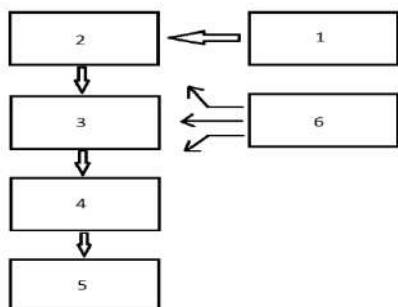
Результаты и обсуждение. Применение полупроводниковых спектрометров для исследований окружающей среды. Согласно международным исследованиям [16], суммарная доза облучения, которую получает среднестатистический человек за 70 лет жизни, варьируется в пределах 0,2–1,5 Зв. При этом, по оценкам МКРЗ, основным фактором радиационного воздействия является вдыхание продуктов распада радона ²¹⁸Po и ²¹⁴Po — на их долю приходится до 75% всей накопленной дозы [18].

Опасность радонового загрязнения часто остается в тени, хотя его влияние на здоровье может быть по-настоящему разрушительным. В закрытых помещениях совокупный вред от радона и продуктов его распада (ДПР) нередко в десять раз превышает ущерб от обычного загрязнения городского воздуха. Его способность использовать бытовую пыль как «транспорт» для проникновения в ткани делает радон одной из самых масштабных и скрытых угроз для долголетия и общественного здоровья в целом. Радиоактивное излучение вызывает повреждения в структуре клеток, что становится мощным катализатором для развития раковых опухолей. Большие значения объёмной активности радона в воздухе присущи, в основном, на территориях с повышенным содержанием в почве и грунтах радионуклидов урано-ториевого ряда [19] – это районы урановых и других рудников по добыче минерального сырья, места отвалов, хвостохранилищ, поймы горных рек, стекающих с гор, протекающих по таким территориям, в ряде случаев районы добычи минерального топлива.

В работе [20] описан разработанный радиометр метра для экспрессного измерения альфа-излучения радиоактивных элементов на базе полупроводниковых поверхностно-барьерных и гетерепереходных Al- α Ge-pSi-Au детекторов. детекторов с большой чувствительной областью и рабочим объемом из кремния диаметром больше 50 мм и толщиной 0.3-0,5мм, в мировой практике используется очень редко. Использование таких детекторов большого диаметра позволяет изготовить радиометр, измеряющий заряженные частицы измерять непосредственно в измеряемой ячейке. Данный метод позволяет избегать осаждения активного вещества различными методами на измерительные фильтры. Структурная схема радиометра приведена на рисунке 5.

В его состав входят следующие функциональные элементы:

- рабочая камера с детектором -2.
- узел усиления и селекции информации (аналоговый узел)-3
- микроконтроллерный узел (цифровой узел)-4



- узел вторичного электропитания -6
- узел воздухозаборника-1
- персональный компьютер с установленным программным обеспечением -5.

Рис.5. Блок схема радиометра.

Радиометром радона, изготовленного на основе этих детекторов приведен мониторинг концентрации радона в подпочвенном слое и на воздухе. Результаты показали, что значения концентрации варьируются в зависимости от температуры, влажности и времени суток. Прибор может

использоваться как в полевых условиях, так и стационарно, работает как в комплекте с ПК с операционной системой Windows 7, 8, так и автономно.

В работе [21] приводится описание разработанного многоканального радиометрического устройства на основе кремниевых детекторов для измерения активностей альфа, бета и гамма-излучений для различных, в том числе экологических исследований. Представлена структура устройства. Приводятся результаты мониторинга объемной активности альфа-частиц радона и активностей бета и гамма излучений в почвенном воздухе, которые показали зависимости активностей излучений от температуры и влажности. Радиометрическое устройство состояло из трех радиометров, которые могли проводить одновременные одно временные измерения альфа, бета и гамма-излучений в исследуемых пробах или в среде от естественных источников. В каждом из радиометров использовался определенный тип детектора. В радиометре для измерения гамма и бета излучения использовались литий-дрейфовые детекторы, для измерения альфа-частиц и объемной активности радона гетеропереходные или поверхностно-барьерные детекторы. Была разработана структура устройства (рисунок 6) [25]:

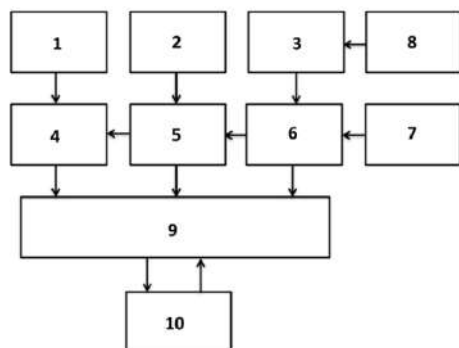


Рис.6. Блок схема многоканального радиометрического устройства: 1,2,3 – рабочие камеры с альфа, бета и гамма детекторами, 4,5,6 – узлы усиления и селекции информации, 9 – микроконтроллер, 7 – узел вторичного электропитания, 8 – воздухозаборник, 10 ПК – персональный компьютер с установленной программой, обеспечивающий одновременные измерения альфа, гамма и бета излучений в онлайн режиме.

Принцип работы для измерения объемной активностей радона в различных средах основан на закачке исследуемого воздуха в измерительные рабочие камеры. Рабочие камеры представляют собой пустотелые цилиндры, внутри которых в геометрическом центре, на подвесках укреплены детекторы, которые могут проводить измерения с двух сторон. На корпусе цилиндра также укреплены разъемы для подключения детекторов к элементам питания и усиления. Питание детектора обеспечивается напряжением 24–30 В через RC-цепи от вторичного преобразователя напряжения, расположенного в устройстве совместно с



с зарядочувствительными предусилителями. Для измерения активностей альфа, бета и гамма-излучений рабочие камеры с детекторами устанавливаются непосредственно на исследуемый объект. На рисунке 7 представлен общий вид радиометрического устройства.

Рис. 7. Общий вид радиометрического устройства.

Были проведены исследования (рисунок 8) по определению активности бета и гамма-излучений, и объёмной активности радона в почвенном воздухе на одной из областей республики. Получены зависимости объёмной активности радона и активности гамма и бета излучений от влажности и температуры [25].

Исследования показали зависимость объёмной активности радона от влажности. Известно альфа-частицы при распаде радона поднимаются с парами воды, увеличивая концентрацию частиц. Активности бета и гамма – излучений не показали зависимость от влажности. Наблюдаемое резкое увеличение активности бета излучения может быть связано с деформационными процессами земной коры данной территории, которая находится, по-видимому, в зоне разлома. Территория Республики относится к сейсмоактивной зоне и характеризуется многочисленными трещинами, разломами и сдвигами земной коры.

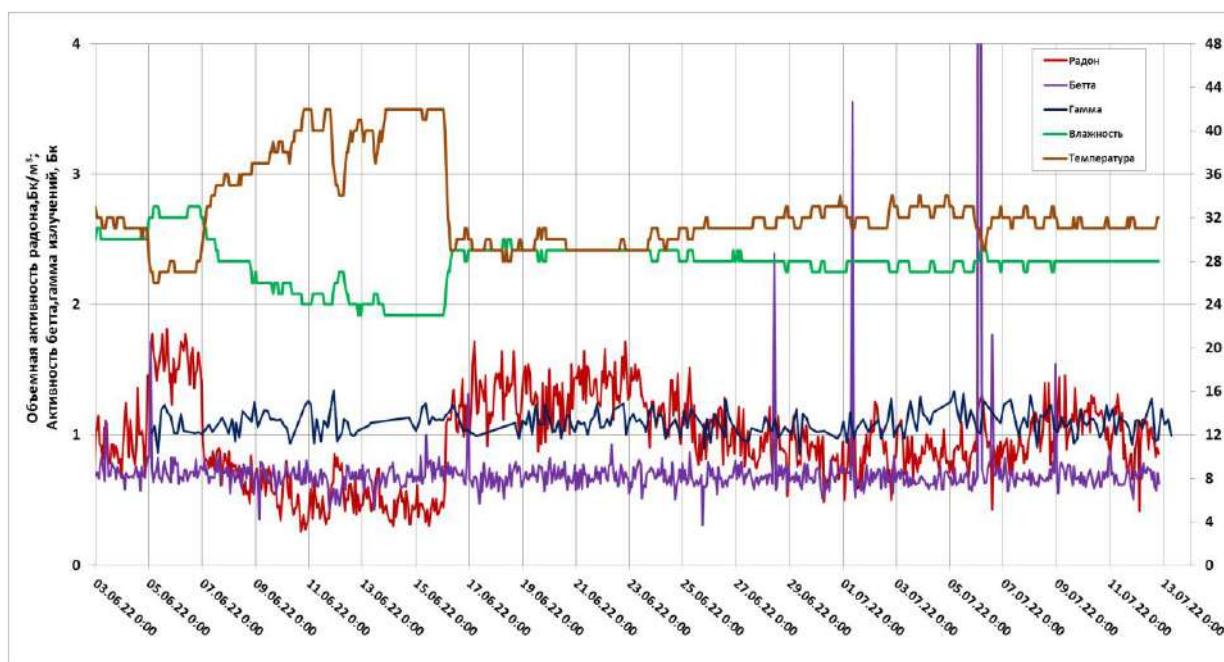


Рис. 8. Изменение объёмной активности альфа-частиц радона и активностей бета и гамма излучений за период 03.06.22.г. - 14.07.22.г.

Выводы. 1. Реализованы технология изготовления специализированных кремниевых dE/dx и E детекторов ионизирующего излучения, на основе, которой созданы и нашли применение для решения задач ядерной физики и прикладной ядерной спектromетрии прецизионные токовые детекторы ультрамягкого рентгеновского излучения, телескопические системы для спектromетрии заряженных частиц, бикристалльные детекторы тепловых нейтронов, спектromетры α - и β - излучения.

- бикристалльных детекторов, включающие 2 детектора-модуля с полностью обедненной областью объёмного заряда и 3 ${}^6\text{Li}$ (92%) конвертора обеспечивают эффективность регистрации тепловых нейтронов не менее 31%;

- кремниевых телескопов -спектromетров заряженных частиц, включающие 4 dE/dx и E детекторы-модули с полностью обедненной областью объёмного заряда и оконечные ППД позволяют исследовать длительное время в условиях Космоса спектры заряженных частиц в интервале энергий $0,05\sqrt{M} < E < 30\sqrt{M}$ МэВ, где M-масса частиц в а.е.м;

- кремниевые одно- и многомодульные детекторы являются оптимальными для измерения концентрации α - и β - активных радионуклидов в воздухе, почвах и воде.

2. Проведен анализ оптимизации входного окна и тыльного контакта, конструкции E-детекторов с полностью обеднённой областью объёмного заряда, процесс динамического травления в технологии получения сверхтонких пролётных dE/dx детекторов с высокой степенью плоскопараллельности границ чувствительной области и минимальной толщиной мёртвого слоя входного и выходного окна.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Дирнли Дж, Нортрон Д, Полупроводниковые счётчики ядерных излучений. //Изд. «Мир» Москва. 1966 г. с. 15-22, 161-193.
2. Измерительная линейка аналоговых модулей 1-ой очереди комплекса автоматизации экспериментов токамака ТСП, Отчёт по НИР №ГР 01880014315, Ташкент, ЦПКТБ ИП АН РУз, 1989г., с 233.
3. Азимов С.А., Муминов Р.А., Шамирзаев С.Х, Яфасов А.Я. Кремний-литиевые детекторы ядерного излучения. Ташкент. //Изд-во «Фан» 1981г., с.256.
4. Азимов С.А., Муллағалиева Ф.Г., Яфасов А.Я. Полупроводниковые телескопы для космических исследований. //Тезисы XXXV Сопещания по ядерной спектроскопии и структуре атомного ядра., Л., Наука, 1985г., с. 376.
5. Яфасов А.Я., Прецизионные детектирующие системы на основе неоднородных полупроводников (Si, GaAs, CdTe), Докторская диссертация, Ленинград, Радиовый институт, 1990г., с.368.
6. Яфасов А.Я. и др., Si (Li)-p-i-n детекторы площадью 60 см². //Атомная энергия, Москва 1986г., №2, с. 62-66.
7. Байзаков Б.Б. Лейдерман Р.Ю. Койфман А.И., Яфасов А.Я. "Влияние режима диффузии лития на величину «выходного окна» Si (Li)- детекторов». // Известия АН УзССР сер. физ.мат.наук, 1981г., №2, с. 41
8. Koifman A.I., Moominov R.A., Yafasov A.Y. Investigation of the Effect of Large Doses on the Si (Li) Detector Parameters Phys. //St. Sol.(a) 71, 1982, 59-64.
9. Азимов С.А. Койфман А.И., Муминов Р.А., Яфасов А.Я. Воздействие γ -излучения ⁶⁰Со на параметры Si(Li) p-i-n детекторов. //Доклады АН УзССР, 1982, №11.
10. Прорвич В.А., Кириллов-Угрюмов М.В., Муминов Р.А., Хасанов Д.К., Яфасов А.Я. Ионно-лазерный метод изготовления позиционно-чувствительных детекторов. // ПТЭ, 1981, №4, с. 61-63.
11. Минеев Ю.В., Смирнов Л.А., Спирькова Е.С. Спектрометрия заряженных частиц на спутнике "Интеркосмос-19 с помощью систем ППД. // III Междунар. семинар соц-х стран. Научное космическое приборостроение, Тез. докл. 1982г., Одесса, с. 109-110.
12. Курашов А.А. Идентификация ионизирующих излучений средних и низких энергий. // Атомиздат. М.1973г.
13. Livingston, M. S., & Bethe, H. A. (1937). Nuclear Physics C. Nuclear Dynamics, Experimental. // Reviews of Modern Physics, 9(3), p.245–390.
14. Goulding F.S. et al. Nucl. Instrum. and Meth., 31, №1, 1(1964).
15. Минеев Ю.В., Спирькова Е.С. Спектрометр электронов и протонов для измерений в магнитосфере Земли на спутниках. //т. Вестник МГУ серия физика-астрономия, 1981, №1, с.91-95.
16. Азимов С.А., Муллағалиева Ф.Г., Шейна Н.М., Яфасов А.Я. Высокоэффективный полупроводниковый детектор тепловых нейтронов. // Приборы и техника эксперимента, М., Изд-во "Наука", 1985г., N 4, с.46-48.
17. Рекомендации международной комиссии по радиологической защите 1990 года. // Публ.60, МКРЗ, М., Энергоатомиздат, 1994 г., 207 стр.
18. Жуковский М.В., Ярмошенко И.В. Радон: измерение, дозы, оценка риска. //Изд-во УрО РАН, Екатеринбург, 1997 г., с.240.
19. А.Я. Яфасов, В.А. Акимов, Зарединов Д.А., Ф.Г. Муллағалиева, А.А. Яфасов. Проблемы радоноопасности жилья в бассейнах горных рек Центральной Азии на примере Ташкентского региона. //АНРИ, Москва, 2000, №4, с. 32-42.
20. Муминов Р.А., Раджапов С.А., Муллағалиева Ф.Г., Раджапов Б.С.,Зуфаров М.А. Нурбоев К.М. Разработка высокоэффективных кремниевых детекторов и электронных блоков для радиометра альфа-излучения. // Приборы и техника эксперимента, 2021, № 3, с. 106–111.DOI: 10.1134/S0020441221030222.
21. Нурбоев К.М., Муллағалиева Ф.Г., Отабоев С.К., Марипов И.И. Разработка многоканального радиометра на основе кремниевых детекторов больших размеров для экологических исследований // Горный вестник Узбекистана №4 (95), 2023, 71-74. DOI:10.54073/GV.2024.4.95.018.

INVESTIGATION OF THE MAGNETIC AND ELECTRONIC PROPERTIES OF THE ErCu INTERMETALLIC COMPOUND USING THE DFT+U METHOD

Shodiev Zokir Mirtozayevich,

Associate Professor, Samarkand State University
named after Sharof Rashidov

Akhtamov Jushkin Shodmon ugli

Researcher, Samarkand State University
named after Sharof Rashidov

Boboqandova Nargiza Komil kizi

Master's Student, Samarkand State University
named after Sharof Rashidov

Sulaymanov Obid Ablakulovich

Researcher, Samarkand State University
named after Sharof Rashidov

Sayfiyev Ulugbek Normurod ugli

Laboratory Assistant, Samarkand State University
named after Sharof Rashidov

ulugbeksayfiyev300199@gmail.com

Abstract. In this work, the electronic and magnetic properties of the ErCu intermetallic compound were investigated using first-principles calculations within the framework of density functional theory (DFT+U) implemented in the Quantum ESPRESSO package. The calculations were performed using the GGA-PBE exchange–correlation functional. The results show that the ErCu compound crystallizes in the B2-type (Pm-3m) structure, and the lattice parameter is in good agreement with experimental data. Analysis of the density of states and band structure confirms the metallic nature of the compound. Spin-polarized calculations reveal a large positive magnetic moment on the Er atom ($\approx 2.25 \mu\text{B}$) and a small negative magnetic moment on the Cu atom ($\approx -0.019 \mu\text{B}$). The total magnetic moment of $2.22 \mu\text{B}$ per cell and the partial compensation between sublattices indicate the ferrimagnetic nature of the system.

Keywords: DFT+U, Quantum ESPRESSO, ferromagnetism, magnetic moment.

ErCu INTERMETALLIK BIRIKMASINING MAGNIT VA ELEKTRON XOSSALARINI DFT+U USULI YORDAMIDA O'RGANISH

Annotatsiya. Ushbu ishda ErCu intermetallik birikmasining elektron va magnit xossalari birinchi tamoyillar asosida zichlik funksionali nazariyasi (DFT+U) doirasida Quantum ESPRESSO dasturi yordamida o'rganildi. Hisoblashlar GGA-PBE almashinish-korrelyatsiya funksionali asosida bajarildi. Natijalar ErCu birikmasining B2-tip (Pm-3m) kristall tuzilishga ega ekanligini va panjara parametri eksperimental ma'lumotlar bilan yaxshi mos kelishini ko'rsatdi. Holatlar zichligi va zona tuzilishi tahlili birikmaning metall o'tkazuvchanlikka ega ekanligini tasdiqladi. Spin-polarizatsiyalangan hisoblashlar natijasida Yer atomida katta musbat magnit moment ($\approx 2.25 \mu\text{B}$), Cu atomida esa kichik manfiy magnit moment ($\approx -0.019 \mu\text{B}$) hosil bo'lishi aniqlandi. Umumiy magnit momentning $2.22 \mu\text{B}$ /panjaraga tengligi va pastki panjaralar o'rtasidagi qisman kompensatsiya tizimning ferrimagnitik xususiyatga ega ekanligini ko'rsatdi.

Kalit so'zlar: DFT+U, Quantum ESPRESSO, ferromagnit, magnit moment.

ИССЛЕДОВАНИЕ МАГНИТНЫХ И ЭЛЕКТРОННЫХ СВОЙСТВ ИНТЕРМЕТАЛЛИЧЕСКОГО СОЕДИНЕНИЯ ErCu МЕТОДОМ DFT+U

Аннотация. В данной работе электронные и магнитные свойства интерметаллического соединения ErCu исследованы с использованием методов первых принципов в рамках теории функционала плотности (DFT+U) с применением программного пакета Quantum ESPRESSO. Расчёты выполнены с использованием обменно-корреляционного функционала GGA-PBE. Полученные результаты показывают, что соединение ErCu кристаллизуется в структуре типа B2 (Pm-3m), а

параметр решётки хорошо согласуется с экспериментальными данными. Анализ плотности состояний и зонной структуры подтверждает металлическую природу соединения. Спин-поляризованные расчёты показали наличие большого положительного магнитного момента на атоме Er ($\approx 2.25 \mu_B$) и малого отрицательного магнитного момента на атоме Cu ($\approx -0.019 \mu_B$). Общее значение магнитного момента, равное $2.22 \mu_B$ на ячейку, а также частичная компенсация между подрешётками указывают на ферромагнитную природу системы.

Ключевые слова: DFT+U, Quantum ESPRESSO, ферромагнетизм, магнитный момент.

a.

b. **Introduction.** Intermetallic compounds based on rare-earth elements (lanthanides) have become subjects of extensive investigation in the fields of condensed matter physics and materials science over recent decades. These compounds are of great scientific and technological significance due to their unique magnetic, electronic, and thermoelectric properties [1][2]. In particular, compounds containing erbium (Er) exhibit unusual magnetic characteristics owing to the partial filling of the 4f electron shell and strong spin-orbit coupling [3]. In the ErCu intermetallic compound, Er ions predominantly exist in the Er^{3+} state with a $4f^1$ electron configuration. According to Hund's rules, this configuration provides large spin and orbital moments, leading to the formation of a substantial magnetic moment.

Copper (Cu), belonging to the 3d transition metals, acts as a ligand when forming compounds with lanthanide atoms and modulates the overall magnetic state of the system. The fact that the ErCu compound possesses a B2-type (CsCl-structure) crystal lattice enables the simultaneous study of both its symmetric and anisotropic magnetic properties [4]. In this structure, each Er atom is surrounded by eight Cu atoms, which exerts a significant influence on crystal field effects and magnetic anisotropy.

Since measuring magnetic moments at the atomic level by experimental methods is technically challenging, first-principles computational methods have been widely employed to study such systems. Density Functional Theory (DFT) is considered one of the most efficient and widely used methods for describing quantum-mechanical systems of atoms and molecules [5][6]. However, standard DFT cannot fully account for the strong correlation of f-electrons. For this reason, the GGA+U or LDA+U extension is applied in compounds involving lanthanide atoms, where the Hubbard U parameter is introduced to correct the correlation energy of electron-electron interactions [7].

Research Object and Methodology. In this study, the electronic and magnetic properties of the ErCu intermetallic compound were investigated using a first-principles approach. The calculations were performed within the framework of Density Functional Theory (DFT) using the Quantum ESPRESSO software package [8]. The Generalized Gradient Approximation (GGA) with the Perdew–Burke–Ernzerhof (PBE) parametrization was employed to account for the exchange-correlation energy. The DFT+U approach was applied in order to accurately describe the localized 4f electrons of the rare-earth element Er, with the Hubbard U parameter set to 5 eV for Er atoms.

Ultrasoft pseudopotentials were used to model the ion-core and electron interactions. The kinetic energy cutoff for the wave function expansion was set to 60 Ry, while the charge density cutoff was set to 600 Ry. Brillouin zone integration was carried out using a Monkhorst–Pack k-point grid of dimensions $4 \times 4 \times 4$. Spin-polarized calculations ($nspin = 2$) were performed to account for the magnetic state of the electronic system, and initial magnetization values were assigned to both Er and Cu atoms in order to initialize a ferromagnetic configuration.

Self-consistent field (SCF) calculations were carried out with an electronic energy convergence threshold of 10^{-4} Ry. The system under study possesses a B2-type (CsCl-type) crystal structure, in which Er atoms are located at coordinates close to the central position of type (0.5, 0.5, 0.5), while Cu atoms occupy the (0, 0, 0) position, forming an ideal cubic lattice.

Results and Discussion. The crystal structure of the ErCu intermetallic compound obtained after geometric optimization is illustrated in Figure 1. The compound crystallizes in the B2 structure type (space group $Pm\bar{3}m$, No. 221). In this structure, Cu atoms are located at the corners of the cube, while the Er atom occupies the central position. The calculated lattice parameter is $a = 3.47 \text{ \AA}$, which is in good agreement with the experimental value ($a \approx 3.42 \text{ \AA}$) [4]. Each Er atom is surrounded by eight Cu atoms, and this coordination number reflects the high-symmetry structure characteristic of lanthanide compounds.

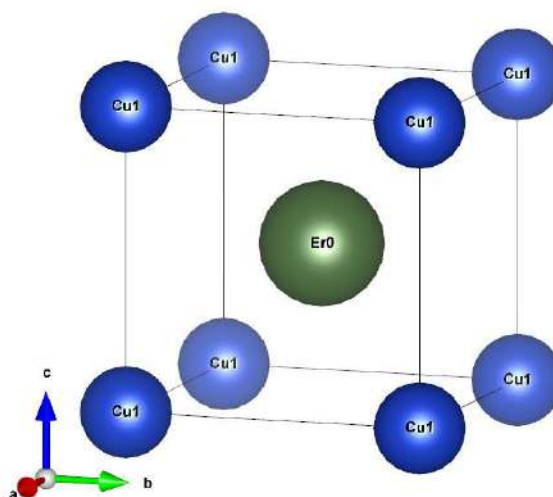


Figure 1. Crystal structure of the ErCu intermetallic compound

The total and high-resolution density of states of the compound are presented in Figure 2. In Figure 2(a), the principal electron density of Er is located in the energy interval from -4 to -2 eV, where a considerable difference between the spin-up and spin-down densities is observed. This difference naturally gives rise to a spin magnetic moment. The magnetic moments listed in Table 1 are derived directly from this difference in spin densities. The magnetic moment of Er amounts to $2.25 \mu_B$, while that of Cu equals $-0.019 \mu_B$. The small magnitude of the Cu magnetic moment is attributed to the negligible difference between its spin-up and spin-down densities, whereas the negative sign indicates that the Cu magnetic moment is oriented antiparallel to that of Er.

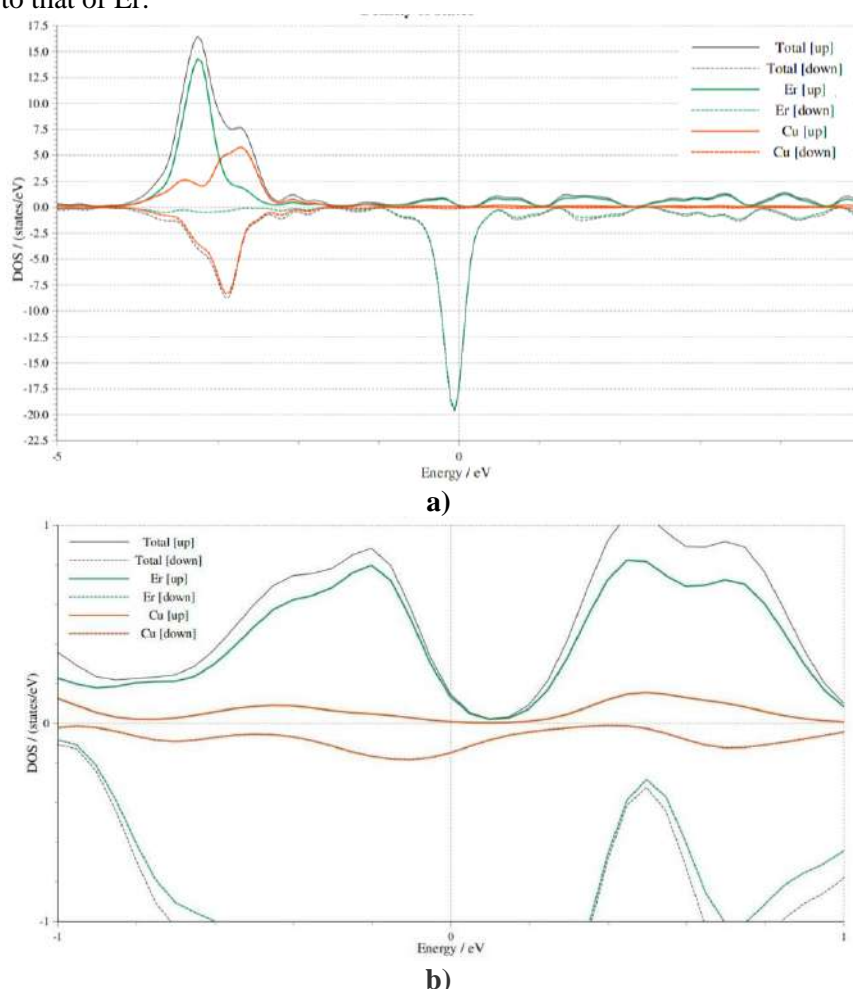


Figure 2. (a) Total density of states (Total DOS) of the ErCu compound, (b) High-resolution DOS plot near the Fermi level

As shown in Figure 2(b), at the Fermi level ($E_F = 0$ eV), the spin-up density of states is small for Er and nearly zero for Cu. In the spin-down channel, however, Cu possesses a moderate density, while the density of states of Er reaches a considerably large value. This indicates that electrical current in the ErCu compound is carried predominantly by the spin-down electrons of Er. In general, the density of electronic states is nonzero both above and below the Fermi level, which confirms that the ErCu compound exhibits metallic conductivity.

As a result of the DFT+U calculations, the magnetic moment and electronic charge of each atom were determined with quantitative precision. Table 1 presents the calculated charges and magnetic moments for the Er and Cu atoms in the ErCu compound.

Table 1. Magnetic moments and charges of the ErCu compound (DFT+U, GGA-PBE)

№	Atom	Charge (e)	Mag. moment (μ_B)	Direction
1	Er	29.9100	2.25	Parallel (\uparrow)
2	Cu	18.4689	-0.019	Antiparallel (\downarrow)

Note: Total magnetic moment = 2.22 Bohr mag/cell; absolute magnetic moment = 2.28 Bohr mag/cell.

The large positive magnetic moment of the Er atom (2.2495 μ_B) is fully explained by the partially filled 4f shell (11 electrons) and the fulfillment of Hund's rules [9,10]. The small negative magnetic moment of the Cu atom (-0.0192 μ_B) is an expected result for a d-transition metal and is induced by the Er atom through the RKKY exchange mechanism.

The calculated total magnetic moment of the ErCu compound is 2.22 μ_B /cell, while the absolute magnetic moment amounts to 2.28 μ_B /cell. The difference between the total and absolute magnetic moments (0.06 μ_B) indicates that the Er and Cu sublattices are ordered in opposite directions. This implies that full compensation does not occur in the system, meaning that the magnetic moments of the two sublattices are not equal in magnitude. It is precisely this partial compensation that demonstrates the ferrimagnetic character of the ErCu compound.

The electronic band structure of the ErCu compound was calculated along the high-symmetry directions of the Brillouin zone (Figures 3 and 4). The distinction between the spin-up (blue solid lines) and spin-down (red dashed lines) channels in the band structure confirms the ferrimagnetic ordering. Several bands cross the Fermi level, which is consistent with the metallic nature of the compound.

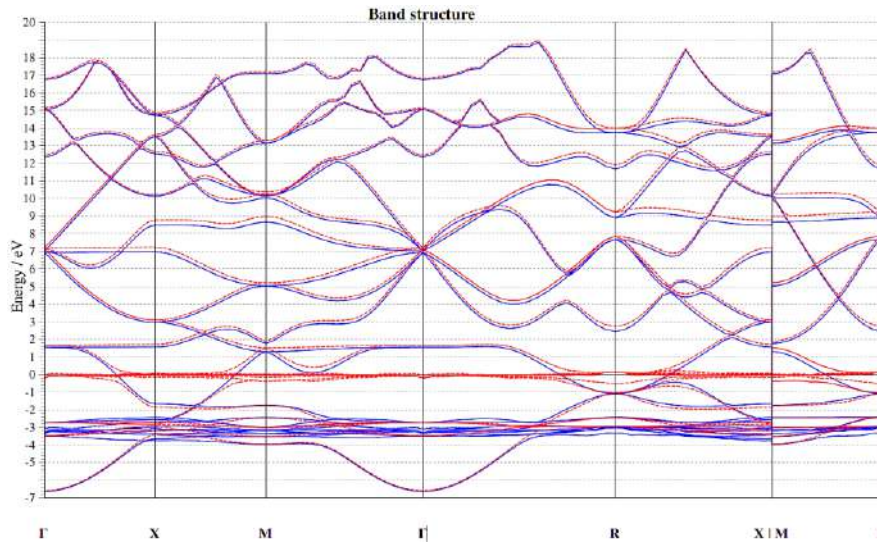


Figure 3. Electronic band structure of the ErCu intermetallic compound (along the $\Gamma \rightarrow X \rightarrow M \rightarrow \Gamma \rightarrow R \rightarrow X|M \rightarrow R$ directions; DFT+U, U = 6 eV). Blue solid lines — spin-up (\uparrow), red dashed lines — spin-down (\downarrow) states. The Fermi level is normalized to $E_F = 0$ eV. Energy range: from -7 eV to +20 eV

The crossing of several energy bands at the Fermi level ($E_F = 0$ eV) fully confirms the metallic character of the compound, with the density of states satisfying $N(E_F) \neq 0$. The relatively dense clustering of red lines near the Fermi level indicates the localization of Er 4f \downarrow states in close proximity to E_F .

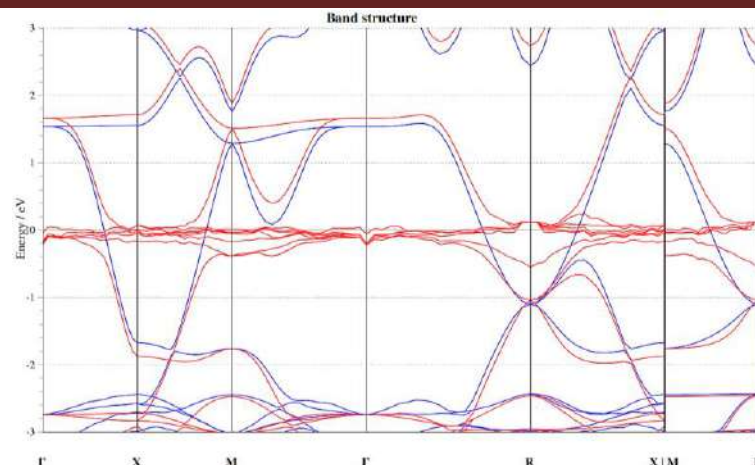


Figure 4. Electronic band structure of the ErCu intermetallic compound in the vicinity of the Fermi level. Blue solid lines — spin-up (\uparrow), red dashed lines — spin-down (\downarrow)

As seen from Figure 4, near the Fermi level the number of energetic states corresponding to the blue solid lines — spin-up (\uparrow) — is smaller compared to the red dashed lines — spin-down (\downarrow) — with 2 states crossing the Fermi level E_F . Consequently, electrical current is carried predominantly by the spin-down (\downarrow) electrons, although the spin-up (\uparrow) electrons also contribute a minor fraction.

Conclusion. In this study, the electronic and magnetic properties of the ErCu intermetallic compound were investigated from first principles using the DFT+U method within the Quantum ESPRESSO software package. The calculations confirmed that the compound possesses a B2-type ($P\bar{m}3m$) crystal structure, and the computed lattice parameter $a = 3.47 \text{ \AA}$ showed good agreement with the experimental value. Analysis of the density of states and band structure demonstrated that the ErCu compound exhibits metallic conductivity, as evidenced by a nonzero density of states at the Fermi level. It was established that electrical current is carried predominantly by the spin-down electrons of Er. The large magnetic moment of the Er atom ($2.25 \mu_B$) is explained by the partially filled $4f^{11}$ shell and Hund's rules, while the small negative moment of Cu ($-0.019 \mu_B$) is attributed to the RKKY exchange mechanism. The difference between the total and absolute magnetic moments confirms the ferrimagnetic nature of the ErCu compound.

REFERENCES:

1. Buschow K.H.J. *Intermetallic compounds of rare-earth and 3d transition metals // Reports on Progress in Physics.* – 1977. – Vol. 40. – P. 1179–1256. DOI: 10.1088/0034-4885/40/10/002.
2. Franse J.J.M., Radwanski R.J. *Magnetic properties of binary rare-earth 3d-transition-metal intermetallic compounds // Handbook of Magnetic Materials.* – 1993. – Vol. 7. – P. 307–501.
3. Jensen J., Mackintosh A.R. *Rare Earth Magnetism: Structures and Excitations.* – Clarendon Press, Oxford, 1991. – 403 p.
4. Iandelli A., Palenzona A. *Crystal chemistry of intermetallic compounds // Handbook on the Physics and Chemistry of Rare Earths.* – 1979. – Vol. 2. – P. 1–54.
5. Hohenberg P., Kohn W. *Inhomogeneous electron gas // Physical Review.* – 1964. – Vol. 136. – P. B864–B871. DOI: 10.1103/PhysRev.136.B864.
6. Perdew J.P., Burke K., Ernzerhof M. *Generalized gradient approximation made simple // Physical Review Letters.* – 1996. – Vol. 77. – P. 3865–3868. DOI: 10.1103/PhysRevLett.77.3865.
7. Dudarev S.L. et al. *Electron-energy-loss spectra and the structural stability of nickel oxide: An LSDA+U study // Physical Review B.* – 1998. – Vol. 57. – P. 1505–1509. DOI: 10.1103/PhysRevB.57.1505.
8. Giannozzi P. et al. *QUANTUM ESPRESSO: a modular and open-source software project for quantum simulations of materials // Journal of Physics: Condensed Matter.* – 2009. – Vol. 21. – P. 395502. DOI: 10.1088/0953-8984/21/39/395502.
9. Coblin B. *The Electronic Structure of Rare-Earth Metals and Alloys.* – Academic Press, London, 1977. – 591 p.
10. Kirchmayr H.R., Poldy C.A. *Magnetism in rare earth-3d intermetallics // Journal of Magnetism and Magnetic Materials.* – 1979. – Vol. 13. – P. 1–82. DOI: 10.1016/0304-8853(79)90078-2.

GAZ TASHISH USULIDA O'STIRILGAN $Zn_xCd_{1-x}S$ QATTIQ QORISHMALI YUPQA QATLAMINING MORFOLOGIK TAHLILI

Muzafarova Sultanpasha Anvarovna,

O'zbekiston Milliy Universiteti huzuridagi Yarimo 'tkazgichlar fizikasi va mikroelektronika ilmiy-tadqiqot instituti, f.-m.f.d., k.i.x.

Axmedova Nilufar Azamadjon-qizi,

*O'zbekiston Milliy Universiteti huzuridagi Yarimo 'tkazgichlar fizikasi va mikroelektronika ilmiy-tadqiqot instituti tayanch doktoranti
nilufaraxmedova564@gmail.com*

Annotatsiya. Ushbu tadqiqot ishida $Zn_xCd_{1-x}S$ qattiq qorishmali yupqa qatlami gaz tashish usuli bilan molibden taglik ustida o'stitildi, tashuvchi gaz sifatida vodoroddan foydalanildi. O'stirilgan qatlam qalinligi $d \sim 10 \mu m$ ga yaqin. Uning sirt morfologiyasi va tarkibini tadqiq qilish maqsadida SEM va EDS tahlillar o'tkazildi. Tahlillarga ko'ra, olingan qatlamda $x=0,35$ ga teng bo'lib, $Zn_{0,35}Cd_{0,65}S$ tarkibli tuzilma hosil bo'lgan. Uning sifati yuqori va tarkibi barqaror, sirtida mikrochugurlar va deffektlar hosil bo'lmagan. $Zn_xCd_{1-x}S$ qatlamining yuzasida o'zaro bog'langan, polikristal tabiatga ega bo'lgan donalar mavjud. Donalarning o'rtacha o'lchami sintez sharoitiga bog'liq holda 50–150 nm atrofida. Bunday o'lchamlar nur yutilishini oshirish va tashuvchilarning diffuziya uzunligini ta'minlash uchun optimal hisoblanadi.

Kalit so'zlar: qattiq qorishma, taglik, mikrochugurlik, donachalar, polikristall, fotogeneratsiya, tekstura, taqiqlangan soha.

МОРФОЛОГИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ТОНКИХ ПЛЁНОК ТВЁРДОГО РАСТВОРА $Zn_xCd_{1-x}S$, ВЫРАЩЕННЫХ МЕТОДОМ ГАЗОТРАНСПОРТНОГО ПЕРЕНОСА»

Аннотация. В данной исследовательской работе методом газотранспорта на молибденовой подложке был выращен тонкий слой твердого сплава $Zn_xCd_{1-x}S$ с использованием водорода в качестве газа-носителя. Толщина выращенного слоя составляла около $d \sim 10 \mu m$. Для изучения морфологии поверхности и состава были проведены анализы с помощью сканирующей электронной микроскопии (СЭМ) и энергодисперсионной спектроскопии (ЭДС). Согласно результатам анализа, полученный слой имел состав $Zn_{0,35}Cd_{0,65}S$ с $x=0,35$. Его качество высокое, состав стабильный, на поверхности отсутствуют микрополости и дефекты. На поверхности слоя $Zn_xCd_{1-x}S$ имеются взаимосвязанные зерна поликристаллической природы. Средний размер зерен составляет около 50–150 нм в зависимости от условий синтеза. Такие размеры оптимальны для увеличения поглощения света и обеспечения длины диффузии носителей заряда.

Ключевые слова: Твердый раствор, подложка, микрополость, зерна, поликристаллический, фотогенерация, текстура, запрещенная зона.

MORPHOLOGICAL ANALYSIS OF $Zn_xCd_{1-x}S$ SOLID SOLUTION THIN FILMS GROWN BY THE GAS TRANSPORT METHOD

Abstract. In this research work, a thin layer of $Zn_xCd_{1-x}S$ solid alloy was grown on a molybdenum substrate by the gas transport method, using hydrogen as the carrier gas. The thickness of the grown layer was about $d \sim 10 \mu m$. SEM and EDS analyses were performed to study its surface morphology and composition. According to the analyses, the obtained layer had a composition of $Zn_{0,35}Cd_{0,65}S$ with $x=0,35$. Its quality is high and the composition is stable, and there are no microcavities or defects on the surface. On the surface of the $Zn_xCd_{1-x}S$ layer, there are interconnected grains of a polycrystalline nature. The average grain size is around 50–150 nm, depending on the synthesis conditions. Such sizes are optimal for increasing light absorption and ensuring the diffusion length of carriers.

Keywords: Solid solution, substrate, microcavity, grains, polycrystalline, photogeneration, texture, band gap

Kirish. $Zn_xCd_{1-x}S$ qattiq qorishmali yupqa qatlami o'zining noyob elektrofizik xususiyatlari bilan yarimo'tkazgich birikmalari orasida alohida ahamiyatga ega. U taqiqlangan sohasini keng diapazonda

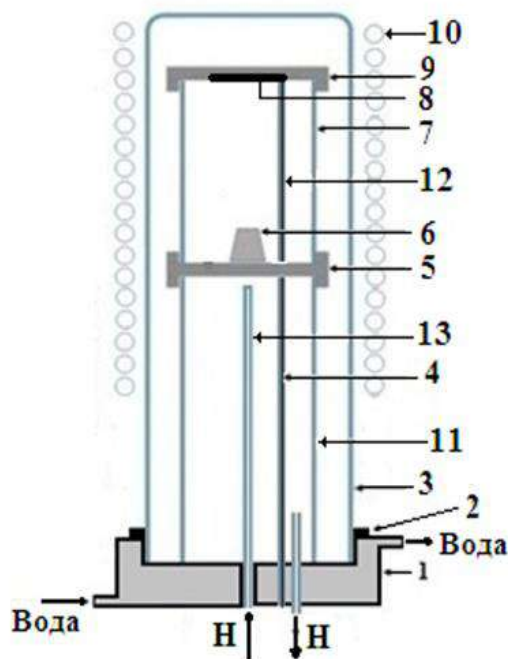
o'zgartirish imkoniyati, yorug'lik va haroratga sezgirligining yuqoriligi, arzon homashyodan tayyorlanishi, yaratilish usullarining soddaligi bilan ko'plab tadqiqodchilarning e'tiborini tortmoqda.

$Zn_xCd_{1-x}S$ tuzilmasi ZnS va CdS ning turli xil nisbatda birikishidan hosil bo'ladigan II–VI guruhiga mansub yarimo'tkazgich materialdir. Bu yerda x — ruxning mol ulushi bo'lib, $0 \leq x \leq 1$ oralig'ida o'zgaradi. Tarkibiy nisbati x ni o'zgartirib materialning fizik, elektron va optik xususiyatlarini keng diapazonda boshqarish mumkin. Shu sababli, $Zn_xCd_{1-x}S$ zamonaviy optoelektronika va fotonika sohalarida katta ilmiy va amaliy ahamiyatga ega. Bunda ZnS keng taqiqlangan sohaga ega yarimo'tkazgich, unda E_g taxminan 3,6 eV ni tashkil etadi, CdS esa nisbatan tor taqiqlangan sohaga ega bo'lib, uning E_g qiymati ~2,4 eV ga teng [1,2]. Ushbu ikki material asosida hosil bo'lgan $Zn_xCd_{1-x}S$ qattiq eritmasida energiya oralig'i x qiymatiga bog'liq holda uzluksiz ravishda o'zgaradi. Natijada ushbu materialning optik yutilish chegarasi ultrabinafsha sohasidan ko'rinadigan yorug'lik diapazonigacha sozlanishi mumkin. Bu xususiyat $Zn_xCd_{1-x}S$ ni spektral sezgir qurilmalar uchun istiqbolli materialga aylantiradi.

Yuqoridagilardan kelib chiqqan holda, $Zn_xCd_{1-x}S$ asosidagi qattiq qorishmalarini gaz tashish usuli yordamida o'stirish va o'stirilgan yupqa qatlamlarning kimyoviy tarkibini o'rganish ushbu tadqiqotning asosiy vazifasi hisoblanadi.

Metod. $Zn_xCd_{1-x}S$ qattiq qorishmali yupqa qatlamini yaratish uchun bitta manbali yarimo'tkazgich qatlamlarni gaz tashish usulida o'stiruvchi qurilmadan foydalanildi, tashuvchi gaz sifatida vodorod qo'llanildi. Na'munani tayyorlashda 50 mg ZnS va 600 mg CdS qorishmalari olindi. Yupqa qatlam molibden taglik ustida 930 °C manbaa va 760 °C taglik shatoitida 10 daqiqa davomida o'stirildi.

Olingan qatlam qalinligi $d \sim 10 \mu m$ ga teng.

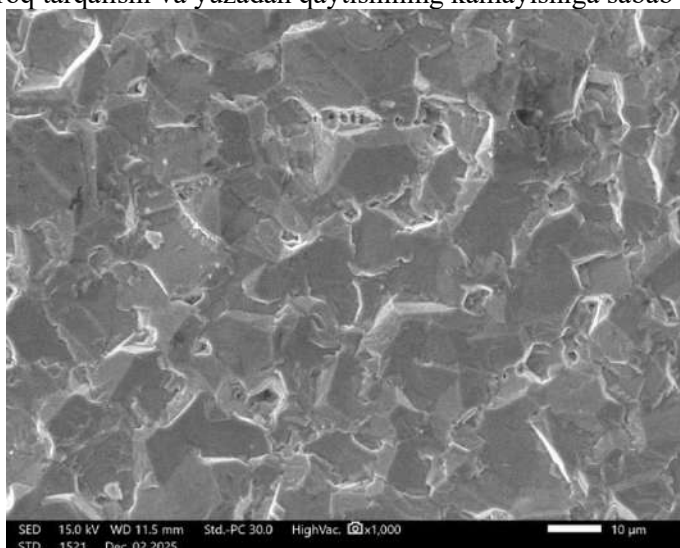


1-rasm. Yarimo'tkazgich qatlamlarni gaz tashish usulida o'stiruvchi qurilma reaktori (1 – sovutish uchun oqimli suv bilan sovutiladigan flansh, 2 – siqish uchun o'rnatilgan flansh, 3 – kremniy quvurli reaktor, 4 – bug'lanish manbayi uchun xromel-alumel termoparasi, 5 – pastki grafit tutqichi, 6 – bug'lanadigan moddaning manbayi, 7 – yuqori kremniy idishi, 8 – molibden substrati, 9 – yuqori grafit qopqog'i, 10 – ajratiladigan pech, 11 – pastki kremniy idishi, 12 – substrat uchun xromel-alumel termoparasi, 13 – gaz tashuvchisini tizimga yuborish quvuri)

Yaratilgan $Zn_xCd_{1-x}S$ qattiq qorishmali yupqa qatlamning kimyoviy tarkibi, morfologiyasi tadqiq qilindi.

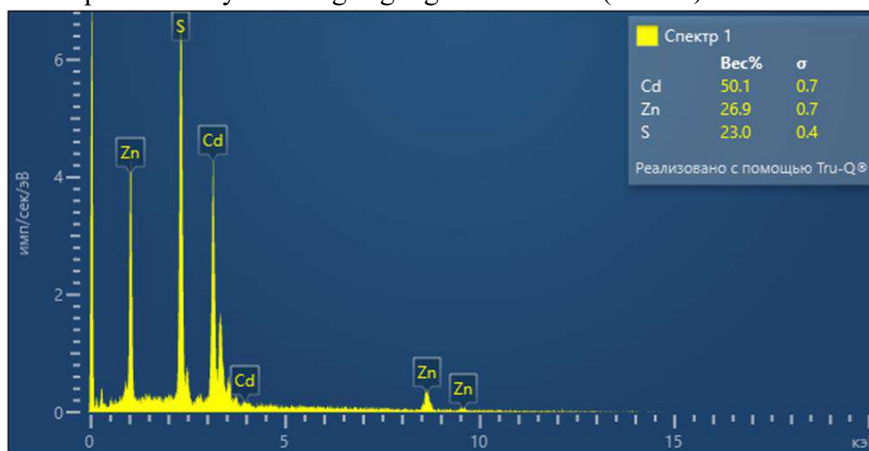
Olingan natijalar va uning muhokamasi. $Zn_xCd_{1-x}S$ yupqa qatlamlarining SEM morfologik tahlili. Skanerlovchi elektron mikroskopiya (SEM) natijalari $Zn_xCd_{1-x}S$ yupqa qatlamlarining morfologiyasi, donachalar kattaligi, yuza teksturasi va struktur bir xilligini baholash imkonini beradi. Tahlil natijalaridan ma'lum bo'ldiki, $Zn_xCd_{1-x}S$ qatlamining yuzasida o'zaro bog'langan, polikristal tabiatga ega bo'lgan donalar mavjud (2-rasm). Donachalarning o'rtacha o'lchami sintez sharoitiga bog'liq holda 50–150 nm atrofida o'zgaradi. Bunday o'lchamlar nur yutilishini oshirish va tashuvchilarning diffuziya uzunligini ta'minlash

uchun optimal deb hisoblanadi. Yupqa qatlam yuzasida katta mikrochuqurlik yoki yong'insimon defektlar kuzatilmagani qatlamning yuqori sifati va uning tarkibiy barqarorligidan dalolat beradi. Donachalar chegaralarining aniq ko'rinishi $Zn_xCd_{1-x}S$ dagi geksogonal vursit strukturasi xos bo'lgan kristall o'sishi jarayonlarining barqaror amal qilganini tasdiqlaydi. SEM tasvirlaridagi bir oz dag'allik (roughness) $Zn_xCd_{1-x}S$ qavatida fotogeneratsiya va yutilish mexanizmlariga ijobiy ta'sir ko'rsatadi, chunki bunday tekstura yorug'likning ko'proq tarqalishi va yuzadan qaytishining kamayishiga sabab bo'ladi.



2-rasm. $Zn_xCd_{1-x}S$ yupqa qatlamlarining SEM morfologik tahlili

$Zn_xCd_{1-x}S$ yupqa qatlamining EDS spektral tahlili. Taqdim etilgan EDS spektri $Zn_xCd_{1-x}S$ yupqa qatlamining element tarkibini aniqlash uchun qo'llanilgan bo'lib, spektrda asosiy tarkibiy elementlar — Cd, Zn va S aniq indentifikatsiya qilingan. Spektrdagi aniq va yuqori intensivlikka ega cho'qqining mavjudligi materialning bir xil va barqaror tarkibiy tuzilmaga egaligini ko'rsatadi (3-rasm).



3-rasm. $Zn_{0,35}Cd_{0,65}S$ yupqa qatlamining EDS spektral tahlili

EDS hisobotiga ko'ra elementlarning og'irlik bo'yicha foiz miqdori (Wt.%):

Element	Miqdor (Wt.%)	σ
Cd	50.1 %	0.7
Zn	26.9 %	0.7
S	23.0 %	0.4

Kadmiy (Cd) cho'qqising intensivligi yuqori bo'lib, $Zn_xCd_{1-x}S$ qatlamida Cd tarkibi nisbatan katta ekanini ko'rsatadi. Bu materialdagi x qiymatining kichik ekanidan (Zn nisbatan kam) dalolat beradi. Demak, qatlam taxminan $Zn_{0,35}Cd_{0,65}S$ tarkibiga yaqin.

1. Oltinugurt (S) pikining barqaror va yuqori intensivlikda bo'lishi $Zn_xCd_{1-x}S$ birikmasining stexiometriyasiga yaqin sintez qilinganini tasdiqlaydi.

2. Spektrda ifloslanish elementlari (O, C, Si va boshqalar) yo'qligi yuqori tozalikdagi sinfez jarayoni amalga oshirilganini ko'rsatadi.

PHYSICS

3. 5–10 keV atrofidagi qo‘shimcha zaif Zn cho‘qqilar Zn_k va Zn_L liniyalariga to‘g‘ri keladi va material tarkibiga mosdir.

EDS tahlili $Zn_xCd_{1-x}S$ yupqa qatlamlarining yuqori tarkibiy aniqlikda sintez qilinganini, materialdagi Zn va Cd nisbati esa bajarilgan sintez sharoitlari uchun mos ekanini ko‘rsatadi. Aniqlangan tarkib fotoelektrik va optoelektron qo‘llanmalar uchun talab etiladigan xossalarga ega bo‘lishini ta‘minlaydi.

Xulosa. O‘stirilgan $Zn_xCd_{1-x}S$ yupqa qatlami polikristall tuzilishga ega bo‘lib, kristallari geksogonal vursit shaklida. Sirtida mikrochuqur va defektlar kuzatilmadi va bu yaxshi shakillangan tuzilma olinganidan dalolat beradi. Qatlam taxminan $Zn_{0,35}Cd_{0,65}S$ tarkibiga ega va Cd konsentratsiyasi yuqori ekanligi aniqlandi. Spektrda yot elementlar topilmadi, bu esa tadqiqot yuqori tozalikda olib borilganligi anglatadi.

ADABIYOTLAR:

[1]. S. S. Srinivasan, J. Wade, and E. K. Stefanakos, “Visible light photocatalysis via CdS/ TiO_2 nanocomposite materials,” *Journal of Nanomaterials*, vol. 2006, Article ID 87326, 7 pages, 2006

[2]. A. Vazquez, D. B. Hernandez-Uresti, and S. Obregon, “Electrodeposition of CdS coatings and their photocatalytic activities in the degradation of tetracycline antibiotic,” *Applied Surface Science*, vol. 386, pp. 412–417, 2016

Sm₃Ga₅O₁₂ KRISTALI OPTIK YUTILISH SPEKTRI VA UNING XUSUSIYATLARI

Fayziyeva Maxliyo Alijon qizi,

Buxoro davlat universiteti tayanch doktoranti

fayziyevamaxliyo55@gmail.com

Sharipov Mirzo Zokirovich,

Buxoro davlat universiteti professori

m.z.sharipov@buxdu.uz

Nazarov Erkin Sadikovich,

Buxoro davlat universiteti dotsenti

nazaroverkin1968@gmail.com

Аннотация. Ushbu maqolada Sm₃Ga₅O₁₂ kristallining optik yutilish spektri ultrabinafsha-ko‘rinuvchi spektroskopiya usuli yordamida o‘rganildi. Tajriba spektrlari EMC-30PC-UV spektrofotometri yordamida 190–1100 nm oralig‘ida qayd etildi. Ultrabinafsha, ko‘rinuvchi va yaqin infraqizil sohalarda bir nechta yutilish maksimumlari kuzatildi. 265 nm hamda 403–416 nm atrofida kuchli yutilish zonalari aniqlandi. Olingan natijalar samariy saqlovchi granat kristallari bo‘yicha chop etilgan ilmiy manbalar bilan solishtirildi. Ko‘rinuvchi sohadagi chiziqlar Sm³⁺ ionlarining ichki 4f elektron o‘tishlari bilan bog‘landi, ultrabinafsha soha esa kristall panjara va zaryad almashinish yutilishi bilan izohlandi. Kristall bo‘laklarining och sariq rangi binafsha-ko‘k sohada yutilish mavjudligi bilan mos keladi. Natijalar Sm₃Ga₅O₁₂ materialining keyingi fotonik va spektroskopik qo‘llanishlar uchun istiqbolli ekanligini ko‘rsatadi.

Калит so‘zlar: Sm₃Ga₅O₁₂, granat kristall, spektroskopiya, optik yutilish, samariy ionlari

Sm₃Ga₅O₁₂ ОПТИЧЕСКИЙ СПЕКТР ПОГЛОЩЕНИЯ КРИСТАЛЛА И ЕГО ОСОБЕННОСТИ

Аннотация. В данной статье оптические спектры поглощения кристалла Sm₃Ga₅O₁₂ были исследованы методом ультрафиолетово-видимой спектроскопии. Экспериментальные спектры были зарегистрированы в диапазоне 190–1100 нм с использованием спектрофотометра EMC-30PC-UV. В ультрафиолетовой, видимой и ближней инфракрасной областях наблюдалось несколько максимумов поглощения. Были выявлены интенсивные зоны поглощения в области около 265 нм и 403–416 нм. Полученные результаты были сопоставлены с опубликованными научными данными по гранатовым кристаллам, содержащим самарий. Линии в видимой области были связаны с внутренними 4f-электронными переходами ионов Sm³⁺, тогда как ультрафиолетовая область была объяснена поглощением, связанным с кристаллической решёткой и процессами переноса заряда. Светло-жёлтый цвет кристаллических фрагментов согласуется с наличием поглощения в фиолетово-синей области спектра. Полученные результаты показывают, что материал Sm₃Ga₅O₁₂ является перспективным для дальнейших фотонных и спектроскопических применений.

Ключевые слова: Sm₃Ga₅O₁₂, гранатовый кристалл, спектроскопия, оптическое поглощение, ионы самария.

Sm₃Ga₅O₁₂ OPTICAL ABSORPTION SPECTRUM OF A CRYSTAL AND ITS CHARACTERISTICS

Abstract. In this work, the optical properties of Sm₃Ga₅O₁₂ crystal fragments were investigated using ultraviolet-visible spectroscopy. Experimental spectra were recorded in the 190–1100 nm range using an EMC-30PC-UV spectrophotometer. Several absorption maxima were observed in the ultraviolet, visible, and near-infrared regions. Strong absorption bands were identified around 265 nm and 403–416 nm. The obtained results were compared with published scientific data on samarium-containing garnet crystals. The lines observed in the visible region were associated with internal 4f electronic transitions of Sm³⁺ ions, while the ultraviolet region was explained by crystal lattice and charge-transfer absorption. The light-yellow color of the crystal fragments is consistent with the presence of absorption in the violet-blue region of the

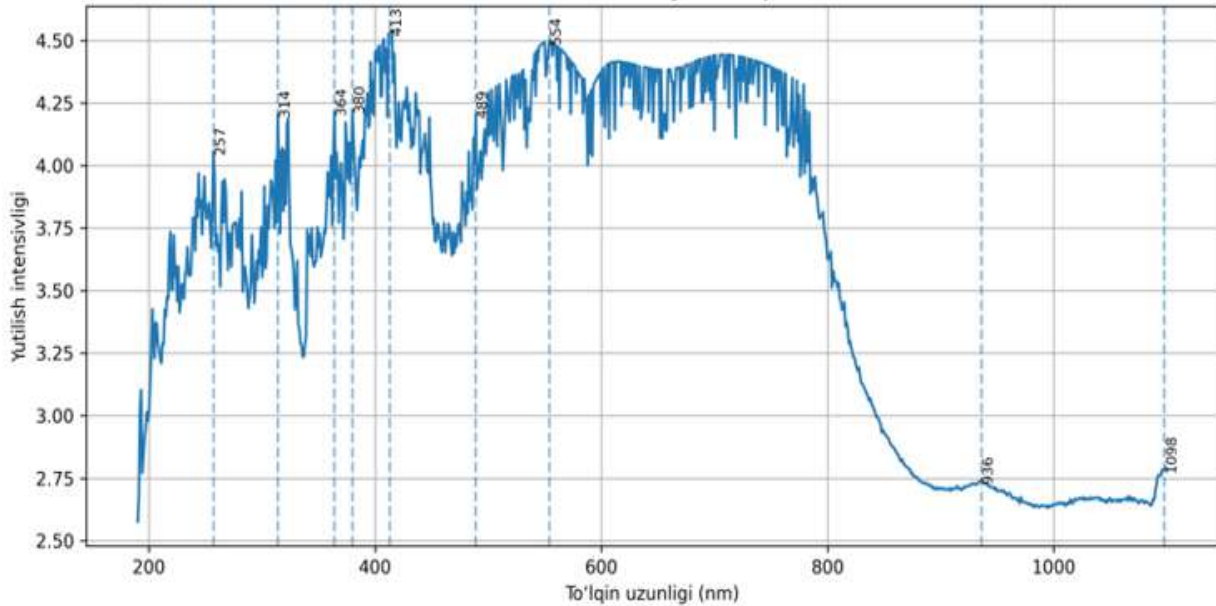
spectrum. The results indicate that $Sm_3Ga_5O_{12}$ is a promising material for further photonic and spectroscopic applications.

Keywords: *$Sm_3Ga_5O_{12}$, garnet crystal, spectroscopy, optical absorption, samarium ions.*

Kirish. Nodir yer elementlari asosidagi granat kristallari zamonaviy materialshunoslikda muhim o‘rin egallaydi. Bunga ularning yuqori kimyoviy barqarorligi, mexanik mustahkamligi, issiqlikka chidamliligi va yaxshi optik xossalari sabab bo‘ladi. Granat tipidagi oksid kristallar ko‘plab texnologik yo‘nalishlarda qo‘llaniladi. Xususan, ular lazer aktiv muhitlari, lyuminescent materiallar, sintillyatsion detektorlar, optik oynalar, elektromagnit to‘lqin uzatgichi hamda magnitoptik qurilmalar ishlab chiqarishda ishlatiladi. Granatlarning yana bir muhim afzalligi shundaki, ularning kristall panjarasiga turli nodir yer ionlarini kiritish mumkin. Bu esa materialning optik, magnit va elektr xossalarini boshqarish imkonini beradi. Granat kristallarining umumiy formulasi odatda $A_3B_5O_{12}$ ko‘rinishida bo‘ladi. Bu yerda A va B pozitsiyalarini turli metall ionlari egallaydi. Tuzilish jihatidan granatlar murakkab, ammo barqaror kristall sistemaga ega. Shu sababli ular yuqori haroratlarda ham o‘z xossalarini saqlab qoladi. Ko‘plab ilmiy tadqiqotlarda ittriy granati $Y_3Al_5O_{12}$ (YAG), gadoliniy galliy granati $Gd_3Ga_5O_{12}$ (GGG), ittriy galliy granati $Y_3Ga_5O_{12}$ (YGG) va aralash granatlar keng o‘rganilgan [1]. $Sm_3Ga_5O_{12}$ samariy-galliy granati granat oilasiga mansub bo‘lib, unda samariy ionlari asosiy kationlardan biri sifatida ishtirok etadi. Bu holat materialni oddiy legirlangan kristallardan farqlaydi. Ko‘pchilik ilmiy ishlarda samariy ionlari boshqa granatlarga kichik miqdorda qo‘shimcha sifatida kiritilgan bo‘lsa, $Sm_3Ga_5O_{12}$ tarkibida samariy kristall panjaraning asosiy qismini tashkil qiladi. Samariy ionlari (Sm^{3+}) nodir yer elementlari orasida murakkab elektron tuzilishga ega bo‘lib, 4f qobig‘idagi elektronlar sababli ko‘plab energetik sathlarni hosil qiladi. Ushbu sathlar orasidagi elektron o‘tishlar natijasida ultrabinafsha, ko‘rinuvchi va yaqin infraqizil sohalarda yutilish hamda nurlanish chiziqlari paydo bo‘ladi. Ayniqsa Sm^{3+} ionlari qizg‘ish-sariq luminesensiya berishi bilan mashhur. Shu sababli samariy saqlovchi materiallar lyuminescent lampalar, indikatorlar, optik sensorlar va lazer tizimlarida qiziqish uyg‘otadi [2]. Adabiyotlar tahlili shuni ko‘rsatadiki, $Gd_3Ga_5O_{12}:Sm$ va $Y_3Ga_5O_{12}:Sm$ tizimlari bo‘yicha ma‘lum darajada tadqiqotlar mavjud [4]. Ularda Sm^{3+} ionlarining yutilish spektrlari, nurlanish xossalari va relaksatsiya jarayonlari o‘rganilgan. Biroq $Sm_3Ga_5O_{12}$ birikmasi bo‘yicha ma‘lumotlar cheklangan. Ayniqsa uning kristall bo‘laklarida ultra binafsha (UB) - ko‘rish sohadagi eksperimental spektr ma‘lumotlari yetarli darajada chop etilmagan. Shu sababli ushbu materialning optik tavsifini aniqlash ilmiy jihatdan dolzarb hisoblanadi. UB -ko‘rish spektroskopiyasi kristallarning optik xossalarini aniqlashda samarali usullardan biridir. Ushbu usul yordamida yutilish zonalari, elektron o‘tishlar, rang hosil qiluvchi markazlar, panjara nuqsonlari va zaryad almashinish jarayonlari haqida ma‘lumot olish mumkin. Spektrdagi piklarning joylashuvi va intensivligi material tarkibi hamda ichki elektron tuzilishi bilan bevosita bog‘liq bo‘ladi [3]. Ushbu ishda $Sm_3Ga_5O_{12}$ kristall bo‘laklarining yutilish spektri 190–1100 nm oralig‘ida tahlil qilindi. Asosiy maqsad kuzatilgan yutilish piklarini aniqlash, ularning ehtimoliy fizik manbalarini izohlash va natijalarni adabiyotlarda ma‘lum bo‘lgan samariy saqlovchi granat materiallari bilan solishtirishdan iboratdir [5]. Olingan natijalar $Sm_3Ga_5O_{12}$ ning optik funksional material sifatidagi istiqbolini baholashga xizmat qiladi.

Asosiy qism. Tadqiqot obyekti sifatida $Sm_3Ga_5O_{12}$ tarkibli kristall bo‘laklari ishlatildi. Namunalar laboratoriya manbasidan olingan tayyor kristall bo‘laklari bo‘lib, qo‘shimcha mexanik yoki kimyoviy ishlovsiz optik o‘lchovlarda foydalanildi. Kristall bo‘laklari notekis geometrik shaklga ega bo‘lib, qattiq holatda saqlangan. Vizual kuzatishda namunalar och sariq rangli ekani aniqlandi. Ayrim bo‘laklarda yarim shaffoflik kuzatildi, bu esa materialning ma‘lum darajada optik shaffof ekanini ko‘rsatadi. Namunaning qalinligi va shakli bo‘lakdan bo‘lakka farq qilishi mumkin, bu esa yorug‘likning o‘tishi va yutilish intensivligiga ma‘lum ta‘sir ko‘rsatadi. Optik o‘lchovlar EMC-30PC-UV rusumli spektrofotometr yordamida amalga oshirildi. Ushbu qurilma ultrabinafsha va ko‘rinuvchi sohalardagi spektral yutilish xossalarini aniqlash uchun mo‘ljallangan bo‘lib, laboratoriya sharoitida qattiq materiallar spektrini o‘lchash imkonini beradi. Tajriba xona haroratida olib borildi. O‘lchash jarayonida namuna asbobning optik yo‘liga joylashtirildi va spektr 190 nm dan 1100 nm gacha bo‘lgan to‘lqin uzunliklari oralig‘ida qayd etildi. Tanlangan spektral diapazon materialning ultrabinafsha, ko‘rinuvchi va yaqin infraqizil sohalardagi optik xossalarini bir vaqtda baholash imkonini berdi. 190–400 nm oralig‘i ultrabinafsha mintaqasi bo‘lib, bu yerda odatda panjara yutilishi, zaryad almashinish jarayonlari va yuqori energiyali elektron o‘tishlar kuzatiladi. 400–700 nm oralig‘i ko‘rinuvchi soha bo‘lib, kristallning rangi va nodir yer ionlarining ichki elektron o‘tishlari bilan bog‘liq zonalarni o‘z ichiga oladi [6]. 700–1100 nm oralig‘i esa yaqin infraqizil mintaqasi bo‘lib, past energiyali elektron o‘tishlar haqida ma‘lumot beradi. Spektral natijalarni tahlil qilishda asosiy e‘tibor piklarning joylashuviga qaratildi, chunki to‘lqin uzunligi bo‘yicha maksimumlarning holati material

ichidagi elektron jarayonlar haqida ishonchli ma'lumot beradi. UB – ko'rish sohasidagi yutilish spektr tahlili natijasida 190–1100 nm oralig'ida bir nechta xarakterli yutilish zonarlari aniqlandi. Spekrda keskin va keng zonalar mavjud bo'lib, bu kristall tarkibida bir nechta optik jarayonlar sodir bo'lishini ko'rsatadi. Asosiy piklar quyidagicha tavsiflanadi.



c. 1-rasm. $Sm_3Ga_5O_{12}$ kristalining yutilish spektri

d.

403–416 nm oralig'i spektrdagi eng muhim ko'rinuvchi yutilish zonalaridan biridir. Bu diapazon ko'k-binafsha yorug'lik mintaqasiga to'g'ri keladi. Samariy saqlovchi granat kristallari bo'yicha chop etilgan ilmiy ishlarda 405 nm atrofidagi kuchli yutilish Sm^{3+} ionlari uchun xos zona sifatida ko'rsatilgan. Shu sababli ushbu diapazon $Sm_3Ga_5O_{12}$ kristallida asosiy samariy yutilish sohasi deb qaraladi. Kristallning och sariq rang ko'rinishi ham aynan ko'k-binafsha sohada yutilish mavjudligi bilan mos keladi. 562 nm dagi pik sariq-yashil mintaqaga to'g'ri keladi. Bu ko'rinuvchi sohada joylashgan bo'lib, kuchsiz yoki o'rta intensiv ichki elektron o'tishlardan biri bo'lishi mumkin. Ushbu pikning mavjudligi kristall faqat UB sohada emas, balki ko'rinuvchi diapazonda ham optik faol ekanini ko'rsatadi. 939 nm dagi pik yaqin infraqizil mintaqaga kiradi. Bunday zonalar odatda past energiyali elektron sathlar orasidagi o'tishlar bilan bog'liq bo'ladi. Bu pik kuchsiz bo'lsa-da, Sm^{3+} ionlarining murakkab energetik tuzilishga ega ekanini tasdiqlaydi. Umuman olganda, spektrdagi piklarning bir qismi kristall panjaraga, bir qismi esa Sm^{3+} ionlarining ichki elektron o'tishlariga tegishli ekanligi ko'rinadi. Ayniqsa 403–416 nm oralig'idagi zona ham adabiyot ma'lumotlari, ham kristall rangi bilan mos tushuvchi eng muhim yutilish sohasi hisoblanadi. UB sohasidagi kuchli piklar esa materialning yuqori energiyali optik jarayonlarga sezgir ekanini ko'rsatadi. Infraqizil mintaqadagi kuchsiz piklar esa nodir yer ionlariga xos qo'shimcha energetik sathlar mavjudligini bildiradi.

1-jadval. $Sm_3Ga_5O_{12}$ kristali optik yutilish maksimumlari

To'lqin uzunligi (nm)	Yutilish intensivligi
257,0	4.0568
314,0	4.2066
364,0	4.2136
380,0	4,2239
413,0	4,5306
489,0	4,202
554,0	4,4954
936,0	2,7402
1089,0	2,784

Umuman olganda, spektrdagi yutilish zonalari $\text{Sm}_3\text{Ga}_5\text{O}_{12}$ kristallida ikki xil asosiy optik jarayon mavjudligini ko'rsatadi. Birinchisi, ultrabinafsha sohada kuzatiladigan kristall panjara yoki zaryad almashinish bilan bog'liq yutilishlar. Ikkinchisi esa ko'rinuvchi va yaqin infraqizil sohalarda namoyon bo'ladigan Sm^{3+} ionlarining ichki elektron o'tishlaridir. Shu sababli $\text{Sm}_3\text{Ga}_5\text{O}_{12}$ kristalli optik faol granat materiali sifatida qo'shimcha tadqiqotlar uchun istiqbolli hisoblanadi. Samariy ionlari bilan legirlangan galliy granat kristallari bo'yicha chop etilgan ilmiy ishlarda $\text{Gd}_3\text{Ga}_5\text{O}_{12}:\text{Sm}$ tizimi eng ko'p uchraydigan analog materiallardan biri hisoblanadi. Ushbu kristallarda 405 nm atrofida kuchli yutilish zonasi kuzatilgani qayd etilgan. Mazkur yutilish Sm^{3+} ionining ${}^6H_{5/2}$ asosiy holatidan yuqori energiyali uyg'ongan sathlarga elektron o'tishlari bilan bog'langan. Shuningdek, 600–620 nm oralig'ida samarali nurlanish chiziqlari aniqlangan bo'lib, ular asosan ${}^4G_{5/2}$ uyg'ongan holatdan $6H_j$ sathlariga qaytish o'tishlari natijasida hosil bo'ladi. Ushbu ishda $\text{Sm}_3\text{Ga}_5\text{O}_{12}$ kristall bo'laklari spektrida 403–416 nm oralig'ida muhim yutilish zonasi kuzatildi. Bu qiymat $\text{Gd}_3\text{Ga}_5\text{O}_{12}:\text{Sm}$ kristallari uchun adabiyotlarda berilgan 405 nm atrofidagi natijalar bilan yaxshi mos keladi. Bu holat ikkala materialda ham Sm^{3+} ionlari o'xshash optik faol markaz sifatida qatnashayotganini ko'rsatadi.

$\text{Sm}_3\text{Ga}_5\text{O}_{12}$ da esa samariy qo'shimcha emas, balki asosiy A-pozitsiya kationidir. Bu degani kristall panjaradagi nodir yer joylarining katta qismi Sm^{3+} ionlari bilan to'lgan bo'ladi. Natijada Sm–Sm ionlari orasidagi masofa kamayadi va ularning o'zaro ta'siri kuchayishi mumkin. Bunday holat quyidagi optik xususiyatlarga ta'sir ko'rsatishi mumkin:

- yutilish zonalarning kengayishi
- spektral chiziqlarning siljishi
- energiya uzatish jarayonlarining kuchayishi
- luminesensiya so'nishining ortishi
- konsentratsion ta'sirlarning paydo bo'lishi

$\text{Y}_3\text{Ga}_5\text{O}_{12}:\text{Sm}$ va $\text{Gd}_3\text{Ga}_5\text{O}_{12}:\text{Sm}$ kabi boshqa galliy granat tizimlari bilan taqqoslaganda $\text{Sm}_3\text{Ga}_5\text{O}_{12}$ ning asosiy farqi nodir yer ionining faqat aktivator emas, balki kristall panjaraning asosiy elementi bo'lishidadir. Shu sababli bu material oddiy legirlangan granatlarga nisbatan yangi va alohida qiziqish uyg'otuvchi tizim hisoblanadi. Umuman olganda, adabiyotlarda keltirilgan $\text{Gd}_3\text{Ga}_5\text{O}_{12}:\text{Sm}$ natijalari ushbu ishda olingan 403–416 nm yutilish zonasi bilan mos keladi. Bu esa $\text{Sm}_3\text{Ga}_5\text{O}_{12}$ kristallining optik faol granat materiali ekanini tasdiqlaydi va uni keyingi luminesensiya, magnitoptik hamda fotonik tadqiqotlar uchun istiqbolli nomzod sifatida ko'rsatadi. Ushbu tadqiqot natijalari $\text{Sm}_3\text{Ga}_5\text{O}_{12}$ kristallining optik faol material sifatida ilmiy va amaliy jihatdan muhim ekanini ko'rsatadi. Optik yutilish spektrda ultrabinafsha, ko'rinuvchi va yaqin infraqizil sohalarda bir nechta xarakterli yutilish zonalarning aniqlanishi materialning keng spektral javobga ega ekanini bildiradi. Ayniqsa 403–416 nm oralig'idagi kuchli yutilish zonasi Sm^{3+} ionlarining faol optik markaz sifatida qatnashayotganini tasdiqlaydi. Bu esa kristallni optoelektronika va fotonika yo'nalishlarida qiziqarli materialga aylantiradi. $\text{Sm}_3\text{Ga}_5\text{O}_{12}$ ning birinchi muhim qo'llanish yo'nalishlaridan biri optik filtrlardir [7]. Ma'lum to'lqin uzunliklarida yutilish zonalari mavjud bo'lgani sababli material tanlab yutuvchi optik element sifatida ishlatilishi mumkin. Ayniqsa, ultrabinafsha va ko'k-binafsha diapazondagi kuchli yutilish uni maxsus spektral filtr tizimlarida qo'llash imkonini beradi. Ikkinchi muhim yo'nalish nodir yer ionlari spektroskopiyasidir. Sm^{3+} ionlari ko'plab energetik sathlarga ega bo'lgani sababli $\text{Sm}_3\text{Ga}_5\text{O}_{12}$ kristalli kristall maydon ta'siri, Stark bo'linish, multiplet tuzilishi va ionlararo ta'sirlarni o'rganish uchun qulay model tizim bo'la oladi. Ayniqsa samariy asosiy panjara elementi bo'lgani sababli bu material oddiy legirlangan kristallardan farqli ilmiy natijalar berishi mumkin. Uchinchi yo'nalish lyuminesent materiallar yaratish bilan bog'liq. Adabiyotlarda Sm^{3+} ionlari odatda sariq, to'q sariq va qizg'ish nurlanish beruvchi ion sifatida ma'lum. Ushbu ishda yutilish zonalarning mavjudligi $\text{Sm}_3\text{Ga}_5\text{O}_{12}$ kristallida ham uyg'otilganda nurlanish jarayonlari yuz berishi mumkinligini ko'rsatadi. Shu sababli keyingi fotoluminesensiya tadqiqotlari ushbu materialni indikatorlar, displey elementlari va yorug'lik chiqaruvchi tizimlar uchun istiqbolli qilishi mumkin. To'rtinchi muhim yo'nalish optik harorat sensorlari yaratishdir. Samariy ionlarining energetik sathlari temperaturaga sezgir bo'lishi mumkin. Nodir yer ionlari saqlovchi ko'plab kristallarda luminesensiya intensivligi va spektr shaklining temperaturaga bog'liqligi aniqlangan. Shu sababli $\text{Sm}_3\text{Ga}_5\text{O}_{12}$ ham kontakt bo'lmagan optik termometriya sohasida tadqiq qilinishi mumkin. Beshinchi yo'nalish fotonik funksional kristallar bilan bog'liq. Galliy granatlar optik shaffoflik, kimyoviy barqarorlik va issiqlikka chidamlilik kabi foydali xossalarga ega. $\text{Sm}_3\text{Ga}_5\text{O}_{12}$ da esa bunga qo'shimcha ravishda nodir yer ionlarining faol spektral markazlari mavjud. Bu holat uni lazer elementlari, optik modulyatorlar, elektromagnit to'lqin uzatgichi va boshqa fotonik qurilmalar uchun qiziqarli materialga aylantiradi. Oltinchi yo'nalish magnitoptik tadqiqotlardir. Granat oilasiga mansub ko'plab kristallar magnit va optik xossalarning birgalikda namoyon bo'lishi bilan mashhur. Samariy elementi o'zining magnit

momentiga ega bo'lgani sababli $\text{Sm}_3\text{Ga}_5\text{O}_{12}$ kristallida magnit maydon ta'sirida optik javob o'zgarishi mumkin. Bu esa Faradey effekti, Kerr effekti va magnit boshqariluvchi optik qurilmalar yo'nalishida ilmiy qiziqish uyg'otadi [9-14].

Xulosa. Ushbu ishda $\text{Sm}_3\text{Ga}_5\text{O}_{12}$ kristall bo'laklarining optik xossalari UB-ko'rish sohasi spektroskopiyasi usuli yordamida 190–1100 nm to'lqin uzunliklari oralig'ida tadqiq qilindi. Olingan spektral ma'lumotlar asosida materialning ultrabinafsha, ko'rinuvchi va yaqin infraqizil sohalarida faol optik javobga ega ekanligi aniqlandi. Bu esa $\text{Sm}_3\text{Ga}_5\text{O}_{12}$ kristallining keng spektral diapazonda yutilish xususiyatlariga ega material ekanini ko'rsatadi. Spektr tahlili natijasida bir nechta xarakterli yutilish zonalari va maksimumlari kuzatildi. Ulardan eng muhimlaridan biri 403–416 nm oralig'ida joylashgan kuchli ko'rinuvchi soha bo'lib, u Sm^{3+} ionlarining ichki elektron o'tishlari bilan bog'landi. Ushbu natija samariy saqlovchi gallyi granatlar bo'yicha adabiyotlarda keltirilgan ma'lumotlar bilan mos keladi va kristallda samariy ionlari optik faol markaz sifatida qatnashayotganini tasdiqlaydi. Kristall bo'laklarining och sariq rangi o'lchangan spektral natijalar bilan mos keladi. Binafsha-ko'k sohaga yaqin to'lqin uzunliklarida yutilish mavjudligi natijasida namuna ko'zga sariq tusda ko'rinishi mumkin. Bu holat tajribaviy kuzatuv va spektr natijalarining bir-birini tasdiqlashini bildiradi. Adabiyotlar bilan solishtirish $\text{Sm}_3\text{Ga}_5\text{O}_{12}$ kristallining $\text{Gd}_3\text{Ga}_5\text{O}_{12}:\text{Sm}$ kabi ma'lum gallyi granat tizimlariga yaqin optik xossalarga ega bo'lishi mumkinligini ko'rsatdi. Biroq $\text{Sm}_3\text{Ga}_5\text{O}_{12}$ da samariy asosiy panjara kationi sifatida qatnashgani sababli ushbu material oddiy legirlangan kristallardan farqli ravishda yangi va qiziqarli fizik xossalarga ega bo'lishi mumkin. Umuman olganda, olingan natijalar $\text{Sm}_3\text{Ga}_5\text{O}_{12}$ ning istiqbolli va hali yetarlicha o'rganilmagan optik granat materiali ekanini ko'rsatadi. Mazkur material kelajakda luminesensiya, fotonika, optik filtrlar, harorat sensorlari, nodir yer spektroskopiyasi hamda magnitoptik tadqiqotlar yo'nalishlarida qo'shimcha ilmiy izlanishlar uchun muhim nomzod bo'lib xizmat qilishi mumkin.

ADABIYOTLAR:

1. Shannon R.D. *Revised effective ionic radii and systematic studies of interatomic distances in halides and chalcogenides*. *Acta Crystallographica Section A*, 1976, 32(5), 751–767.
2. Greber J.F. *Gallium and Gallium Compounds*. *Ullmann's Encyclopedia of Industrial Chemistry*. Wiley-VCH, 2012.
3. Franta D., Mureşan M.G. *Wide spectral range optical characterization of yttrium aluminum garnet (YAG) single crystal by the universal dispersion model*. *Optical Materials Express*, 2021.
4. Kiran Ghimire, Hamna F. Haneef, Robert W. Collins, Nikolas J. Podraza. *Optical properties of single-crystal $\text{Gd}_3\text{Ga}_5\text{O}_{12}$ from the infrared to ultraviolet*. 2015
5. Sharma S.K. et al. *Library of UV-Visible Absorption Spectra of Rare Earth Materials*. *Crystals*, 2020.
6. Low U., Zvyagin S.A., Ozerov M. et al. *Magnetization, Magnetic Susceptibility and ESR in $\text{Tb}_3\text{Ga}_5\text{O}_{12}$* . 2012
7. *Rare-earth gallium garnet ($\text{RE}_3\text{Ga}_5\text{O}_{12}$, RE = Eu, Gd, Dy, Er and Yb) studies and UV-visible characterization*. 2023
8. Geller S. *Crystal chemistry of the garnets*. *Zeitschrift für Kristallographie*, 1967, 125, 1–47.
9. Vojna D., Slezák O., Lucianetti A., Mocek T. *Verdet Constant of Magneto-Active Materials Developed for High-Power Faraday Devices*. *Applied Sciences*, 2019.
10. Hassaan M., Shaheen A., Anwar M.S. *Complete Stokes polarimetry of magneto-optical Faraday effect in a terbium gallium garnet crystal at cryogenic temperatures*. *Optics Express*, 2013.
11. Milanese C., Buscaglia V., Maglia F., Anselmi-Tamburini U. *Disorder and Nonstoichiometry in Synthetic Garnets $\text{A}_3\text{B}_5\text{O}_{12}$ (A = Y, Lu–La; B = Al, Fe, Ga): A Simulation Study*. *Chemistry of Materials*, 2004, 16(7), 1232–1239. DOI: 10.1021/cm031138u
12. Butkutė S. *Rare-earth gallium garnet single crystals and solid solutions*. Vilnius University dissertation, 2018.
13. Kruglyak V.V., Demokritov S.O., Grundler D. *Magnonics*. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2010, 43, 264001.
14. Lenk B., Ulrichs H., Garbs F., Münzenberg M. *The building blocks of magnonics*. *Physics Reports*, 2011, 507, 107–136.

**GRAFIKLARDAGI DISKRET NOLOKAL CHIZIQLI BO'LMAGAN SHREDINGER
TENGLAMASI: DISKRET TARMOQLARDA PT-SIMMETRIK SOLITONLARNING
DINAMIKASI**

Akramov Mashrab Ergashaliyevich,

*Mirzo Ulug'bek nomidagi O'zbekiston Milliy universiteti dotsenti,
fizika-matematika fanlari bo'yicha falsafa doktori (PhD)*

Xashimova Feruza Saydovna,

*Navoiy davlat konchilik va texnologiyalar universiteti katta o'qituvchisi
feruzaxashimova18@gmail.com*

Annotatsiya. Ushbu ishda Ablowitz va Musslimani tomonidan avvalroq taklif etilgan diskret nolokal chiziqli bo'lmagan Shredinger tenglamasi diskret bog'lanishli graflar ko'rinishidagi tarmoqlangan 1D panjarada ko'rib chiqiladi. Asosiy e'tibor PT-simmetriyaga ega tizimlarda soliton yechimlarning mavjudligi, ularning barqarorligi va dinamikasini o'rganishga qaratilgan. Ba'zi eng sodda (yulduzsimon va daraxtsimon) graflar uchun soliton yechimlari olingan. Analitik yechimga ega bo'lmagan holatlar uchun sonli yechimlar hisoblab chiqilgan. Tizimning integrallanuvchanligi cheksiz ko'p saqlanish qonunlarining mavjudligi orqali isbotlanadi, bu esa diskret nochiziqli muhitlarda to'lqin jarayonlarining fundamental xususiyatlarini ochib betilgan. Olingan natijalar diskret nochiziqli tizimlarda to'lqinlar tarqalishini chuqurroq tushunishga xizmat qiladi.

Kalit so'zlar: PT-simmetrik solitonlar, diskret nolokal chiziqli bo'lmagan Shredinger tenglamasi, solitonlar ko'chishi (transporti), tarmoqlardagi solitonlar, graflar nazariyasi, tarmoqlangan panjaralar, integrallanuvchanlik, sonli modellashtirish, to'lqin dinamikasi.

**НЕЛОКАЛЬНОЕ НЕЛИНЕЙНОЕ ДИСКРЕТНОЕ УРАВНЕНИЕ ШРЁДИНГЕРА НА
ГРАФАХ: ДИНАМИКА РТ-СИММЕТРИЧНЫХ СОЛИТОНОВ В ДИСКРЕТНЫХ СЕТЯХ**

Аннотация. В данной работе рассматривается ранее предложенное Абловицем и Муслимани дискретное нелокальное нелинейное уравнение Шрёдингера на разветвлённой одномерной решётке, представленной в виде дискретно связанных графов. Основное внимание уделено исследованию существования, устойчивости и динамики солитонных решений в РТ-симметричных системах. Для некоторых простейших графов (звездообразных и древовидных) получены аналитические солитонные решения. В случаях, не допускающих аналитического решения, вычислены численные решения. Интегрируемость системы доказывается наличием бесконечного числа законов сохранения, что раскрывает фундаментальные свойства волновых процессов в дискретных нелинейных средах. Полученные результаты способствуют более глубокому пониманию распространения волн в дискретных нелинейных системах.

Ключевые слова: РТ-симметричные солитоны, дискретное нелокальное нелинейное уравнение Шрёдингера, перенос солитонов, солитоны в сетях, теория графов, разветвлённые решётки, интегрируемость, численное моделирование, волновая динамика.

**NONLOCAL DISCRETE NONLINEAR SCHRÖDINGER EQUATION ON GRAPHS:
DYNAMICS OF PT-SYMMETRIC SOLITONS IN DISCRETE NETWORKS**

Abstract. In this work, we consider the previously proposed Ablowitz and Musslimani discrete nonlocal nonlinear Schrödinger equation on a branched one-dimensional lattice represented as discretely connected graphs. The main focus is on the existence, stability, and dynamics of soliton solutions in PT-symmetric systems. Soliton solutions are obtained for some simplest graphs (star and tree graphs). For cases where analytical solutions are not available, numerical solutions are computed. The integrability of the system is demonstrated through the existence of an infinite number of conservation laws, revealing fundamental properties of wave processes in discrete nonlinear media. The obtained results contribute to a deeper understanding of wave propagation in discrete nonlinear systems.

Keywords: *PT-symmetric solitons, discrete nonlocal nonlinear Schrödinger equation, soliton transport, solitons in networks, graph theory, branched lattices, integrability, numerical modeling, wave dynamics.*

Kirish. PT-simmetrik nolokal chiziqli bo‘lmagan Shredinger tenglamasi (NNLS) ilk bor Ablovits va Musslimani tomonidan [1] ishda kiritilgan. NNLS tenglamasining diqqatga sazovor xususiyati shundaki, u cheksiz ko‘p saqlanish miqdorlariga va teskari sochilish usuli yordamida olinishi mumkin bo‘lgan aniq soliton yechimlariga ega. So‘nggi bir necha yil ichida [1–15] manbalarda NNLS tenglamasining integrallanuvchanligi, turli soliton yechimlari, ularning xossalari va boshqa ba‘zi o‘ziga xosliklari ko‘rib chiqilgan. Keyinchalik, [2] manbada NNLS tenglamasining diskret varianti kiritildi. Ablovits-Ladik tenglamasiga o‘xshash tarzda, uning ham integrallanuvchanligi va soliton yechimlariga ega ekanligi ko‘rsatildi. Diskret chiziqli bo‘lmagan Shredinger tenglamalari optik to‘lqin uzatgichlar majmuasidagi [18], Toda panjaralaridagi [19], Xirota chiziqli bo‘lmagan tarmoqlaridagi [20] va boshqa tizimlardagi to‘lqinlar solitonlarning tarqalishini tavsiflaydi. Diskret nolokal chiziqli bo‘lmagan Shredinger tenglamasini (DNNLS) eksperimental amalga oshirish uchun boshqa modellar ferromagnit materiallar bilan bog‘liq. Yaqinda DNNLS tenglamasining Landau-Lifshits bog‘langan tenglamalarining noodatiy tizimiga kalibrlash ekvivalentligi ko‘rsatildi [21]. Landau-Lifshits-Gilbert bog‘langan tenglamalari bilan tavsiflangan matematik model taqdim etildi, bu yerda qo‘shimcha dissipativ Gilbert hadi kuchaytirish-yo‘qotish (gain-loss) prinsipini amalga oshirish uchun qo‘llaniladi. Bunday model ferromagnit strukturalarda DNNLS tenglamasi bilan tavsiflanuvchi PT-simmetrik tizimni amalga oshirish imkonini beradi. [22] manbada DNNLS tenglamasining ferromagnitlar uchun Geyzenberg tenglamasiga kalibrlash ekvivalentligi ko‘rsatilgan. [22] ishda taqdim etilgan model ferromagnit materiallarda DNNLS tenglamasi orqali ifodalanuvchi PT-simmetrik tizimlarni amalga oshirish mumkinligining qo‘shimcha tasdig‘i sifatida qaralishi mumkin. NNLS diskret tenglamasining turli talqinlari va boshqa diskret nolokal evolyutsion tenglamalar [23–28] manbalarda ko‘rib chiqilgan.

Ushbu maqolada biz [2, 12] manbalardagi tadqiqotlarni metrik graflar ko‘rinishida modellashtirilgan tarmoqlangan 1D sohalar holatiga tatbiq etamiz. Metrik grafni ma‘lum bir qoida asosida bir-biri bilan bog‘langan bog‘lamalar to‘plami sifatida aniqlash mumkin. Metrik graflarda PT-simmetrik diskret nolokal chiziqli bo‘lmagan Shredinger tenglamasi muammosini, asosiy e‘tiborni aniq (soliton) yechimlar va solitonlar dinamikasiga qaratgan holda ko‘rib chiqamiz. Tarmoqlarda va tarmoqlangan tuzilmalarda solitonlar dinamikasini o‘rganishga bo‘lgan qiziqish, bunday tizimlarda to‘lqin dinamikasining boyroq va osonroq boshqariluvchan ekanligi bilan bog‘liq. Masalan, tarmoq arxitekturasini yoki qaytish, uzatish va tugunlarni (uchlarni) sozlash orqali to‘lqin uzatishning zaruriy rejimiga erishish mumkin. Tarmoqlarda solitonlar dinamikasini modellashtirish bilan bog‘liq yana bir muhim masala shundaki, amaliy tadbirlarda (masalan, optika va optoelektronikada) signal uzatish uchun ko‘pincha optik tolali tarmoqlardan foydalaniladi. Shu sababli, optik tarmoqlarda solitonlarning tarqalishini o‘rganish signal uzatilishini boshqarish, signal yo‘qotilishini kamaytirish va optoelektronik qurilmalarni optimallashtirish nuqtayi nazaridan muhim ahamiyatga ega. Tarmoqlardagi chiziqli bo‘lmagan evolyutsion tenglamalarning turli jihatlari [31–35] manbalarda ko‘rib chiqilgan. Biz taklif qilayotgan model diskret optik to‘lqin uzatgichlar majmuasida, Toda panjaralarida va o‘z-o‘zidan induksiyalangan PT-simmetrik nochiziqlikka ega bo‘lgan Xirota chiziqli bo‘lmagan tarmog‘ida solitonlarning tarqalishini tavsiflaydi. Maqolada [2] manbaga muvofiq chiziqdagi DNNLS tenglamasi qisqacha eslatib o‘tiladi, masalaning qo‘yilishi va yechimi, jumladan, analitik yechimlar, sonli yechimlar va diskret yulduzsimon tarmoqlangan tarmoq uchun masalaning integrallanuvchanligi keltiriladi. Biz tadqiqotni daraxtsimon tarmoqlarga tatbiq etamiz.

To‘g‘ri chiziqdagi diskret nolokal chiziqli bo‘lmagan Shredinger tenglamasi. Ablovits-Musslimani nolokal chiziqli bo‘lmagan Shredinger tenglamasining diskret varianti [2] manbaga muvofiq quyidagicha yozilishi mumkin:

$$i \frac{dQ_n}{dt} = Q_{n+1} - 2Q_n + Q_{n-1} + Q_n Q_{-n}^* (Q_{n+1} + Q_{n-1}), \quad (1)$$

bu yerda n — butun son $n \in (-\infty, +\infty)$. Ushbu tenglamani klassik diskret chiziqli bo‘lmagan Shredinger tenglamasining [33, 34] PT-simmetrik, nolokal analogi, ya‘ni yaxshi ma‘lum bo‘lgan Ablovits-Ladik sochilish masalasining yangi va soddaga keltirilmasi deb hisoblash mumkin. (1)-tenglamaning integrallanuvchanligi va soliton yechimlari [2]-ishda o‘rganilgan. Xususan, asimptotik shartni qanoatlantiruvchi (1)-tenglamaning bir solitonli yechimi teskari sochilish usuli yordamida olinishi mumkin va u quyidagicha ko‘rinishga ega:

$$Q_n(t) = -\frac{(z_1 \bar{z}_1)^{-1} (z_1^2 - \bar{z}_1^{-2}) e^{i\bar{\varphi}_1} e^{-2i\bar{\omega}_1 t} z_1^{-2n}}{1 + e^{i(\varphi_1 + \bar{\varphi}_1)} e^{2i(\omega_1 - \bar{\omega}_1)t} z_1^{-2n} z_1^{-2n}} \quad (2)$$

bu erda, a $z_1 > 0$, $0 < \bar{z}_1 < 1$, $\omega_1 = (z_1 - z_1^{-1})/2$, $\bar{\omega}_1 = (\bar{z}_1 - \bar{z}_1^{-1})/2$ va $\varphi_1, \bar{\varphi}_1$ ixtiyoriy konstantalar (o'zgarmlar). (2)-tenglama bilan berilgan yechim nafas oluvchi (brezer) solitonni ifodalaydi [2]. Boshqa bir solitonli yechim [16]-manbada olingan bo'lib, u quyidagicha beriladi:

$$Q_n(t) = \frac{\varepsilon e^{Kn + \omega t}}{1 + \varepsilon^2 \theta e^{(K - K^*)n + (\omega + \omega^*)t}} \quad (3)$$

bu yerda $\omega = -2i(\cosh K - 1)$, $\theta = \frac{1}{4} \sinh^{-2} \frac{K - K^*}{2}$ va ε, K – o'zgarmlar sonlar.

Soliton yechimining uchinchi turi [17]-manbada bilinearlashtirish-reduksiya yondashuvi yordamida keltirib chiqarilgan bo'lib, u quyidagicha yozilishi mumkin:

$$Q_n(t) = \frac{e^{2k_1} - e^{-2k_1^*}}{e^{k_1 + k_1^*} (e^{-2k_1 n + 2i\xi_1 t} - e^{-2k_1^* n + 2i\xi_1^* t})}, \quad (4)$$

bu erda $\xi_1 = (e^{2k_1} - 2 + e^{-2k_1})/2$ va k_1 – o'zgarmlar sonlar.

Cheksiz ko'p miqdordagi saqlanish kattaliklari mavjudligi ham [2] manbada ko'rsatilgan. Ularning dastlabki bir nechtasini quyidagicha yozish mumkin:

$$C_1 = -\sum_{n=-\infty}^{+\infty} Q_n Q_{1-n}^*, \quad (5)$$

$$C_2 = -\sum_{n=-\infty}^{+\infty} \left[Q_n Q_{2-n}^* + \frac{1}{2} (Q_n Q_{1-n}^*)^2 \right], \quad (6)$$

$$C_3 = \prod_{n=-\infty}^{+\infty} (Q_n Q_{1-n}^*). \quad (7)$$

(1)-tenglama, shuningdek, gamiltonianni saqlanuvchi miqdor sifatida va quyidagi ifodalar bilan beriladigan nokanonik qavslarni qabul qiladi:

$$H = \sum_{n=-\infty}^{+\infty} [Q_{-n}^* (Q_{n+1} + Q_{n-1}) - 2 \log(1 + Q_n Q_{1-n}^*)], \quad (8)$$

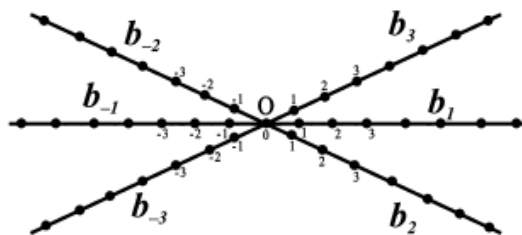
$$\{Q_m, Q_{-n}^*\} = -(1 + Q_n Q_{-n}^*) \delta_{n,m}, \quad (9)$$

$$\{Q_m, Q_{-n}^*\} = \{Q_{-n}^*, Q_{-m}^*\} = 0. \quad (10)$$

Oxirgi tenglamalardan foydalangan holda, (1)-tenglamani quyidagi ko'rinishda yozish mumkin:

$$i \frac{dQ_n}{dt} = \{Q_n, H\}. \quad (11)$$

Ablovits va Musslimani tomonidan [2] da o'rganilgan masala, diskret metrik graflar ko'rinishida modellashtirilgan tarmoqlangan panjaralar holati uchun kengaytiriladi. Bu esa ushbu panjaralarda [2] dagi yechimdan foydalangan holda DNNLS (diskret nolokal noli chiziqli Shryodinger) tenglamasining soliton yechimlarini olish imkonini beradi.



1-rasm. Oltita diskret bog'lanishli yulduzsimon grafigi

Diskret yulduzsimon tarmoqlarda (star-shaped network) PT-simmetrik nolokal solitonlar. To‘g‘ri chiziqdagi DNNLS tenglamasi diskret bog‘lanishli graflar ko‘rinishida modellashtirilgan tarmoqlangan kvazi bir-o‘lchamli sohalar holatiga kengaytirilishi mumkin. Bunday masalani ko‘rib chiqish mumkin bo‘lgan eng sodda grafigi – bitta tugunda birlashtirilgan oltita diskret bog‘lanishga ega bo‘lib, u yulduzsimon grafik deb ataladi (1-rasm). U oltita tarmoqdan (yelkadan) iborat tarmoqlangan 1D panjarani ifodalaydi. Grafdagi panjaraning alohida tugunlari $(\pm j, n)$ deb belgilanadi, bu yerda $(j = 1, 2, 3)$ — bog‘lanish (aloqa) tartib raqami, esa har bir bog‘lanishdagi panjara tuguniga mos keladi. Metrik graflar terminologiyasidan foydalangan holda, tarmoqlanish 0 nuqtasida joylashgan oddiy tarmoqlangan tugundan iborat grafik uchini (vershinasi) aniqlash mumkin (1-rasm). Chap tomondagi $(-j)$ bog‘lanishlar uchun $n \in b_{-j} = \{0, -1, -2, \dots\}$, bu yerda $(-j, 0)$ tarmoqlanish nuqtasini anglatadi. O‘ng tomondagi (j) bog‘lanishlar uchun $n \in b_j = \{1, -2, 3, \dots\}$, bu yerda $(j, 1)$ uchga (vershinaga) eng yaqin nuqtalarni anglatadi.

Bu yerda biz 1-rasmda tasvirlangan yulduzsimon grafnig har bir bog‘lanishida quyidagi DNNLS tenglamasini ko‘rib chiqamiz:

$$i \frac{dQ_{\pm j, n}}{dt} = Q_{\pm j, n+1} - 2Q_{\pm j, n} + Q_{\pm j, n-1} + \sqrt{\beta_j \beta_{-j}} Q_{\pm j, n} Q_{\pm j, -n}^* (Q_{\pm j, n+1} + Q_{\pm j, n-1}), \quad (12)$$

bu yerda $\beta_{\pm j}$ — nochiziqlilik koeffitsiyentlari, esa $(\pm j, n) \notin \{(-j, 0), (j, 1)\}$. Bunday sohadagi NNLS tenglamasining kontinual versiyasi yaqinda [35]-manbada batafsil o‘rganilgan. Shuni ta’kidlash joizki, [30]-manbada ko‘rib chiqilgan uning lokal analogidan farqli o‘laroq, (12)-tenglama bilan berilgan metrik yulduzsimon grafdagi NNLS tenglamasi simmetrik komponentlar o‘rtasida bog‘liqlik yuzaga keladigan tenglamalar sistemasini ifodalaydi (shuningdek, [35]-manbaga qarang). Bundan tashqari, nolokalligi sababli, u koordinata boshiga nisbatan simmetrik joylashgan juft sondagi bog‘lanishlarga ega bo‘lgan grafda yozilishi mumkin. Biz (12)-tenglama uchun quyidagi asimptotik shartni qo‘yamiz: $\lim_{n \rightarrow -\infty} Q_{-j, n} \rightarrow 0$ va $\lim_{n \rightarrow +\infty} Q_{j, n} \rightarrow 0$. Biz graf uchida (vershinada) va uchga yaqin tugunlarda chegaraviy shartlarni o‘rnatamiz. Kontinual NNLS tenglamasi uchun chegaraviy shartlar energiya va norma saqlanish qonunlaridan olinadi [35]. Graflardagi diskret evolyutsion tenglamalar uchun esa [30]-manbaga asoslanib, Ablovits-Ladik yondashuvi yordamida virtual tugunlardagi (12)-tenglamani harakat tenglamasidan hosil qilish mumkin. Kontinuall NNLS tenglamasi uchun chegaraviy shartlar energiya va norma saqlanish qonunlaridan olinishi mumkin [35]. Graflardagi diskret evolyutsion tenglamalar uchun [30] manbasiga asoslanib, solitonlar dinamikasi graf tugunlari $(-j, 1)$, $(j, 0)$ atrofida tadqiq etiladi. [30]-manbada ko‘rib chiqilgan metrik graflardagi Ablovits-Ladik tenglamasi uchun qo‘llanilgan yondashuvdan foydalanib, $(-j, 1)$, $(j, 0)$ virtual tugunlarida (12)-tenglamani quyidagi harakat tenglamasidan keltirib chiqarish mumkinligini ko‘rsatish mumkin:

$$i \frac{dQ_{\pm j, n}}{dt} = \{Q_{\pm j, n}, H\} \quad (13)$$

bu yerda $(\pm j, n) \notin \{(-j, 0), (j, 1)\}$. Bu yerda nokanonik Puasson qavslari quyidagicha aniqlanadi [30]:

$$\begin{aligned} \{Q_{\pm j, m}, Q_{\pm j', -n}\} &= -i(1 + \sqrt{\beta_j \beta_{-j}} Q_{\pm j, n} Q_{\pm j, -n}^*) \delta_{jj'} \delta_{nm}, \\ \{Q_{\pm j, n}, Q_{\pm j', m}\} &= \{Q_{\pm j, -n}^*, Q_{\pm j', -m}\} = 0, \end{aligned} \quad (14)$$

esa quyidagi ifoda bilan berilgan DNNLS tenglamasi uchun gamiltoniandir:

$$\begin{aligned} H &= \sum_{j=1}^3 \left[\sum_{n=0}^{-\infty} \left(Q_{j, n}^* (Q_{-j, n+1} + Q_{-j, n-1}) - \frac{2}{\sqrt{\beta_j \beta_{-j}}} \log(1 + \sqrt{\beta_j \beta_{-j}} Q_{-j, n} Q_{-j, -n}^*) \right) \right. \\ &\left. + \sum_{n=1}^{+\infty} \left(Q_{-j, -n}^* (Q_{j, n+1} + Q_{j, n-1}) - \frac{2}{\sqrt{\beta_j \beta_{-j}}} \log(1 + \sqrt{\beta_j \beta_{-j}} Q_{j, n} Q_{-j, -n}^*) \right) \right], \end{aligned} \quad (15)$$

bu yerda [30] havoladan keyingi $(-j,1)$, $(j,0)$, tugunlarda biz quyidagi munosabatlarni taxmin qildik:

$$\begin{aligned} Q_{-j,1} &= \alpha_1^{(-j)} Q_{1,1} + \alpha_2^{(-j)} Q_{2,1} + \alpha_3^{(-j)} Q_{3,1}, \\ Q_{j,1} &= \alpha_{-1}^{(j)} Q_{-1,1} + \alpha_{-2}^{(j)} Q_{-2,0} + \alpha_{-3}^{(j)} Q_{-3,0} \end{aligned} \quad (16)$$

$\alpha_{(\pm j)}$ mos keladigan koeffitsiyentlar bilan. (16) tenglama "uchi"dagi chegara shartlarini ifodalaydi, ular [35] da ko'rib chiqilgan muammomizning uzluksiz analogi holatida qo'llanilishi kerak bo'lgan "uchidagi" chegara shartlarining diskret analoglaridir. Uzluksiz holatdan farqli o'laroq, diskret grafik uchun "tepalik" tuguniga "tepalik" chegara shartlarini qo'yish kerak.

Aniq qilib aytganda, $(-j,0)$, $(j,1)$, tugunlardagi (13) tenglama mos ravishda quyidagicha yozilishi mumkin:

$$\begin{aligned} i \frac{dQ_{-j,0}}{dt} &= \alpha_1^{(-j)} Q_{1,1} + \alpha_2^{(-j)} Q_{2,1} + \alpha_3^{(-j)} Q_{3,1} - 2Q_{-j,0} + Q_{-j,-1} \\ &+ \sqrt{\beta_j \beta_{-j}} Q_{-j,0} \left(\alpha_{-1}^{(j)} Q_{-1,0}^* + \alpha_{-2}^{(j)} Q_{-2,0}^* + \alpha_{-3}^{(j)} Q_{-3,0}^* \right) \left(\alpha_1^{(-j)} Q_{1,1} + \alpha_2^{(-j)} Q_{2,1} + \alpha_3^{(-j)} Q_{3,1} + Q_{-j,-1} \right), \end{aligned} \quad (17)$$

$$\begin{aligned} i \frac{dQ_{-j,1}}{dt} &= Q_{j,2} - 2Q_{j,1} + \alpha_{-1}^{(j)} Q_{-1,0} + \alpha_{-2}^{(j)} Q_{-2,0} + \alpha_{-3}^{(j)} Q_{-3,0} + \\ &\sqrt{\beta_j \beta_{-j}} Q_{j,1} Q_{-j,1}^* \left(Q_{j,2} + \alpha_{-1}^{(j)} Q_{-1,0} + \alpha_{-2}^{(j)} Q_{-2,0} + \alpha_{-3}^{(j)} Q_{-3,0} \right). \end{aligned} \quad (18)$$

Bundan tashqari, biz 1-rasmda ko'rsatilgan yulduz grafigidagi DNNLS tenglamasining (12) soliton yechimi ifoda bilan berilgan deb taxmin qilamiz.

$$Q_{\pm j,n}(t) = \frac{1}{\sqrt{\beta_{\pm j}}} Q_n(t), \quad (19a)$$

bu yerda $Q_n(t)$ - (1) tenglama bilan berilgan diskret chiziqdagi (ya'ni, cheksiz zanjirdagi) DNNLS tenglamasining soliton yechimi. (2) tenglamani (19a) tenglamaga qo'yib, yulduz grafigidagi DNNLS tenglamasining soliton yechimi quyidagi shaklga ega ekanligini ko'rsatish mumkin:

$$Q_{\pm j,n}(t) = -\frac{1}{\sqrt{\beta_{\pm j}}} \frac{(z_1 \bar{z}_1)^{-1} (z_1^2 - \bar{z}_1^2) e^{i\bar{\varphi}_1} e^{-2i\bar{\omega}_1 t} \bar{z}_1^{2n}}{1 + e^{i(\varphi_1 + \bar{\varphi}_1)} e^{2i(\omega_1 - \bar{\omega}_1)t} z_1^{-2n} \bar{z}_1^{2n}}. \quad (19b)$$

(1), (17), (18) tenglamalarni taqqoslash va (19a) tenglamadan foydalanib, $\alpha_{\pm k}^{(\pm j)}$ va $\beta_{\pm j}$ koeffitsiyentlari orasidagi ikkita bog'liqlikni topish mumkin:

Birinchi ifoda

$$\alpha_{\pm k}^{(\pm j)} = \frac{1}{3} \sqrt{\frac{\beta_{\pm k}}{\beta_{\pm j}}}, \quad (20)$$

va ikkinchi tanlov

$$\alpha_{\pm k}^{(\pm j)} = \frac{1}{\sqrt{\beta_{\pm j} \beta_{\pm k}} \left(\frac{1}{\beta_{\pm 1}} + \frac{1}{\beta_{\pm 2}} + \frac{1}{\beta_{\pm 3}} \right)}, \quad (21)$$

bu yerda $k = 1, 2, 3$.

tenglamani (16) tenglamaga qo'yib, cho'qqida quyidagi "kvazichegara" shartlarini olishimiz mumkin:

$$\begin{aligned} \sqrt{\beta_{-1}} Q_{-1,1} &= \sqrt{\beta_{-2}} Q_{-2,1} = \sqrt{\beta_{-3}} Q_{-3,1}, \\ \frac{Q_{-1,1}}{\sqrt{\beta_{-1}}} + \frac{Q_{-2,1}}{\sqrt{\beta_{-2}}} + \frac{Q_{-3,1}}{\sqrt{\beta_{-3}}} &= \frac{Q_{1,1}}{\sqrt{\beta_1}} + \frac{Q_{2,1}}{\sqrt{\beta_2}} + \frac{Q_{3,1}}{\sqrt{\beta_3}} \end{aligned} \quad (22)$$

$$\text{Va } \sqrt{\beta_1} Q_{1,0} = \sqrt{\beta_2} Q_{2,0} = \sqrt{\beta_3} Q_{3,0},$$

$$\frac{Q_{1,0}}{\sqrt{\beta_1}} + \frac{Q_{2,0}}{\sqrt{\beta_2}} + \frac{Q_{3,0}}{\sqrt{\beta_3}} = \frac{Q_{-1,0}}{\sqrt{\beta_{-1}}} + \frac{Q_{-2,0}}{\sqrt{\beta_{-2}}} + \frac{Q_{-3,0}}{\sqrt{\beta_{-3}}}. \quad (23)$$

Bu kvazichegaraviy shartlar (19a) yechimlar bilan qondiriladi, agar chiziqli bo'lmaganlik koeffitsiyentlari ifoda bilan berilgan cheklovlarni qondirsa.

$$\frac{1}{\beta_{-1}} + \frac{1}{\beta_{-2}} + \frac{1}{\beta_{-3}} = \frac{1}{\beta_1} + \frac{1}{\beta_2} + \frac{1}{\beta_3}. \quad (24)$$

E'tibor bering, (24) tenglamadagi yig'indi qoidasi (19a) tenglama bilan berilgan funksiya (12), (22) va (23) tenglamalar bilan berilgan grafikdagi DNNLS tenglamasining yechimi ekanligini ta'minlaydi. Boshqacha qilib aytganda, $\beta_{\pm j}$ nochiziqli koeffitsiyentlari (24) tenglamadagi yig'indi qoidasini qanoatlantirgan holda, (19a) tenglama bilan berilgan shaklda ifodalangan (1) tenglamaning yechimi (12), (22) va (23) tenglamalar bilan berilgan grafikdagi DNNLS tenglamasining yechimi bo'ladi. Shuni ham ta'kidlash kerakki, (24) tenglamadagi yig'indi qoidasi birinchi tanlovga, ya'ni (21) tenglamaga asoslangan, garchi ikkala tanlov ham muammoning integrallanishini ta'minlasa ham. Biroq birinchi tanlovdan farqli o'laroq, ikkinchi tanlov bizga $\beta_{\pm j}$ nochiziqli koeffitsiyentlari nuqtayi nazaridan integrallanishga cheklovlarni olish imkonini beradi.

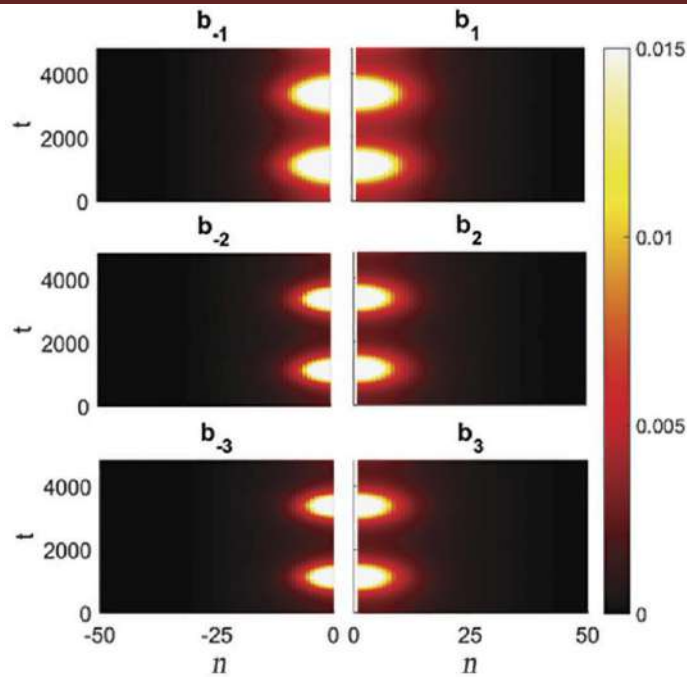
Sonli natijalar. Yulduz grafigidagi DNNLS tenglamasining “tebranma soliton (breathing soliton)” yechimi (19a) tenglama bilan berilgan yechim (24) tenglama bilan belgilangan cheklovlarga bo'ysunib, (22) va (23) cho'qqi chegara shartlarini qondiradigan (12) tenglamaning soliton yechimidir. Boshqacha qilib aytganda, (12), (22) va (23) tenglamalar bilan aniqlangan masalaning aniq soliton yechimi faqat (24) tenglamadagi yig'indi qoidasini qondiradigan λ qiymatlari uchun yozilishi mumkin.

Umumiy holatda, yig'indi qoidasi qondirilmaganda, (12) tenglama sonli tarzda yechilishi kerak. 2-rasmda (22) va (23) tenglamalar bilan belgilangan kvazichegara shartlari uchun (12) tenglamaning (nafas olish) soliton yechimining kontur grafigi ko'rsatilgan. Grafik (24) yig'indi qoidasini qondiradigan parametr qiymatlari uchun $\beta_{-1} = 1, \beta_1 = 1.15, \beta_{-2} = 2.19, \beta_2 = 1.92, \beta_{-3} = 2.42, \beta_3 = 2.09$, analitik formula (19a) yordamida olingan. 3-rasmda (24) tenglama bilan aniqlangan yig'indi qoidasi bajarilgan holat uchun (12) grafigidagi DNNLS tenglamasining sonli olingan harakatlanuvchi to'lqin yechimlari ko'rsatilgan. Ushbu grafikdan ko'rinib turibdiki, solitonning cho'qqi orqali o'tishi aks ettirishsiz sodir bo'ladi, 4-rasmdan farqli o'laroq, bu yerda $\beta_{\pm j}$ sonli olingan harakatlanuvchi to'lqin yechimlari (24) cheklovini qondirmaydigan qiymatlar uchun chizilgan. Solitonning tarmoqlanish sohasidagi aksi bu grafiklardan aniq ko'rinadi.

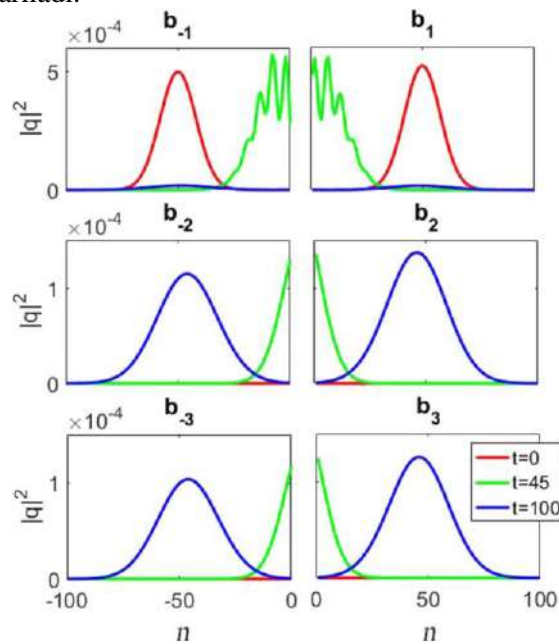
(12) tenglamaning sonli yechimida boshlang'ich shartlar ulanishlar bo'yicha b_{-1} va b_1 ifoda bilan berilgan Gauss to'lqin paketi shaklida tanlanadi.

$$Q_{\pm 1, n} = \frac{A}{\sqrt{\beta_{\pm 1}} \sigma \sqrt{2\pi}} \exp \left[\pm ik_0 n - \left(\frac{n - N_{\pm}}{2\sigma^2} \right)^2 \right], \quad (25)$$

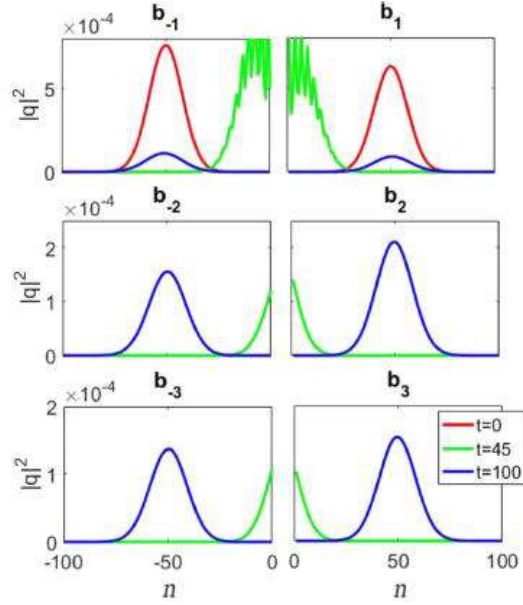
bu yerda $A = 0.1, k_0 = 1, \sigma = 8$ va $N_{\pm} = \pm 50$ konstantalar.



2-rasm. (19a) tenglama bilan berilgan metrik yulduzcha grafigida DNNLS (12) tenglamasining tebranma soliton(breathing soliton)ining yechimining kontur grafigi. Nochiziqlilik koeffitsiyentlari quyidagicha tanlangan: $\beta_{-1} = 1, \beta_1 = 1.15, \beta_{-2} = 1.92, \beta_2 = 1.92, \beta_{-3} = 2.42, \beta_3 = 2.09$, ya'ni (24) tenglamadagi yig'indi qoidasi bajariladi.



3-rasm. (24) yig'indi qoidasi bajarilganda yulduz grafigidagi DNNLS tenglamasining harakatlanuvchi to'lqin shaklida sonli olingan yechim. Nochiziqlilik koeffitsiyentlari quyidagicha tanlanadi: $\beta_{-1} = 1, \beta_1 = 1.15, \beta_{-2} = 2.19, \beta_2 = 1.92, \beta_{-3} = 2.42, \beta_3 = 2.09$. Boshlang'ich shartlar ikkita simmetrik ulanish uchun berilgan b_{-1} va b_1 .



4-rasm. (24) yig'indi qoidasi buzilganda yulduz grafigidagi DNNLS tenglamasining harakatlanuvchi to'lqin shaklida sonli olingan yechim. Nochiziqilik koeffitsiyentlari quyidagicha tanlanadi: $\beta_{-1} = 0,65$, $\beta_1 = 0,79$, $\beta_{-2} = 2.7$, $\beta_2 = 2.09$, $\beta_{-3} = 3.06$, $\beta_3 = 2.87$. Boshlang'ich shartlar ikkita simmetrik ulanish uchun berilgan b_{-1} va b_1 .

Saqlanish qonunlari va integrallanuvchanlik. Integratsiya, ya'ni yulduz grafigidagi DNNLS tenglamasi uchun cheksiz konservativ miqdorlar to'plamining mavjudligi, (2) da bajarilganidek, xuddi shunday isbotlanishi mumkin. Shunga o'xshash vaziyat grafigidagi DNNLS tenglamasi uchun ham mumkin. (12) tenglama uchun fundamental konservativ miqdorlar va energiya (1-rasm. yulduz grafigi uchun) mos ravishda quyidagicha yozilishi mumkin.

$$C_1 = -\sum_{j=1}^3 \left[\sum_{n=0}^{-\infty} Q_{-j,n} Q_{j,1-n}^* + \sum_{n=1}^{+\infty} Q_{j,n} Q_{-j,1-n}^* \right], \quad (26)$$

$$C_2 = -\sum_{j=1}^3 \left[\sum_{n=0}^{-\infty} \left(Q_{-j,n} Q_{j,2-n} + \frac{\sqrt{\beta_{-j}\beta_j}}{2} (Q_{-j,n} Q_{j,1-n}^*)^2 \right) + \sum_{n=1}^{+\infty} \left(Q_{j,n} Q_{-j,2-n} + \frac{\sqrt{\beta_{-j}\beta_j}}{2} (Q_{j,n} Q_{-j,1-n}^*)^2 \right) \right], \quad (27)$$

$$C_3 = \prod_{j=1}^3 \left[\prod_{n=0}^{-\infty} (1 + \sqrt{\beta_{-j}\beta_j} Q_{-j,n} Q_{j,-n}^*) \cdot \prod_{n=1}^{+\infty} (1 + \sqrt{\beta_{-j}\beta_j} Q_{j,n} Q_{-j,n}^*) \right]. \quad (28)$$

$$E = \sum_{j=1}^3 \left[\sum_{n=1}^{-\infty} \left(Q_{j,-n}^* (Q_{-j,n+1} + Q_{-j,n-1}) - \frac{2}{\sqrt{\beta_j\beta_{-j}}} \log(1 + \sqrt{\beta_j\beta_{-j}} Q_{-j,n} Q_{j,-n}^*) \right) + \sum_{n=2}^{+\infty} \left(Q_{-j,-n}^* (Q_{j,n+1} + Q_{j,n-1}) - \frac{2}{\sqrt{\beta_j\beta_{-j}}} \log(1 + \sqrt{\beta_j\beta_{-j}} Q_{j,n} Q_{-j,-n}^*) \right) + (\alpha_{-1}^{(j)} Q_{-1,0}^* + \alpha_{-1}^{(j)} Q_{-2,0}^* + \alpha_{-3}^{(j)} Q_{-3,0}^*) (\alpha_1^{(-j)} Q_{1,1} + \alpha_2^{(-j)} Q_{2,1} + \alpha_3^{(-j)} Q_{3,1} + Q_{-j,-1}) - \frac{2}{\sqrt{\beta_j\beta_{-j}}} \log(1 + \sqrt{\beta_j\beta_{-j}} Q_{-j,0} (\alpha_{-1}^{(j)} Q_{-1,0}^* + \alpha_{-2}^{(j)} Q_{-2,0}^* + \alpha_{-3}^{(j)} Q_{-3,0}^*)) + Q_{-j,-1}^* (Q_{j,n} + \alpha_{-1}^{(j)} Q_{-1,0} + \alpha_{-2}^{(j)} Q_{-2,0} + \alpha_{-3}^{(j)} Q_{-3,0}) - \frac{2}{\sqrt{\beta_j\beta_{-j}}} \log(1 + \sqrt{\beta_j\beta_{-j}} Q_{j,1} Q_{-j,-1}^*) \right]. \quad (29)$$

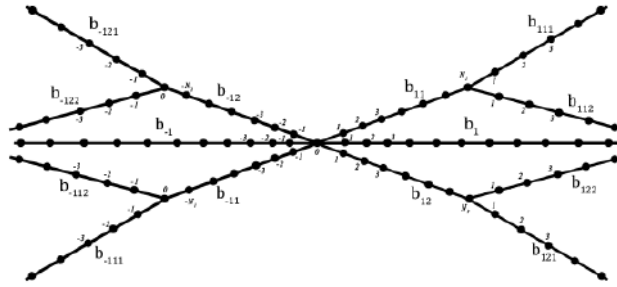
Bu miqdorlar uchun saqlanish qonunlari ularning vaqt hosilalari orqali quyidagicha $\frac{d}{dt}C_1 = 0, \frac{d}{dt}C_2 = 0, \frac{d}{dt}C_3 = 0$ va $\frac{d}{dt}E = 0$ deb yoziladi. Cheksiz miqdordagi saqlovchi miqdorlarning mavjudligini, [2] da batafsil o'rganilgan chiziqdagi DNNLS tenglamasi uchun qanday bajarilganiga o'xshash tarzda ko'rsatish mumkin.

Daraxtsimon grafga kengaytirish. Metrik yulduz grafigi uchun DNNLS tenglamasini boshqa, murakkabroq tarmoqlangan topologiyalarga kengaytirish mumkin. Ushbu bo'limda biz buni daraxt grafigidan misol (5-rasm) sifatida foydalanib ko'rsatamiz. Grafik 10 ta yarim cheksiz va 4 ta chekli bog'lanishdan iborat. Ikkinchisi quyidagicha aniqlanadi: $b_{-1}, b_{-1mn} = \{0, -1, -2, \dots, -N_m\}$, $b_{-1mn} = \{0, -1, -2, \dots, -N_m\}$, $b_{-1}, b_{1mn} = \{1, 2, 3, \dots\}$, $b_{1mn} = \{1, 2, 3, \dots, N_m\}$, bu yerda $m, n = 1, 2$. Daraxt grafigidagi har bir bog'lanish uchun DNNLS tenglamasini quyidagicha yozish mumkin

$$i \frac{dQ_{\pm e, n}}{dt} = Q_{\pm e, n+1} - 2Q_{\pm e, n} + Q_{\pm e, n-1} + \sqrt{\beta_e \beta_{-e}} Q_{\pm e, n} Q_{\pm e, -n}^* (Q_{\pm e, n+1} + Q_{\pm e, n-1}), \quad (30)$$

bu yerda $e = 1, 1m, 1mn$. E'tibor bering, (30) tenglama cho'qqilarga (tarmoq nuqtalariga) tegmaydigan joylarda, ya'ni cho'qqilarga yaqin joylarda yozilgan. Yulduzcha grafigiga o'xshash tarzda, biz to'rtta simmetrik tarmoq nuqtalariga quyidagi shartlarni qo'yamiz:

$$\begin{aligned} Q_{-1mn, 1} &= \alpha_{-1m}^{(-1mn)} Q_{-1m, -N_m}, \\ Q_{-1mn, -N_m+1} &= \alpha_{-1m1}^{(-1m)} Q_{-1m1, 0} + \alpha_{-1m2}^{(-1m)} Q_{-1m2, 0}, \\ Q_{1mn, 0} &= \alpha_{m1}^{(1mn)} Q_{1m1, N_m}, \\ Q_{1mn, N_m+1} &= \alpha_{m1}^{(1m)} Q_{1m1, 1} + \alpha_{m2}^{(1m)} Q_{1m2, 1}. \end{aligned} \quad (31)$$



5-rasm. Daraxt diagrammasining sxematik diagrammasi

Daraxt grafigining har bir shoxidagi DNNLS tenglamasining soliton yechimlari DNNLS tenglamasining chiziqdagi yechimi orqali quyidagicha ifodalanishi mumkin:

$$Q_{\pm e, n}(t) = \frac{1}{\sqrt{\beta_{\pm e}}} Q_{n+s_{\pm e}}(t) \quad (32)$$

bu yerda $s_{\pm 1} = s_{\pm 1m} = n_0$, $s_{\pm 1mn} = n_0 \pm N_m$ va n_0 soliton markazidir. Agar (31) shartlar bajarilsa, (32) yechimdan koeffitsiyentlar $\alpha_{\pm e}^{(\pm e)}$ va $\beta_{\pm e}$ nohiziqli parametrlari o'rtasidagi quyidagi bog'liqliklarni olamiz:

$$\begin{aligned} \alpha_{\pm 1mn}^{(\pm 1m)} &= \sqrt{\frac{\beta_{\pm 1m}}{\beta_{\pm 1m}}}, \\ \alpha_{\pm 1mn}^{(\pm 1m)} &= \frac{1}{\sqrt{\beta_{\pm 1m} \beta_{\pm 1mn}} \left(\frac{1}{\beta_{\pm 1m1}} + \frac{1}{\beta_{\pm 1m2}} \right)}. \end{aligned} \quad (33)$$

(33) tenglamani (31) tenglamaga qo'yish cho'qqilarda quyidagi "kvazichegara" shartlariga olib keladi:

$$\sqrt{\beta_{-1m1}} Q_{-1m1, 1} = \sqrt{\beta_{-1m2}} Q_{-1m2, 1},$$

$$\frac{Q_{-1m1,1}}{\sqrt{\beta_{-1m1}}} + \frac{Q_{-1m2,1}}{\sqrt{\beta_{-1m2}}} = \frac{Q_{-1m,-N_m}}{\sqrt{\beta_{-1m}}}$$

$$\frac{Q_{-1m,-N_m+1}}{\sqrt{\beta_{-1m}}} + \frac{Q_{-1m1,1}}{\sqrt{\beta_{-1m1}}} = \frac{Q_{-1m2,1}}{\sqrt{\beta_{-1m2}}} \quad (34)$$

va

$$\sqrt{\beta_{1m1}} Q_{1m1,0} = \sqrt{\beta_{1m2}} Q_{1m2,0},$$

$$\frac{Q_{1m1,0}}{\sqrt{\beta_{1m1}}} + \frac{Q_{1m2,0}}{\sqrt{\beta_{1m2}}} = \frac{Q_{1m,N_m}}{\sqrt{\beta_{1m}}}$$

$$\frac{Q_{1m,N_m+1}}{\sqrt{\beta_{1m}}} + \frac{Q_{1m1,1}}{\sqrt{\beta_{1m1}}} = \frac{Q_{1m2,1}}{\sqrt{\beta_{1m2}}} \quad (35)$$

Yuqoridagi kvazichegara shartlari (32) tenglama yechimi bilan quyidagi cheklov bajarilsa, qondiriladi

$$\frac{1}{\beta_{\pm 1m}} = \frac{1}{\beta_{\pm 1m1}} + \frac{1}{\beta_{\pm 1m2}}. \quad (36)$$

(36) tenglama bilan berilgan yig'ish qoidasi 5-rasmda ko'rsatilgan grafikning daraxtsimon mintaqasida DNNLS tenglamasining (30) integrallanishini ta'minlaydi va (32) tenglama bilan berilgan soliton yechimlarini tasdiqlaydi. Yuqorida tavsiflangan yondashuvni ixtiyoriy topologiya grafiklarida DNNLS tenglamasini yechish uchun qo'llash mumkinligini unutmang, agar grafikda ikkita chiquvchi yarim cheksiz bog'lanish bo'lsa.

Xulosalar. Ushbu maqolada biz diskret ulanishlarga ega metrik grafiklarda PT-simmetrik diskret nolokal chiziqli bo'lmagan Shredinger-Ablowitz-Muslimani tenglamasi nuqtayi nazaridan aniqlanishi mumkin bo'lgan nolokal soliton dinamikasi muammosini kengaytirdik. Yulduzcha grafigidagi masalaning integrallanishi ko'rsatilgan. Cheklovlar nuqtayi nazaridan ko'rsatilgan holat uchun tarmoqlangan diskret panjaralardagi DNNLS tenglamasining soliton yechimlari uchun analitik ifodalar olingan. Ikkinchisi oddiy yig'ish qoidalari shaklida taqdim etilgan (24). Sonli yechimlar shuni ko'rsatadiki, (24) cheklov bajarilganda, solitonlarning cho'qqidan kontaktsiz o'tishi sodir bo'ladi (3-rasmga qarang), agar cheklov buzilgan bo'lsa, solitonning cho'qqida aks etishi kuzatilishi mumkin (4-rasmga qarang). Maqolada taklif qilingan modeldan, masalan, har bir tarmoq o'z-o'zidan paydo bo'ladigan daromad yo'qotishlariga ega bo'lgan tarmoqlangan Hirota panjaralari, optik tolali massivlarning diskret tarmoqlari kabi diskret to'lqin yo'naltiruvchi tarmoqlardagi solitonlarning dinamikasini tasvirlash uchun foydalanish mumkin. Nihoyat, yuqoridagi model va [30] da ilgari muhokama qilingan mahalliy NLS tenglamasi nuqtayi nazaridan tasvirlangan model o'rtasidagi farqni ta'kidlamoqchimiz. Bu, mahalliy analogidan farqli o'laroq, grafiklardagi DNNLS tenglamasini birlamchi (asosiy) yulduz grafigida, ya'ni oddiy -birikmada shakllantirish mumkin emasligi bilan izohlanadi. (Yulduzcha grafigi holatida) bog'lanishlar soni cho'qqiga nisbatan juft va nosimmetrik joylashgan bo'lishi yoki (ixtiyoriy grafigi holatida) kiruvchi yarim cheksiz bog'lanishlar soni chiquvchi bog'lanishlar soniga teng bo'lishi kerak. Bu ko'rib chiqilayotgan NLS tenglamasining lokal bo'lmaganligi natijasidir. Yana bir natija shundaki, grafiklardagi mahalliy Shredinger tenglamasidan farqli o'laroq, uning mahalliy bo'lmagan analogi bog'langan komponentlarga ega, ya'ni u uchta komponent bir-biriga bog'langan (komponent komponentga bog'langan) Shredinger tenglamalari tizimidir.

ADABIYOTLAR:

1. M.J. Ablowitz, Z.H. Musslimani, *Phys. Rev. Lett.* 110 (2013) 064105.
2. M.J. Ablowitz, Z.H. Musslimani, *Phys. Rev. E* 90 (2014) 032912.
3. M.J. Ablowitz, Z.H. Musslimani, *Nonlinearity* 29 (2016) 915.
4. M.J. Ablowitz, Z.H. Musslimani, *Stud. Appl. Math.* 139 (2016) 7.
5. D. Sinha, P.K. Ghosh, *Phys. Rev. E* 91 (2018) 042908.
6. J. Yang, *Phys. Rev. E* 98 (2018) 042202.
7. S. Stalin, M. Senthilvelan, M. Lakshmanan, *Phys. Lett. A* 377 (2017) 860.
8. Z. Wen, *Zh. Yan, Chaos* 27 (2017) 053105.
9. B-F. Feng, X-D. Luo, M.J. Ablowitz, Z.H. Musslimani, *Nonlinearity* 31 (2018) 5385.

10. M.J. Ablowitz, X-D. Luo, Z.H. Musslimani, *J. Math. Phys.* 59 (2018) 011501.
11. M.J. Ablowitz, Z.H. Musslimani, *J. Phys. A* 52 (2019) 15LT02.
12. Mark J. Ablowitz, Xu-Dan Luo, Ziad H. Musslimani, *Nonlinearity* 33 (2020) 3653.
13. Rahmi Rusin, Rudy Kusdiantara, Hadi Susanto, *Phys. Lett. A* 383 (2019) 2039–2045.
14. J. Rao, J. He, T. Kanna, D. Mihalache, *Phys. Rev. E* 102 (2020) 032201.
15. C.B. Ward, P.G. Kevrekidis, T.P. Horikis, D.J. Frantzeskakis, *Phys. Rev. Res.* 2 (2020) 013351.
16. Li-Yuan Ma, Zuo-Nong Zhu, *Appl. Math. Lett.* 59 (2016) 115–121.
17. Xiao Deng, Senyue Lou, Da-jun Zhang, *Appl. Math. Comput.* 332 (2018) 477–483.
18. A.B. Aceves, C. De Angelis, T. Peschel, et al., *Phys. Rev. E* 53 (1996) 1172.
19. M. Toda, *Prog. Theor. Phys. Suppl.* 45 (1970) 174.
20. R. Hirota, *J. Phys. Soc. Jpn.* 35 (1973) 286.
21. T.A. Gadzhimuradov, A.M. Agalarov, *Phys. Rev. A* 93 (2016) 062124.
22. Li-Yuan Ma, Shou-Feng Shen, Zuo-Nong Zhu, *Appl. Math. Lett.* 130 (2022) 108002.
23. Jia-Liang Ji, Zong-Wei Xu, Zuo-Nong Zhu, *Chaos* 29 (2019) 103129.
24. Xiao Deng, Senyue Lou, Da-jun Zhang, *Appl. Math. Comput.* 332 (2018) 477–483.
25. Junchao Chen, Bao-Feng Feng, Yongyang Jin, *Wave Motion* 93 (2020) 102487.
26. S.Y. Lou, Fei Huang, *Sci. Rep.* 7 (2017) 869.
27. Li-Yuan Ma, Zuo-Nong Zhu, *J. Math. Phys.* 57 (2016) 083507.
28. Y. Hanif, U. Saleem, *Phys. Lett. A* 384 (2020) 126834.
29. Z. Sobirov, D. Matrasulov, K. Sabirov, S. Sawada, K. Nakamura, *Phys. Rev. E* 81 (2010) 066602.
30. Z. Sobirov, D. Matrasulov, S. Sawada, K. Nakamura, *Phys. Rev. E* 84 (2011) 026609.
31. D. Matrasulov, K. Sabirov, D. Babajanov, H. Susanto, *Europhys. Lett.* 130 (2020) 67002.
32. K.K. Sabirov, M.E. Akramov, R.Sh. Otajonov, D.U. Matrasulov, *Chaos Solitons Fractals* 133 (2020) 109636.
33. K.K. Sabirov, J.R. Yusupov, M.M. Aripov, M. Ehrhardt, D.U. Matrasulov, *Phys. Rev. E* 103 (2021) 043305.
34. K.K. Sabirov, J.R. Yusupov, M. Ehrhardt, D.U. Matrasulov, *Phys. Lett. A* 423 (2021) 127822.
35. M. Akramov, K. Sabirov, D. Matrasulov, H. Susanto, S. Usanov, O. Karpova, *Phys. Rev. E* 105 (2022) 054205.

TURLI TEMPERATURALARDA TUNNELLANISH KOEFFITSIYENTINING TASHQI ELEKTR MAYDON TA‘SIRIDA O‘ZGARISHI

Dadamirzayev Muhammadjon G‘ulomqodirovich,
Namangan davlat texnika universiteti professori, f.m.f.d.,
ilmiy ishlar va innovatsiyalar bo'yicha prorektor
dadamirzaev70@mail.ru
Qosimova Mamura Odiljonovna,
Namangan davlat texnika universiteti dotsenti, f. m. f. n.
omamuraqosimova@gmail.com
G‘aniyeva Adolatxon Komilboy qizi,
Namangan davlat texnika universiteti doktoranti
adolatkhonganieva@gmail.com

Annotatsiya. Ushbu maqolada germaniy yarimo‘tkazgichli strukturalarda tunnellanish koefitsiyentiga temperatura va tashqi elektr maydon ta‘siri o‘rganildi. WKB yaqinlashuvi asosida 4.2 K, 77 K va 150 K temperaturalarda hisoblashlar bajarilib, tunnellanish koefitsiyentining temperatura hamda tashqi kuchlanishga bog‘liqligi aniqlandi. Natijalar past temperaturalarda va yuqori elektr maydonlarda tunnellanish uchun qulay sharoit yuzaga kelishini ko‘rsatdi.

Kalit so‘zlar: tunnellanish koefitsiyenti, temperatura, effektiv massa, potensial to‘siq, elektr maydon, Wentzel–Kramers–Brillouin (WKB).

CHANGE IN THE TUNNELING COEFFICIENT UNDER THE INFLUENCE OF AN EXTERNAL ELECTRIC FIELD AT DIFFERENT TEMPERATURES.

Abstract. This paper studies the effect of temperature and external electric field on the tunneling coefficient in germanium semiconductor structures. Using the WKB approximation, calculations were performed for 4.2 K, 77 K, and 150 K temperatures, showing that the tunneling coefficient depends on temperature and applied voltage. The results indicate that lower temperatures and higher electric fields create more favorable conditions for tunneling.

Keywords: Tunneling coefficient, temperature, effective mass, potential barrier, electric field, Wentzel–Kramers–Brillouin (WKB).

ИЗМЕНЕНИЕ КОЭФФИЦИЕНТА ТУННЕЛИРОВАНИЯ ПОД ВОЗДЕЙСТВИЕМ ВНЕШНЕГО ЭЛЕКТРИЧЕСКОГО ПОЛЯ ПРИ РАЗЛИЧНЫХ ТЕМПЕРАТУРАХ.

Аннотация. В данной работе исследовано влияние температуры и внешнего электрического поля на коэффициент туннелирования в германиевых полупроводниковых структурах. На основе приближения ВКБ были выполнены расчёты при температурах 4.2 К, 77 К и 150 К, показавшие зависимость коэффициента туннелирования от температуры и приложенного напряжения. Полученные результаты показывают, что при низких температурах и высоких электрических полях создаются более благоприятные условия для туннелирования.

Ключевые слова: Коэффициент туннелирования, температура, эффективная масса, потенциальный барьер, электрическое поле, Wentzel–Kramers–Brillouin (WKB).

Kirish. Yarimo‘tkazgichli strukturalarda tunnellanish hodisasi zamonaviy nanoelektronika qurilmalarining ishlash prinsipini tushuntirishda muhim fizik jarayonlardan biri hisoblanadi [1-3]. Ayniqsa, tunnel diodlar, kvant o‘lchamli strukturalarda elektronlarning potensial to‘siq orqali o‘tishi qurilmaning elektr xossalarini belgilovchi asosiy omillardan biridir [4-5]. Tunnellanish ehtimoli potensial to‘siq shakli, balandligi, elektronning effektiv massasi va yarimo‘tkazgichning energetik parametrlariga kuchli bog‘liq bo‘ladi. Ma‘lumki, yarimo‘tkazgichlarda taqiqlangan zona kengligi hamda unga bog‘liq ravishda zaryad tashuvchilar effektiv massasi temperatura o‘zgarishi bilan sezilarli ravishda o‘zgaradi [6-7]. Bu esa, o‘z navbatida potensial to‘siq parametrlarining o‘zgarishiga olib kelib, tunnellanish koefitsiyentiga bevosita ta‘sir ko‘rsatadi. Tashqi elektr maydon potensial to‘siqni uchburchak shaklga keltiradi.. Elektronlarning

to'siq orqali o'tishini WKB yaqinlashuvi asosida tahlil qilish qulay va samarali hisoblanishi [8-10] ishlarda ko'rsatilgan.

Biroq yuqoridagi ishlarda temperatura ta'sirida taqiqlangan zona kengligining o'zgarishi yetarli darajada o'rganilmagan.

Ishning maqsadi, germaniy yarimo'tkazgichi misolida temperatura ta'sirida taqiqlangan zona kengligining o'zgarishi ko'rib chiqilib, tashqi elektr maydon mavjud bo'lganda tunnellanish koeffitsiyentining temperaturaga bog'liqligi nazariy jihatdan tahlil qilinadi.

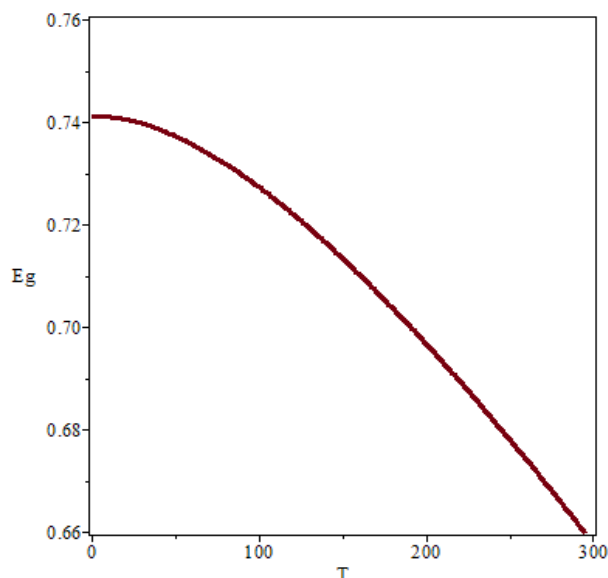
Tadqiqot metodologiyasi. Mazkur ishda tunnellanish koeffitsiyentining temperatura va tashqi elektr maydon ta'sirida o'zgarishini o'rganish uchun nazariy tahlil usullari qo'llanildi. Tadqiqot obyekti sifatida germaniy asosli tunnel diodi tanlab olindi. Taqiqlangan zona kengligining temperaturaga bog'liqligi Varshniy formulasi, effektiv massani temperatura ta'sirida o'zgarishi esa, Kane yaqinlashuvi asosida ifodalandi. Ushbu bog'lanish orqali turli temperaturalarda taqiqlangan zona kengligining qiymatlari aniqlanib, keyingi hisoblashlarda foydalanildi. Hisoblashlar Maple dasturida amalga oshirildi.

Tahlil va natijalar. Turli temperaturalarda tunnellanish koeffitsiyentining tashqi elektr maydon ta'sirida o'zgarishi.

Yarimo'tkazgichlarning taqiqlangan zona kengligi haroratga quyidagicha bog'langan [3]:

$$E_g = E_0 - \frac{\alpha T^2}{T + \beta} \quad (1)$$

bu yerda, E_0 - absolyut nol temperaturadagi taqiqlangan zona kengligi, α va β modda turiga bog'liq bo'lgan temperatura koeffitsiyentlari. (1) ifoda orqali Ge yarimo'tkazgichi E_g sining o'zgarishi quyidagiga teng bo'ladi.



1- rasm. Ge bilvosita o'tishdagi E_g sining temperatura ta'sirida o'zgarishi.

p-n o'tishli tunnel diod kontaktida hosil bo'luvchi potensial to'siq tashqi elektr maydon ta'sirida uchburchak shaklni oladi

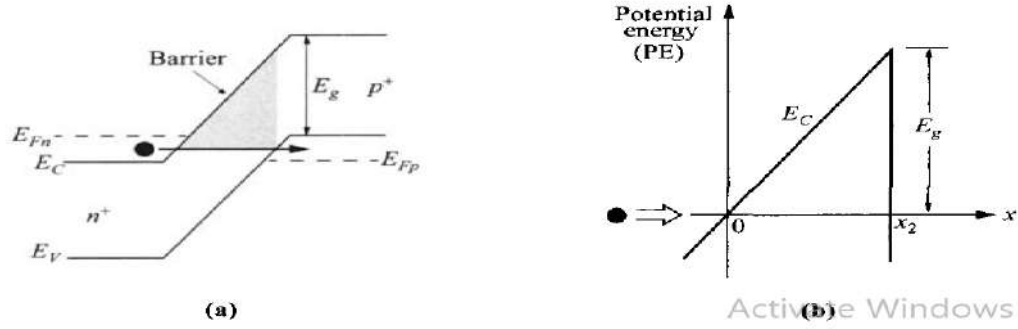
Uchburchak shakldagi potensial to'siq ichidagi elektronning k to'liqin vektori:

$$k(x) = \sqrt{\frac{2m^*}{\hbar} (-q\zeta x)} \quad (2)$$

ζ -o'rtacha elektr maydon.

$$\zeta = \sqrt{\frac{q(\varphi_{bi} - V)N_A N_D}{2\varepsilon_s(N_A + N_D)}} \quad (3)$$

$$L_t = \exp\left[-2 \int_0^{x_2} \sqrt{\frac{2m^*}{\hbar} (-q\zeta x)} dx\right] \quad (4)$$



2 - rasm. (a) Tunnel diodidagi tunnelni (b) uchburchak potensial to‘siq bilan tahlil qilish mumkin [5].

Yarimo‘tkazgichlarda tunnellanish koeffitsiyenti taqiqlangan zona kengligini o‘zgarishiga kuchli bog‘langan bo‘lib, WKB yaqinlashuvi orqali tunnellanish koeffitsiyenti uchun, $x_2 = \frac{E_g}{8q}$, teng deb olsak quyidagi ifodaga ega bo‘lamiz [2-3]:

$$L_t \approx \exp\left(-\frac{4\sqrt{2m^*}}{3q\hbar\zeta} E_t^2\right) \quad (5)$$

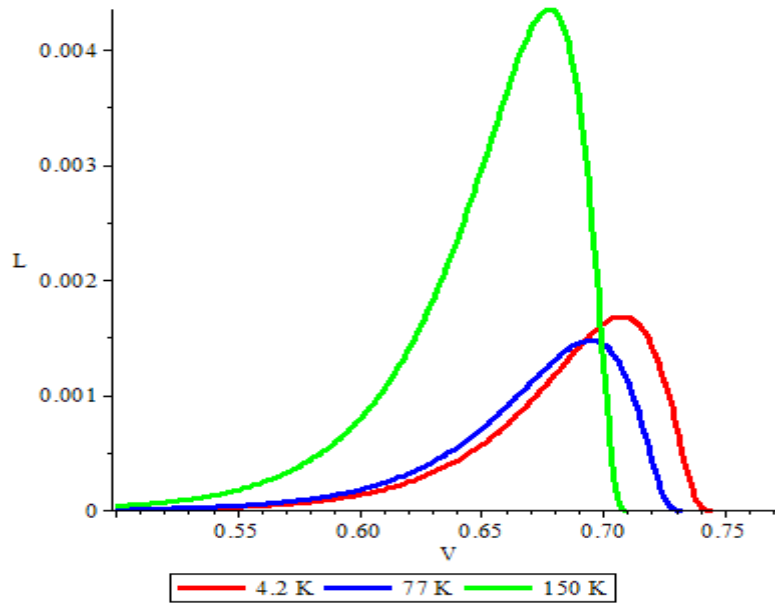
$$E_t = E_g - eV + \mu_n + \mu_p \quad (6)$$

E_t -taqiqlangan zona kengligini o‘zgarishi. (3) va (6) ni (5)-ifodaga qo‘ysak quyidagi ifodaga ega bo‘lamiz:

$$L_t \approx \exp\left(-\frac{4\sqrt{2m^*(E_g - eV + \mu_n + \mu_p)^2}}{3q\hbar\sqrt{\frac{q(\phi_{bi})N_A N_D}{2\epsilon_s(N_A + N_D)}}}\right) \quad (7)$$

Adabiyotlardan ma‘lumki, tunnel diodi 4.2 K, 77 K, 150 K temperaturalarda olinadi. Temperatura ta‘sirida: taqiqlangan zona $E_g = E_0 - \frac{\alpha T^2}{T + \beta}$, effektiv massa $m^*(E) = m_0^* \left(1 + \frac{2E}{E_g}\right)$ fermi energiyalari $\mu_n = E_C - E_F = kT \ln\left(\frac{N_C}{N_D}\right)$, $\mu_p = E_F - E_V = kT \ln\left(\frac{N_V}{N_A}\right)$, kontakt potensiallar farqi $\phi_{ib} = \frac{kT}{q} \ln\left(\frac{n_n n_p}{n_i^2}\right)$ larining o‘zgarishini hisobga olsak [5] Tunellanish koeffitsiyenti uchun quyidagi ifodaga ega bo‘lamiz:

$$L_t \approx \exp\left(-\frac{4\sqrt{2m^*(T)(E_g(T) - eV + \mu_n(T) + \mu_p(T))^2}}{3q\hbar\sqrt{\frac{q(\phi_{bi})N_A N_D}{2\epsilon_s(N_A + N_D)}}}\right) \quad (8)$$



3 - rasm. Turli temperaturalarda L ning tashqi kuchlanish V ga bog‘liqligi.

Yuqoridagi grafikdan ko‘rinib turibdiki, tunnellanish ko‘effitsiyenti temperatura ta‘sirida ortadi. 3-rasmdagi grafikni olishda 1-jadvaldagi qiymatlardan foydalanildi.

T(K)	E_g	$\varphi(V)$	μ_n	μ_p	m_r^*/m_0
150	0.719	0.71	0.02	0.035	0.1294
77	0.733	0.74	0.032	0.044	0.1320
4,2	0.742	0.745	0.03	0.047	0.1336

1- jadval: Temperatura ta‘sirida $E_g, \mu_n, \mu_p, \varphi_{ib}$, o‘zgarishi.

Xulosa. Ushbu tadqiqotda tunnellanish ko‘effitsiyentining temperatura va tashqi elektr maydon ta‘sirida o‘zgarish qonuniyatlari nazariy jihatdan tahlil qilindi. Tahlillar adabiyotlardagi tajriba natijalari bilan mos tushdi. Tunnellanish ko‘effitsiyenti temperatura ta‘sirida ortishiga qaramay tunnel tokning temperaturaga bog‘liqligi ortiqcha hamda diffuzion tokka nisbatan ancha sust bo‘ladi. Chunki, temperatura ortishi natijasida E_g da defekt sathlarni ortishi ortiqcha tokning keskin ortishiga sabab bo‘ladi. Diffuzion tok esa, temperaturaga kuchli bog‘langan bo‘ladi. Temperatura ortganda ortiqcha hamda diffuzion tokning ortishi natijasida tunnellanish ko‘effitsiyenti qiymatining ortishiga qaramay tunnel tokning qiymati o‘zgaradi..

ADABIYOTLAR:

1. I. Gulyamov, G., Dadamirzaev, G., Dadamirzayev, M., & Kosimova, M. (2020). The influence of the microwave field on the characteristics of the pn junction. *Euroasian Journal of Semiconductors Science and Engineering*, 2(4), 7
2. Gulyamov, G., Dadamirzaev, G., Dadamirzayev, M., & Kosimova, M. (2020). The influence of the microwave field on the characteristics of the pn junction. *Euroasian Journal of Semiconductors Science and Engineering*, 2(4), 7
3. Varshni, Y. P. Temperature dependence of the energy gap in semiconductors. *Physica*, 34, 149–154 (1967). [https://doi.org/10.1016/0031-8914\(67\)90062-6](https://doi.org/10.1016/0031-8914(67)90062-6)
4. Kane, E. O. Theory of tunneling. *Journal of Applied Physics*, 32(1), 83–91 (1961). <https://doi.org/10.1063/1.1735965>
5. S. M. Sze, Kwok K. Ng. *Physics of semiconductor devices*. Third edition.
6. Chynoweth, A. G., Feldmann, W., Logan, R. A. Excess tunnel current in silicon Esaki junctions. *Physical Review*, 121, 684–694 (1961).
7. Esaki, L. New phenomenon in narrow germanium p–n junctions. *Physical Review*, 109, 603–604 (1958). <https://doi.org/10.1103/PhysRev.109.603>

8. Cai, Z., Huang, M., Zhou, P., Chen, S. A generalized tunneling current formula for metal/insulator heterojunctions under large bias and finite temperature. (2021). <https://doi.org/10.48550/arXiv.2103.11400>
9. Bizindavyi, J. et al. Large variation in temperature dependence of band-to-band tunneling current in tunnel devices. *IEEE Electron Device Letters* (2019).
10. Dadamirzaev, M. G., Kosimova, M. O., Boydedayev, S. R., & Makhmudov, A. S. (2024). Comparison of 2D and 3D pn Junction Differential Conductance and Diffusion Capacitance. *East European Journal of Physics*, (2), 372-379.
11. Dadamirzayev, M. G., & Kosimova, M. O. (2018). The effect of the variation of the electric field of the UHF waves on the CVC of the asymmetric pn-junction. *ISJ Theoretical & Applied Sciencye*, 10 (66), 401-405.

PDMS ELASTOMER ASOSIDAGI CHO'ZILUVCHAN ORGANIK FOTOVOLTAIK ELEMENTLARNING MORFOLOGIK VA FOTOVOLTAIK XUSUSIYATLARI

Urazkulova Diyora Muzaffar qizi,

O'z RFA U.Arifov nomidagi Ion-plazma va lazer texnologiyalari instituti tayanch doktoranti

Turgunboev Abror Yulchi ugli,

O'z RFA U.Arifov nomidagi Ion-plazma va lazer texnologiyalari instituti tayanch doktoranti

Long Ye,

Tianjin Universiteti materialshunoslik va muhandislik maktabi professori

Kuvondikov Vakhobjon Ortigovich,

O'z RFA U.Arifov nomidagi Ion-plazma va lazer texnologiyalari instituti laboratoriya mudiri, f.-m.f.d.

vahobjon87@gmail.com

Annotatsiya. Ushbu ishda PM6:N2200 asosidagi cho'ziluvchan organik fotovoltaiik elementlarda Polidimetilsiloksan (PDMS) elastomer qo'shimchasining mikrostrukturaviy, mexanik va fotovoltaiik xususiyatlarga ta'siri kompleks ravishda o'rganildi. Natijalar asosida PDMS tarkibi ortishi bilan sirt notekisligi, domen o'lchami va fazaviy ajralishlari, shuningdek fotoelementning fotoelektrik ko'rsatkichlarining o'zgarishlari tahlil qilindi. Olingan natijalar asosida PM6:N2200:PDMS faol qatlam tizimida 10% PDMS ulushida mexanik mustahkamlik, mikrostrukturaviy morfologiya va fotovoltaiik samaradorlik o'rtasidagi optimal muvozanat nuqtasi ekanligi aniqlandi.

Kalit so'zlar: Organik fotovoltaiik element, cho'ziluvchanlik, morfologiya, absorbsion spektr, faol qatlam, PDMS elastomer, mexanik mustahkamlik, fotovoltaiik samaradorlik.

MORPHOLOGICAL AND PHOTOVOLTAIC PROPERTIES OF STRETCHABLE ORGANIC PHOTOVOLTAIC DEVICES BASED ON PDMS ELASTOMER

Abstract. In this work, the influence of polydimethylsiloxane (PDMS) elastomer additive on the microstructural, mechanical, and photovoltaic properties of stretchable organic photovoltaic devices based on PM6:N2200 was comprehensively investigated. Based on the obtained results, the changes in surface roughness, domain size, phase separation, and photoelectric performance parameters of the devices with increasing PDMS content were analyzed. The results revealed that 10% PDMS content in the PM6:N2200:PDMS active layer system represents the optimal balance between mechanical stability, microstructural morphology, and photovoltaic efficiency.

Keywords: organic photovoltaic device, stretchability, morphology, absorption spectrum, active layer, PDMS elastomer, mechanical stability, photovoltaic efficiency.

МОРФОЛОГИЧЕСКИЕ И ФОТОВОЛЬТАИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА РАСТЯЖИМЫХ ОРГАНИЧЕСКИХ ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЭЛЕМЕНТОВ НА ОСНОВЕ ЭЛАСТОМЕРА PDMS

Аннотация. В данной работе комплексно исследовано влияние добавки эластомера полидиметилсилоксана (PDMS) на микроструктурные, механические и фотовольтаические свойства растяжимых органических фотоэлектрических элементов на основе PM6:N2200. На основе полученных результатов проанализированы изменения шероховатости поверхности, размеров доменов и фазового разделения, а также фотоэлектрических параметров устройства при увеличении содержания PDMS. Установлено, что в системе активного слоя PM6:N2200:PDMS содержание 10% PDMS является оптимальной точкой баланса между механической прочностью, микроструктурной морфологией и фотовольтаической эффективностью.

Ключевые слова: органический фотоэлектрический элемент, растяжимость, морфология, спектр поглощения, активный слой, эластомер PDMS, механическая прочность, фотовольтаическая эффективность.

Kirish. So'nggi yillarda portativ va egiluvchan fotoelementlarning turli sohalarda qo'llanilishi yengil, samarali hamda mexanik deformatsiyalarga bardoshli egiluvchan fotoelementlarga bo'lgan talabni keskin

oshirdi. Shu sababli quyosh energiyasini elektr energiyasiga bevosita aylantiruvchi organik fotovoltaiik elementlar (OFE) yengil vazni, egiluvchanligi, yarim shaffofligi va past haroratda tayyorlanish imkoniyati bilan istiqbolli texnologiya sifatida e'tirof etilmoqda. Ular an'anaviy kremniy asosidagi fotoelementlarga nisbatan arzon ishlab chiqarish afzalliklari bilan portativ elektron fotoelementlar, kiyimlardagi aqlli elektron qurilmalar hamda egiluvchan energiya tizimlari uchun muhim yechim hisoblanadi [1–3]. Bunday fotoelementlarda elastik tagliklar va elektrodlar, xususan TPU/PH1000 asosidagi cho'ziluvchan elektr o'tkazuvchi qatlamlar hamda faol qatlam sifatida donor va akseptor materiallar aralashmasidan iborat qatlamlar qo'llaniladi. Ushbu tadqiqot ishda asosiy yorug'lik yutuvchi qatlam sifatida PM6 donor polimeri va N2200 akseptordan iborat hajmiy geteroo'tishli faol qatlam tanlangan bo'lib, ularning molekulyar tuzilmalari hamda fotoelement strukturasi 1-rasmda keltirilgan. Ushbu donor/akseptor xususiyatli materiallarning HOMO/LUMO energetik darajalariga hamda absorpsion spektrlarining joylashuviga ko'ra ular o'zaro to'ldiruvchi optik va elektron xususiyatlarga ega bo'lib, faol qatlamda o'zaro tandem sifatida qo'llanilganda samarali zaryad generatsiyasi va tashilishini ta'minlaydi. Boshqa tadqiqotchilarning ishlarida ham PM6:N2200 faol qatlam tizimida yorug'lik yutilishi, energetik sathlari va zaryad tashish xossalari optimallasuvi hisobiga yuqori fotoelektrik samaradorliklarga erishilgan [4–6].



1-rasm. TPU/PH1000 asosidagi cho'ziluvchan OFE tuzilmasi hamda PM6 va N2200 donor/akseptor molekularining strukturalari

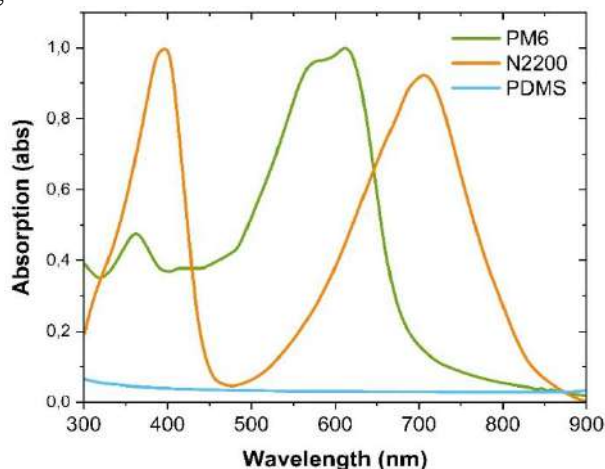
Biroq, bugungi kunda OFElarda yuqori samaradorlikka erishilsada, ammo ularning amaliy qo'llanilishini yanada kengaytirish uchun ularning cho'ziluvchanligini va egiluvchanligini oshirish asosiy omillardan biri sanaladi. Odatda yuqori kristallikka ega faol qatlamlar tashqi deformatsiya ta'sirida yorilish, strukturaviy yaxlitlikning buzilishi va morfologik buzilishlar hisobiga zaryad tashilish kanallarining yopilishiga olib kelishi mumkin [7,8]. Ushbu omillar fotoelementning barqarorligi hamda samaradorligining pasayishiga sabab bo'ladi. Shu bois turli sohalarda qo'llanilish uchun qulay cho'ziluvchan organik fotovoltaiik elementlarni yaratish dolzarb ilmiy yo'nalishlardan biriga aylandi. Bugungi kunda ushbu yo'nalishda cho'ziluvchan organik fotovoltaiik elementlarni yanada takomillashtirish uchun faol qatlamda donor-akseptor xususiyatli polimer aralashmalarni modifikatsiyalash, uch komponentali D-A-D yoki A-D-A faol qatlam tizimlarini yaratish hamda elastomer qo'shimchalardan foydalanish kabi strategiyalar taklif etilgan [9–11]. Ular orasida cho'ziluvchanlikni yaxshilash uchun elastomerlarni faol qatlam tarkibiga kiritish eng samarali usullardan biri hisoblanadi. Ushbu strategiya asosida mexanik kuchlanishni qayta taqsimlovchi hamda cho'zilishda hosil bo'luvchi energiyani so'ndiruvchi faol qatlam strukturasi hosil qilish mumkin [12,13]. Bunday yondashuv faol qatlamdagi ichki mexanik kuchlanishni kamaytirib, mikro yoriqlar hosil bo'lishini sekinlashtiradi va strukturaviy yaxlitlikni saqlashga yordam beradi. Polidimetilsiloksan (PDMS) yuqori elastiklik va yaxshi siklik barqarorlikka ega elastomer bo'lib, cho'ziluvchan OFElari uchun istiqbolli qo'shimcha hisoblanadi. Uning kichik miqdorda faol qatlam tarkibiga kiritilishi deformatsiyaga bardoshli elastik yupqa plyonka hosil qilib, mexanik mustahkamlik chegarasini oshiradi. Shuning bilan birga PDMS elastomer qo'shimchasi faol qatlamning yorug'lik yutilish xususiyatlariga hamda uning shaffofligiga ta'sir o'tkazmaydi. Biroq ortiqcha miqdorda PDMS qo'shilishi fazaviy ajralishlarda domenlarning yiriklashishi, sirt morfologiyasining buzilishi va zaryad tashish jarayonlarining yomonlashishiga olib kelishi mumkin [14–16]. Shu bois ushbu ishda PM6:N2200 faol qatlam asosidagi cho'ziluvchan OFElar tarkibiga PDMS elastomer qo'shimchasi kiritilishining optik, strukturaviy, mexanik va fotovoltaiik xususiyatlarga ta'siri kompleks ravishda o'rganiladi. Shuningdek, PDMS elastomer miqdorining faol qatlam morfologiyasi, fazaviy ajralish darajasi hamda fotoelektrik ko'rsatkichlar bilan o'zaro bog'liqligi tizimli ravishda tahlil qilinadi.

Tadqiqot usullari va namunalarni tayyorlash jarayonlari (Eksperimental qism). Cho'ziluvchan fotoelement namunalari TPU/PH1000/PEDOT:PSS/faol qatlam/PNDIT-F3N/EGaIn struktura bo'yicha tayyorlandi. Ushbu strukturani olishda dastlab, toza shisha taglik (2×2.5 sm) tayyorlandi va unga PDMS qatlami yopishtirildi. Keyingi navbatda, yuqori shaffoflikka ega TPU yupqa plyonkasi PDMS ustiga shunday

qoplandiki, ular orasida hech qanday havo pufakchalari qolmaydi. Ushbu strukturani tayyorlashning barcha bosqichlari spin coating metodi yordamida amalga oshirilganligi sabab, strukturada qatlamlarni tekis yotqizish uchun qattiq taglikdan foydalaniladi. Namuna tayyor bo'lgandan keyin esa shisha/PDMS qatlami ko'chirib olib tashlanadi. Pastki elektrod sifatida PH1000 materialidan spin coating usulida yupqa plyonkasidan foydalanildi. Shaffof elektrod plyonkalarining yopishqoqligini oshirish uchun (PH1000) yotqizilishidan oldin TPU tagliklari 25 daqiqa davomida UV/ozon bilan ishlov berildi. PH1000 moddasi DMSO da eritilib yotqizishdan oldin 12 soat davomida aralashtirildi. So'ngra PH1000 ochiq havo muhitida 1200 rpm spin-koting usulida yotqizildi va kristallik darajasini yaxshilash uchun 100°C da 10 daqiqa davomida termik ishlov berildi. Tayyorlangan elektrod qatlamlari sirtiga taxminan 25 nm qalinlikdagi PEDOT:PSS qatlami 4000 rpm tezlikda spin-coating usuli orqali yotqizilib, 150°C da 15 daqiqa davomida qizdirildi. Faol qatlam uchun PM6:N2200 materiallari 1:1 massa ulushi nisbatida olinib xloroformda umumiy 7 mg/mL konsentratsiyada eritildi va 50°C da 5 soat davomida aralashtirildi. Tayyorlangan faol qatlam eritmasiga 10% va 30% hajm ulushida PDMS eritmasi qo'shib uch xil (0%, 10% va 30%) tarkibli faol qatlam eritmalari tayyorlandi. Tayyor eritma spin-coating usuli yordamida PEDOT:PSS qatlami ustiga 2500 rpm tezlikda 30 sekund davomida yotqizildi va 100 °C da 10 daqiqa davomida termik ishlov berildi. So'ngra metanol 0.5 mg/ml konsentratsiyada eritilgan PDNIT-F3N elektron transport qatlami 3000 rpm tezlikda spin-coating usuli yordamida faol qatlam ustiga yotqizildi. Oxirgi bosqichda yuqori elektrod qatlam EGaIn (In - 25 % massa va Ga - 75% massa) glove box ichida azot muhitida PNDIT-F3N qatlam ustiga yotqizildi. Natijada yuzasi 4 mm² ga teng EGaIn elektrod qatlami hosil qilindi. Fotoelementlarning fotovoltaiik xususiyatlari azot muhitidagi glove box sharoitida Keithley 2400 tizimi yordamida AM 1.5G, 100 mW cm⁻² nurlanish ostida o'lchandi. Yorug'lik manbai sifatida Class AAA quyosh simulyatori (SS-F5-3A, Enli Technology Co. Ltd., Tayvan) ishlatildi. Volt – amper ($J-V$) fotovoltaiik o'lchovlari -0.5 dan 1.0 V gacha bo'lgan kuchlanish oralig'ida, 0.02 V qadam va 1 ms vaqt oralig'i bilan amalga oshirildi. Har bir faol qatlamli namuna uchun 10 tadan ortiq alohida o'lchovlar o'tkazildi. V_{OC} qiymati uchun xatolik ± 0.01 V ni tashkil etdi. Fotovoltaiik $J-V$ xarakteristikalaridan olingan J_{SC} qiymatlari EQE natijalari bilan taqqoslanganda farq 5% dan kam bo'ldi. Tashqi kvant samaradorligi (EQE) spektrlari QE-R tizimi (Enli Technology Co. Ltd., Tayvan) yordamida, monokristalli kremniy quyosh elementi asosida kalibrlangan holda o'lchandi. Faol qatlamlarning morfologiyasi Bruker MultiMode 8 atom-kuchi mikroskopi yordamida tapping rejimida, 1 Hz skanerlash tezligida tahlil qilindi. Optik yutilish spektrlari esa Shimadzu UV-1280 spektrofotometri yordamida 190–1100 nm diapazonda qayd etildi. Namunalar o'lchov jarayonlari yakunlanguncha azot muhitida qorong'i sharoitda saqlandi, bu esa tashqi degradatsiya va fotodegradatsiya jarayonlarini minimallashtirish imkonini berdi.

Olingan natijalar va ularning tahlili. OFE samaradorligini belgilovchi asosiy faktorlar bu faol qatlamni tashkil etuvchi donor va akseptor materiallarning HOMO/LUMO energiya darajalarining hamda yorug'lik yutilish spektrlarining o'zaro mosligi. Bunda eng muhimi faol qatlamning yorug'lik yutilish spektrining kengligi va yuqori intensivlikka ega bo'lishidir. Shu sababli, ushbu tadqiqotda bugungi kunda eng yuqori samaradorlik ko'rsatkichlariga erishilayotgan PM6 donor polimeri va fullerensiz N2200 akseptor materiallar qo'llanildi. Ularning xususiy yorug'lik yutilish spektrlarining o'zaro joylashuvi faol qatlam hosil qilishdagi mosligi bilan birga eksiton generatsiyasi uchun muhim shartlarni qanoatlantiradi. Ushbu materiallarning yupqa plyonka (~120-150 nm) holatdagi PM6 va N2200 materiallarining kvarts taglikda olingan yutilish spektrlari bir-birini samarali to'ldira olishini ko'rish mumkin. Ushbu materiallarning yorug'lik yutilish spektridagi eng muhim jihati shundaki, akseptorning asosiy yutilish polosasidan tashqari donor material yutmaydigan qisqa to'lqin uzunlik sohasida (400 nm) joylashgan yuqori intensivlikdagi yutilish polosasi mavjud. Ushbu yutilish polosasining mavjudligi PM6 va N2200 materiallar o'zaro faol qatlam hosil qilganda quyosh spektridan foydalanish sohasini yanada kengaytiradi. Bu esa zaryad tashuvchilarning hosil bo'lishi, fotovoltaiik ko'rsatkichlarning yaxshilanishida muhim rol o'ynaydi. PM6 donor material yorug'lik spektrning asosan 500–700 nm oralig'ida kuchli yutilish xususiyatiga ega. PM6 ning yutilish spektrida yaqqol ko'zga tashlanuvchi 0-1 va 0-0 elektron o'tishlar bilan bog'liq 575 nm va 610 nm da joylashgan yutilish polosalari mavjud bo'lib, bu yupqa plyonka shaklidagi donor materialning kristallanish hamda agregatsiyalanish darajalarini ko'rsatadi. Shuningdek, N2200 akseptor materialining yutilish spektrida 380–420 nm hamda 650–750 nm atrofida o'ziga xos yutilish polosalari kuzatildi (2-rasm). Ushbu xususiyat N2200 akseptor materialining PM6 donor bilan birgalikda faol qatlam hosil qilganda yorug'lik energiyasidan kengroq polosada samarali foydalanishi mumkinligini anglatadi. PDMS sof yupqa plyonkasining yutilish spektri alohida o'rganilganda aniqlandiki u yuqori shaffofligi hisobiga ko'zga ko'rinuvchi sohada deyarli yorug'likni yutmaydi (2-rasm). Shuning uchun u faol qatlamning yutilish spektriga deyarli ta'sir o'tkazmaydi. Umuman olganda, PM6 donor va N2200 akseptor materiallarining optik

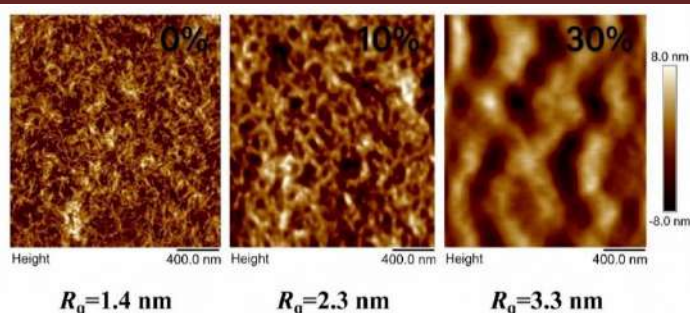
yutilish tahlillari ularning OFElar faol qatlamda donor–akseptor juftligi sifatida qo‘llanilishi spektral va energetik jihatdan o‘zaro mosligini ko‘rsatdi. Shuningdek, fotoelement cho‘ziluvchanligini yaxshilash uchun faol qatlamga kiritilayotgan PDMS elastomer material faol qatlamda yorug‘lik yutilish jarayonlariga va morfologiyasiga salbiy ta‘sir o‘tkazmasdan fotoelementning mexanik mustahkamligini yaxshilashga xizmat qilishi hamda cho‘ziluvchan organik fotovoltaiik element olish uchun muhim asos bo‘lib xizmat qiladi.



2-rasm. PM6, N2200 va PDMS materiallarining yupqa plyonka holatidagi yutilish spektrlari

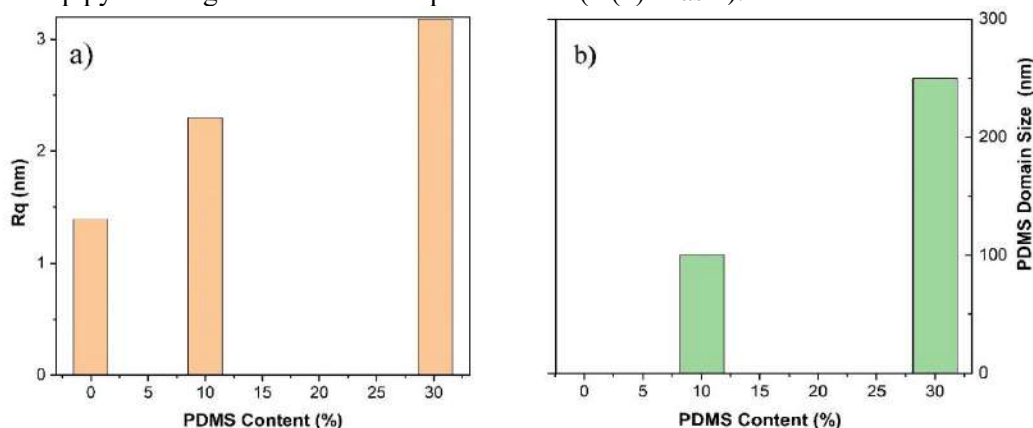
Faol qatlam mikrostrukturasi cho‘ziluvchan OFEning mexanik barqarorligi va fotoelektrik samaradorligini belgilovchi asosiy omillardan biri hisoblanadi. Elastomer qo‘shimchaning faol qatlam ichidagi fazaviy taqsimoti, domen o‘lchami va sirt topografiyasiga ko‘rsatadigan ta‘sirini chuqur tahlil qilish, samaradorlik va cho‘ziluvchanlik o‘rtasidagi optimal muvozanatni aniqlashda muhim ahamiyatga ega. Shundan kelib chiqib, PDMS elastomer kiritilishining faol qatlam morfologiyasiga ta‘sirini o‘rganish uchun faol qatlam namunalarning AFM tasvirlarini tahlil qildik. PM6:N2200:PDMS asosidagi aralashma plyonkalarda PDMS miqdorining ortishi bilan mikrostrukturaviy o‘zgarishlar bosqichma-bosqich sodir bo‘lishi kuzatiladi. Faol qatlamga 10% konsentratsiyada PDMS kiritilganda elastomer faza faol qatlam ichida mayda va nisbatan bir tekis taqsimlangan bo‘lib, bu tizimning yuqori dispersiyalanganligini ko‘rsatadi. Bunday mikrostruktura mexanik deformatsiyani samarali taqsimlashga xizmat qiladi. Faol qatlamda PDMS tarkibi 30% bo‘lganda elastomer domenlarining o‘lchami kattalashadi. Ushbu jarayon faol qatlamning strukturaviy tuzilishiga va zaryad tashish jarayonlariga sezilarli salbiy ta‘sir ko‘rsatadi. Xususan, elastomerning ortiqcha miqdori fazalar o‘rtasidagi o‘zaro aralashuvni kamaytirib, yirik fazaviy domenlarning shakllanishiga olib keladi. Namunalarning olingan AFM tahlillari mazkur holatni aniq tasdiqlaydi (3-rasm). Faol qatlamda PDMS ning kichik ulushida sirt nisbatan silliq va bir jinsli bo‘lib, o‘rtacha kvadratik notekislik qiymati ham nisbatan pastroq bo‘ldi. Elastomer miqdori 10% ga yetganda sirt topografiyasi murakkablashib, muayyan darajadagi morfologik o‘zgarishlar yuzaga keladi. Bu holat mexanik barqarorlikni oshirish bilan birga, faol qatlamning uzluksizligini saqlab qolishga imkon beradi. 30% PDMS tarkibida esa mikrostrukturaviy tartib buzilib, yirik va notekis domenlar shakllandi. Shu bilan birga, sirt notekisligi va fazaviy nomutanosiblik sezilarli darajada ortdi. Bu esa elastomerning yuqori konsentratsiyasi faol qatlam ichida yirik fazalar hosil bo‘lganligini ko‘rsatadi. Umuman olganda, olingan natijalar PDMS tarkibi ortishi bilan faol qatlam mikrostrukturasi sezilarli darajada o‘zgarishlarga sabab bo‘lishi va ushbu o‘zgarishlar mexanik hamda fotoelektrik xususiyatlarga bevosita ta‘sir qilishi mumkin.

PDMS elastomer kiritilishin faol qatlam morfologiyasining o‘zgarishi bilan birga o‘rtacha kvadratik notekislik qiymati (R_q) hamda domenlar o‘lchamlarining ham o‘zgarishlariga sabab bo‘ladi. Shundan kelib chiqib, PDMS elastomer kiritilishining faol qatlam o‘rtacha notekislik qiymati va domen o‘lchamlari tahlil qilindi. PM6:N2200:PDMS asosidagi faol qatlamlarda PDMS tarkibi ortishi bilan turli mikrostrukturaviy o‘zgarishlar kuzatiladi. Birinchi grafikda 0% ya‘ni PDMS kiritilmagan PM6:N2200 tarkibli ikki komponentli donor/akseptor aralashmada $R_q = 1.4$ nm bo‘lib, bu donor va akseptor polimerlarning yuqori agregatsiyasini, sirtning silliq shakllanganini hamda yirik fazaviy ajralish kuzatilmaganligini anglatadi. Bunday bir jinsli morfologiya zaryadlarning uzluksiz harakatlanishi uchun qulay hisoblanadi hamda u fotovoltaiik ko‘rsatkichlarga ham ijobiy ta‘sir ko‘rsatsada mexanik cho‘ziluvchanlikni taminlay olmaydi.



3-rasm. PM6:N2200:PDMS faol qatlam yupqa plyonkalarining AFM tasvirlari

PDMS tarkibi 10% bo'lganda R_q ning qiymati 2.3 nm ni tashkil qilib, PDMS elastomer qo'shimchani faol qatlam tarkibiga kirishi natijasida o'rtacha o'lchamdagi va nisbatan bir tekis taqsimlangan faol qatlam fazalari hosil bo'ldi. Buning natijasida mexanik deformatsiyani yumshatuvchi energiya yutuvchi faol qatlam strukturasi shakllanishi bilan birga, zaryadlar harakatlanishi uchun zarur fazalar ajralishlariga ega o'rtacha o'lchamli domenlar shakllandi. Shu nuqtayi nazardan 10% PDMS tarkibi cho'ziluvchan OFE namunasi mexanik mustahkamlik va fotovoltaiik xossalari o'rtasidagi optimal muvozanat nuqtasi bo'lishi mumkin. Faol qatlamda PDMS tarkibi 30% ni tashkil qilganda esa $R_q = 3.2$ nm ga teng bo'lib, u sirtning topografik notekislik kuchayganini va yirik fazalar hosil bo'lganligini bildiradi. Buning natijasida faol qatlamning uzluksiz tuzilishi buziladi va zaryad tashuvchilarning harakatlanishi cheklanadi. Bu holat fotoelektrik parametrlarning pasayishiga ham sabab bo'lishi mumkin (4 (a)-rasm). Ikkinchi grafikda PDMS domen o'lchamining tarkibga bog'liqligi ko'rsatilgan. 0% PDMS nuqtasida domen o'lchami qiymat berilmagan, chunki faol qatlam tarkibida PDMS fazasi mavjud emas. Domen o'lchami faqat elastomerga tegishli alohida fazaviy hududlar shakllanganda aniqlanadi. Shu sababli 0% nuqta nol qiymat emas, balki o'lchanmaydigan parametr sifatida talqin qilinadi. 10% PDMS tarkibida domen o'lchami taxminan 100 nm bo'lib, elastomerning mayda va yaxshi disperslangan fazalar ko'rinishida taqsimlanganini anglatadi. Bunday domenlar mexanik deformatsiya vaqtida lokal kuchlanishlarni yutish va qayta taqsimlashga yordam beradi. 30% PDMS tarkibida esa domen o'lchami 250 nm ga yaqinlashadi. Bu mayda fazalarning qo'shilib, yirik domenlar hosil qilganini ko'rsatadi. Domenlarning bunday yiriklashuvi fazaviy nomutanosiblikni kuchaytiradi va R_q qiymatining ortishi bilan to'liq mos keladi (4 (b) - rasm).

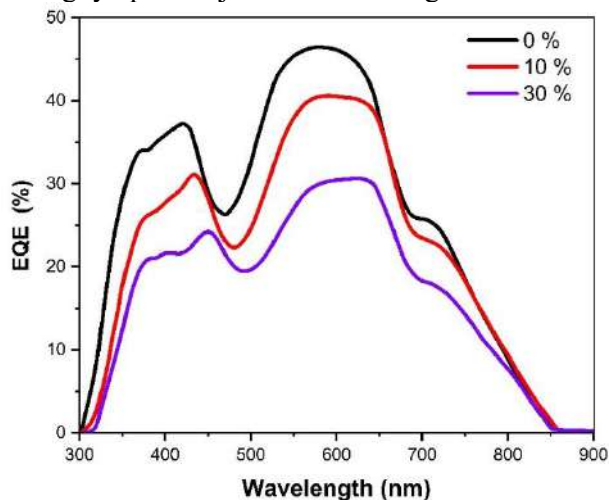


4-rasm. PM6:N2200:PDMS faol qatlam yupqa plyonkalarining R_q va PDMS domen o'lchami grafigi

Umuman olganda, olingan natijalar PM6:N2200:PDMS asosidagi faol qatlamlarda elastomer miqdori ortishi bilan domen o'lchami va sirt notekisligining muntazam ravishda oshib borishini ko'rsatadi. Shu nuqtai nazardan, faol qatlam tarkibidagi PDMS konsentratsiyasini optimallashtirish cho'ziluvchan OFEda mexanik barqarorlik, mikrostrukturaviy yaxlitlik va fotovoltaiik parametrlar o'rtasidagi muvozanatni o'rnatish mumkinligi aniqlandi.

Faol qatlamning morfologik va strukturaviy xususiyatlari tahlil qilingandan so'ng, ular asosidagi fotoelementlarning fotovoltaiik parametrlari o'rganildi. Fotovoltaiik parametrlarni aniqlashda to'liq strukturadagi TPU/PH1000/PEDOT:PSS/PM6:N2200:PDMS/PNDIT-F3N/EGaIn cho'ziluvchan OFE namunasi tayyorlandi. Fotoelementlarning fotovoltaiik parametrlarini aniqlash uchun tok-kuchlanish ($J-V$) xarakteristikalari o'lchandi, shuningdek, tashqi kvant samaradorligi (EQE) spektrlari asosida integrallangan

tok zichligi (J_{SC}) qiymatlari hisoblab chiqildi. EQE dan aniqlangan J_{SC} qiymatlari bilan eksperimental aniqlangan J_{SC} natijalari o'rtasidagi kichik farq o'lchovlarning ishonchligini tasdiqladi. Dastlab fotovoltaiik parametrlarni chuqurroq tahlil qilish uchun 0%, 10% va 30% PDMS tarkibli faol qatlamlar asosidagi fotoelementlarning EQE spektrlari taqqoslab o'rganildi (5-rasm). EQE spektrlari fotoelementning turli to'lqin uzunliklaridagi yutilgan fotonlarning foydali zaryad tashuvchilarga aylanish samaradorligini ko'rsatishi bilan birga, yorug'lik yutilishi, eksiton dissotsiatsiyasi va zaryad tashilish jarayonlarini kompleks tadqiq qilish imkonini beradi. EQE spektrlar bevosita faol qatlamni tashkil qiluvchi PM6 donor va N2200 akseptorlarning optik yutilish sohasida hosil bo'liganligi sabab olingan natijalar ham 300–850 nm oralig'ida qayd qilindi (5-rasm). Olingan natijalarda 0% tarkibli ya'ni PDMS kiritilmagan fotoelement namunasi to'liq spektr bo'yicha eng yuqori, 560–620 nm oralig'ida esa maksimal 45–46% qiymatli EQE spektrlarini namoyon etdi. Bu natija faol qatlamning bir jinsli morfologiyasi hamda uzluksiz zaryad tashilish kanallari shakllangani bilan bog'liq bo'lib, ushbu strukturada yuqori fotovoltaiik qiymatlarga erishilsa-da lekin uning cho'zilishdagi mexanik mustahkamligi yuqori natijalar ko'rsatmasligi mumkin.



5-rasm. PM6:N2200:PDMS faol qatlamlar asosidagi cho'ziluvchan OFElarining EQE spektrlari

Faol qatlamda tarkibiga 10% PDMS kiritilganda EQE spektri 40% gacha pasayib, umumiy spektral shakli o'zgarishsiz qoldi. Bu elastomer qo'shimchasining oz miqdorda kiritilishi fotovoltaiik qiymatlarni keskin yomonlashtirmasligini hamda mexanik deformatsiyaga chidamli struktura hosil qilganligini anglatadi. 30% PDMS tarkibli namunalarda esa EQE qiymatlari butun spektr bo'ylab 30% gacha sezilarli pasayadi. Ushbu o'zgarish elastomerning yuqori konsentratsiyasi faol qatlamda katta o'lchamli domenlar hosil bo'lib mikrostruktura keskin o'zgartirishi bilan bog'liq. Yirik domenlar donor–akseptor interfeys yuzasini kamaytirib, eksiton dissotsiatsiyasini cheklaydi va zaryad tashuvchilarning transport kanallarining yo'qotilishiga olib keladi. Natijada rekombinatsiya ehtimoli ortib, foydali fototok hosil bo'lish samaradorligi pasayadi. Umuman olganda, EQE tahlili natijalari ko'rsatdiki PDMS qo'shimchasining cho'ziluvchan OFE namunalarda mexanik cho'ziluvchanlikni yaxshilash bilan birga fotoelektrik jarayonlarga sezilarli salbiy ta'sir ko'rsatadi.

PM6:N2200:PDMS asosidagi OFElarning mexanik cho'ziluvchanligi va fotovoltaiik xususiyatlari orasidagi o'zaro bog'liqlik qiyosiy tahlil qilindi. Faol qatlam tarkibidagi PDMS miqdorining o'zgarishi nafaqat mexanik cho'ziluvchanlikka, balki fotoelementning asosiy fotoelektrik parametrlariga ham sezilarli ta'sir ko'rsatishi mumkin. Shu jihatdan elastomer qo'shimchasi bir tomondan fotoelementning mexanik cho'ziluvchanligini oshirsa, ikkinchi tomondan faol qatlamning ichki mikrostrukturasini o'zgartirish orqali fotovoltaiik parametrlarga salbiy ta'sir ko'rsatishi mumkin. Shu maqsadda, faol qatlam plyonkalarining mexanik xususiyatlari yorilish deformatsiyasi hamda mexanik mustahkamlik ko'rsatkichlari orqali baholandi. PDMS kiritilmagan (0%) PM6:N2200 ikki komponentli faol qatlam yupqa plyonkasi uchun yorilish deformatsiyasi 8.17%, mexanik mustahkamlik esa 112.70 J/m³ ni tashkil etib, elastomer kiritilmagan yupqa plyonkalar nisbatan mo'rt ekanligi va mexanik deformatsiyaga chidamsiz ekanligi ko'rindi (1-jadval). Faol qatlam tarkibiga 10% PDMS kiritilganda esa yorilish deformatsiyasi 28.69% ga, mexanik mustahkamlik esa 258.28 J/m³ gacha oshib, mexanik ko'rsatkichlarning jiddiy yaxshilanishi kuzatildi. Bu natijalar elastomerning 10% miqdorda kiritilishi hisobiga faol qatlam ichida mexanik kuchlanishni samarali taqsimlovchi va energiya yutuvchi struktura hosil qilganidan dalolat beradi. Morfologik natijalarda AFM

tasvirlarida ko'ringan mayda va nisbatan bir tekis taqsimlangan PDMS domenlari aynan shu mexanik mustahkamlanishning asosiy omillaridan biridir.

1-jadval. Turli PDMS tarkibli faol qatlam yupqa plyonkalarining yorilish deformatsiyasi va mexanik mustahkamlik ko'rsatkichlari

PDMS ulushi (wt%)	Yorilish deformatsiyasi (%)	Mexanik mustahkamlik (J/m ³)
0%	8.17	112.70
10%	28.69	258.28
30%	19.47	102.38

Yupqa plyonka tarkibida PDMS ning ulushi 30% ga yetganda esa mexanik xususiyatlar yomonlashganligi kuzatildi. Ushbu holat ortiqcha PDMS elastomer qo'shimchasi faol qatlamning mexanik yaxlitligini optimal darajada saqlab qola olmasligini bildiradi. Yuqori konsentratsiyada PDMS fazalarining yiriklashuvi natijasida mexanik kuchlanish bir tekis taqsimlanmaydi va natijada elastik faza strukturaviy nomutanosiblikka sabab bo'ladi.

Faol qatlam tarkibiga elastomer qo'shimchasi kiritilishi absorbsion spektrlarga ta'sir o'tkazmasada morfologik, mexanik xususiyatlar bilan birga fotovoltaiik natijalarga turli xil ta'sir o'tkazishi boshqa tadqiqotlarda ham ko'rsatilgan [17]. Faol qatlam faqatgina donor/akseptor aralashmadan iborat bo'lganda, ya'ni 0% PDMS tarkibli fotoelementlarda $V_{OC} = 0.969$ V, $J_{SC} = 10.55$ mA/cm², $J_{CAL} = 10.12$ mA/cm², $FF = 48.72\%$ va $PCE = 4.98\%$ fotovoltaiik parametrlar qayd etilib, EQE spektrlar asosida hisoblangan J_{CAL} qiymatining eksperimental aniqlangan J_{SC} qiymatiga yaqin ekanligi aniqlandi. Mazkur faol qatlamda elastomer mavjud bo'lmasa-da, donor va akseptor domenlar yuqori fazaviy ajralishlar bilan uzluksiz zaryad tashilish kanallari hisobiga nisbatan yuqori fotovoltaiik ko'rsatkichlarga erishildi. Faol qatlamga 10% ulushda PDMS kiritilgan namunalarda fotovoltaiik ko'rsatkichlar ma'lum darajada pasayishi kuzatilib, $V_{OC} = 0.944$ V, $J_{SC} = 9.68$ mA/cm², $J_{CAL} = 9.53$ mA/cm², $FF = 46.77\%$ va $PCE = 4.69\%$ qiymatlarni tashkil etdi (2-jadval). Elastomer kiritilmagan namunaga nisbatan ushbu namunada asosiy o'zgarish J_{SC} qiymatida kuzatilgan bo'lib, bu yirik domenlar hisobiga past fazaviy ajralishlar hisobiga sodir bo'lganligini ko'rsatadi hamda morfologik tasvirlar ham ushbu faktlarni tasdiqlaydi. Biroq ushbu namunalarning mexanik mustahkamligi 2 - 3 marotaba ortganligi hisobga olinsa fotoelementning samaradorligi yuqori darajada saqlanib qolganligi muhim ahamiyatga ega. Bu natija faol qatlamga 10 % miqdorida PDMS kiritilishi zaryad tashilish yo'llarini to'liq buzmasdan, qo'shimcha ravishda faol qatlamning mexanik xususiyatlarini yaxshilaganligini ifodalaydi. Shu sababli faol qatlam tarkibiga 10% PDMS kiritilishi cho'ziluvchan fotoelementning mexanik va fotovoltaiik xususiyatlari o'rtasidagi eng optimal muvozanat nuqtasi ekanligi aniqlandi.

2-jadval. Turli PDMS tarkibli PM6:N2200:PDMS faol qatlamlar asosidagi cho'ziluvchan OFElarning fotovoltaiik parametrlari

PDMS tarkibi (wt%)	V_{OC} (V)	J_{SC} (mA/cm ²)	J_{CAL} (mA/cm ²)	FF (%)	PCE (%)
0%	0.969	10.55	10.12	48.72	4.98
10%	0.944	9.68	9.53	46.77	4.69
30%	0.938	8.41	8.52	37.19	2.94

Faol qatlam tarkibiga 30% PDMS kiritilganda esa fotovoltaiik ko'rsatkichlar sezilarli ravishda yomonlashib $J_{SC} = 8.41$ mA/cm² va $PCE = 2.94\%$ gacha pasaydi. Ushbu qiymatlarning keskin pasayishi faol qatlam ichki mikrostrukturasi va fazaviy ajralishlardagi optimallik buzilganini bilan bog'liq bo'lib, yirik domenlar hosil bo'lishi zaryad tashuvchilarning harakatlanish yo'llarini kamaytiradi va rekombinatsiya ehtimolini oshiradi. Natijada foydali fototok hosil bo'lishi hamda energiya o'zgartirish samaradorligi keskin pasayadi. Optik, morfologik, mexanik va fotovoltaiik natijalarning kompleks tahlili shuni ko'rsatadiki, faol qatlam tarkibida PDMS miqdorining ortishi bilan dastlab mexanik xususiyatlar yaxshilanadi, biroq ma'lum chegaradan keyin domenlar optimal o'lchamdan kattalashgandan keyin ortiqcha elastomer fotoelektrik jarayonlarga salbiy ta'sir ko'rsata boshlaydi. Umuman olganda, biz tadqiq qilgan PM6:N2200:PDMS tarkibli namunalarda ichida 10% PDMS ulushga ega faol qatlam asosidagi cho'ziluvchan fotoelement fotovoltaiik va mexanik xususiyatlar muvozanatlashgan optimal struktura ekanligi aniqlandi. Ushbu namunada mexanik xususiyatlar sezilarli darajada yaxshilanishi bilan birga fotovoltaiik qiymatlar nisbatan yuqori darajada saqlanib qoldi.

Xulosa. Ushbu tadqiqotda PM6:N2200 faol qatlamlar asosidagi cho'ziluvchan OFElarda PDMS elastomer qo'shimchasining mikrostrukturaviy, mexanik va fotovoltaik xususiyatlarga ta'siri kompleks ravishda o'rganildi. PM6 donor, N2200 akseptor va PDMS elastomer materiallarining absorpsion spektrlari o'rganilganda donor va akseptor o'zaro to'ldiruvchi yutilish spektrlariga ega bo'lib, keng spektral diapazonda yorug'likni samarali yutishi hamda sof PDMS materiali esa yuqori shaffofligi hisobiga deyarli yorug'lik yutmasligi aniqlandi. Faol qatlam yupqa plyonkalarining AFM tasviri hamda morfologik natijalardan aniqlandiki 10% PDMS ulushda ega faol qatlamda sirt notekisligi $Rq = 2.3 \text{ nm}$, domen o'lchami 100 nm va nisbatan optimal fazaviy ajralishlarga erishish mumkin. Faol qatlamning mexanik mustahkamligi o'rganilganda 10% PDMS ulushga ega namunada yorilish deformatsiyasi va mexanik mustahkamlik mos ravishda 3,5 va 2,3 martagacha oshib, mexanik ko'rsatkichlarning jiddiy yaxshilanishi kuzatildi. Bu natijalar elastomerning 10% miqdorda kiritilishi hisobiga faol qatlam ichida mexanik kuchlanishni samarali taqsimlovchi struktura hosil qilganidan dalolat beradi. PM6:N2200:PDMS tarkibli faol qatlamlar asosidagi cho'ziluvchan fotoelementning fotovoltaik ko'rsatkichlari (EQE va $J-V$) qiyosiy tadqiq qilinganda faol qatlamdagi PDMS ning ulushi ortishi bilan EQE spektr intensivligi hamda V_{OC} , J_{SC} , FF va PCE qiymatlar ham bosqichma-bosqich kamayishi aniqlandi. Biroq 10% PDMS kiritilgan namunada mexanik mustahkamlik sezilarli yaxshilangan holda $PCE = 4.69\%$ darajada saqlanib qoldi. Umuman olganda, PM6:N2200:PDMS faol qatlam tarkibida elastomer miqdorining optimal qiymati 10% ekanligi aniqlanib, ushbu qiymat cho'ziluvchan organik fotoelementlarda mexanik barqarorlik, mikrostrukturaviy yaxlitlik va yuqori fotoelektrik samaradorlik o'rtasidagi muvozanat nuqtasi ekanligi aniqlandi. Ushbu natijalar kelajakda cho'ziluvchan elektronika va egiluvchan energiya manbalari uchun samarali cho'ziluvchan organik quyosh elementlarini yaratishda muhim ilmiy-amaliy asos bo'lib xizmat qiladi.

Minnatdorchiilik. Ushbu tadqiqot O'zRFA U.A. Arifov nomidagi Ion-plazma va lazer texnologiyalari instituti bazaviy moliyalashtirish mablag'lari ko'magida hamda Oliy ta'lim, fan va innovatsiyalar vazirligi huzuridagi innovatsion rivojlanish agentligi tomonidan moliyalashtirilgan AL-8724053065 va FL-9024093524 loyihalari ko'magida tayyorlandi.

ADABIYOTLAR:

1. Xiang, S.; Zhang, N.; Fan, X. *From Fiber to Fabric: Progress Towards Photovoltaic Energy Textile. Adv. Fiber Mater.* 2021, 3, 76–106.
2. Zhang, J.; Mao, H.; Zhou, K.; Zhang, L.; Luo, D.; Wang, P.; Ye, L.; Chen, Y. *Polymer-Entangled Spontaneous Pseudo-Planar Heterojunction for Constructing Efficient Flexible Organic Solar Cells. Adv. Mater.* 2024, 36, 2309379.
3. Song, W.; Ye, Q.; Chen, Z.; Ge, J.; Xie, L.; Ge, Z. *Advances in Stretchable Organic Photovoltaics: Flexible Transparent Electrodes and Deformable Active Layer Design. Adv. Mater.* 2024, 36, 2311170.
4. Y. Y. Yu, C. H. Chen, C. C. Chueh, C. Y. Chiang, J. H. Hsieh, C. P. Chen, W. C. Chen, *ACS Appl. Mater. Interfaces* 2017, 9, 27853.
5. Y. T. Hsieh, J. Y. Chen, S. Fukuta, P. C. Lin, T. Higashihara, C. C. Chueh, W. C. Chen, *ACS Appl. Mater. Interfaces* 2018, 10, 21712.
6. Z. Jiang, K. Fukuda, W. C. Huang, S. Park, R. Nur, M. O. G. Nayeem, K. Yu, D. Inoue, M. Saito, H. Kimura, T. Yokota, S. Umezue, D. Hashizume, I. Osaka, K. Takimiya, T. Someya, *Adv. Funct. Mater.* 2019, 29, 1808378.
7. Q. L. Zhu, J. W. Xue, L. Zhang, J. L. Wen, B. J. Lin, H. B. Naveed, Z. Z. Bi, J. M. Xin, H. Zhao, C. Zhao, K. Zhou, S. Z. Liu, W. Ma, *Small* 2021, 17, 2007011.
8. J. Noh, G. U. Kim, S. Han, S. J. Oh, Y. Jeon, D. Jeong, S. W. Kim, T. S. Kim, B. J. Kim, J. Y. Lee, *ACS Energy Lett.* 2021, 6, 2512.
9. Z. Y. Wang, M. C. Xu, Z. L. Li, Y. R. Gao, L. Yang, D. Zhang, M. Shao, *Adv. Funct. Mater.* 2021, 31, 1903609.
10. Z. Y. Wang, D. Zhang, M. C. Xu, J. F. Liu, Jiayi He, L. P. Yang, Z. L. Li, Y. R. Gao, M. Shao, *Small* 2022, 18, 2201589.
11. J. W. Lee, G. U. Kim, D. J. Kim, Y. Jeon, S. Li, T. S. Kim, J. Y. Lee, B. J. Kim, *Adv. Energy Mater.* 2022, 12, 2200887.
12. J. Huang, Z. Lu, J. He, H. Hu, Q. Liang, K. Liu, Z. Ren, Y. Zhang, H. Yu, Z. Zheng and G. Li, *Energy Environ. Sci.*, 2023, 16, 1251-1263.

PHYSICS

13. S. Lee, Y. Jeon, S. Y. Lee, B. S. Ma, M. Song, D. Jeong, J. Jo, G. U. Kim, J. Lee, T. S. Kim, B. J. Kim and J. Y. Lee, *Adv. Energy Mater.*, 2023, 13, 2300533.
14. J. W. Lee, C. Lim, S. W. Lee, Y. Jeon, S. Lee, T. S. Kim, J. Y. Lee and B. J. Kim, *Adv. Energy Mater.*, 2022, 12, 2202224.
15. H. J. Kwon, G. U. Kim, C. Lim, J. K. Kim, S. S. Lee, J. Cho, H. J. Koo, B. J. Kim, K. Char and J. G. Son, *ACS Appl. Mater. Interfaces*, 2023, 15, 13656-13667.
16. X. Zheng, X. Wu, Q. Wu, Y. Han, G. Ding, Y. Wang, Y. Kong, T. Chen, M. Wang, Y. Zhang, J. Xue, W. Fu, Q. Luo, C. Ma, W. Ma, L. Zuo, M. Shi and H. Chen, *Adv. Mater.*, 2023, 36, 2307280.
17. Bing Sun, Xin Li, Wenchao Zhao, Kai Zhang, Saimeng Li, Chunlong Sun, Vakhobjon Kuvondikov, Sherzod Nematov, Menglan Lv, Long Ye. *Adv. Funct. Mater.* 36, no. 6 (2026): e12584.

**InAs GETEROSTRUKTURALI DIODLARNING TASHQI TA'SIRLAR NATIJASIDA
PARAMETRLARINI O'ZGARISHI****Gulomov Gafur,**

Namangan davlat texnika universiteti professori

Majidova Gulnoza Nurmuxamedovna,

Namangan davlat texnika universiteti dotsenti

Madumarova Saodat Qudiratulla qizi,

Namangan davlat texnika universiteti kafedra tayanch doktoranti

sgmadumarova@gmail.com

Аннотация. Ushbu maqolada InAs geterostruktura asosida olingan yarimo'tkazgichli diodlarning Volt-Amper harakteristikasini tashqi ta'sirlar natijasida o'zgarishi ko'rilgan. Ya'ni olingan na'munalarga yorug'likning yarimo'tkazgichli diod sirtiga notekis taqsimlanib tushishi natijasida yarimo'tkazgichda zaryad tashuvchilar ya'ni, elektron va kovaklarning yuzaga keladigan notog'ri taqsimoti natijasida kuzatiladigan Dember effektini geterostruktura asosida olingan yarimo'tkazgichli diodning Volt-Amper harakteristikasiga ta'sirlari tahlil etilgan. Dember effekti yuzaga kelishi natijasida haroratning ortib borishi zaryad tashuvchilarning harakatchanligini o'zgarib borishi yarimo'tkazgichda qo'shimcha kuchlanish hosil bo'lishiga va namunaning potensial to'siq balandligini boshqarish imkonini bergan. Taqdim etilgan maqolada yuqorida keltirilgan xulosalar nazariy jihatdan asoslab, ularning grafiklari ham keltirilgan.

Калит so'zlar. yarimo'tkazgich, geterostruktura, Dember effekti, zaryad tashuvchilar, elektron, kovak, harakatchanlik, VAX-Volt-Amper xarakteristika, potensial to'siq.

**ИЗМЕНЕНИЕ ПАРАМЕТРОВ ГЕТЕРОСТРУКТУРНЫХ ДИОДОВ InAs В РЕЗУЛЬТАТЕ
ВНЕШНИХ ВОЗДЕЙСТВИЙ**

Аннотация. В данной статье исследуется изменение вольт-амперных характеристик полупроводниковых диодов на основе гетероструктур InAs в результате внешних воздействий. Анализируются эффекты эффекта Дембера, наблюдаемого в результате неравномерного распределения носителей заряда, то есть электронов и дырок, в полупроводнике вследствие неравномерного распределения света на поверхности полупроводникового диода, на вольт-амперные характеристики полупроводниковых диодов на основе гетероструктур. В результате возникновения эффекта Дембера повышение температуры изменяет подвижность носителей заряда, что позволяет формировать дополнительное напряжение в полупроводнике и контролировать высоту потенциального барьера образца. В представленной статье теоретически обосновываются вышеизложенные выводы и приводятся их графики.

Ключевое слово. полупроводник, гетероструктура, эффект Дембера, носители заряда, электрон, дырка, подвижность, VAX-вольт-амперная характеристика, потенциальный барьер.

**CHANGE OF PARAMETERS OF InAs HETEROSTRUCTURE DIODES AS A RESULT OF
EXTERNAL INFLUENCES**

Abstract. This article examines changes in the current-voltage characteristics of semiconductor diodes based on InAs heterostructures as a result of external influences. It analyzes the effects of the Dember effect, observed as a result of the uneven distribution of charge carriers (i.e., electrons and holes) in the semiconductor due to the uneven distribution of light on the semiconductor diode surface, on the current-voltage characteristics of semiconductor diodes based on heterostructures. As a result of the Dember effect, an increase in temperature alters the mobility of charge carriers, which allows for the generation of additional voltage in the semiconductor and the control of the potential barrier height of the sample. This article provides a theoretical justification for the above conclusions and presents their graphs.

Keywords: semiconductor, heterostructure, Dember effect, charge carriers, electron, hole, mobility, VAX-Volt-Ampere characteristic, potential barrier.

Kirish. Hozirgi kunda eng so'nggi zamonaviy texnologiyalardan biri bo'lgan fotodetektorlarni ishlatishda dember effektidan keng foydalaniladi. Dember effekti — bu yarimo'tkazgich materiallarida yorug'lik ta'sirida hosil bo'ladigan fotoelektrik hodisa bo'lib, unda elektronlar va teshiklarning harakatlanish tezliklari farqi tufayli elektr maydon yuzaga keladi. Ushbu effekt nemis fizigi Garri Dember tomonidan 1920-yillarda kashf etilgan [2]. Hozirgi kunda bu effekt yuqori chastotali texnologiyalar, ayniqsa teraherts (THz) diapazonidagi qurilmalarda keng qo'llaniladi. Yarimo'tkazgich material yorug'lik bilan yoritilganda, fotonlar energiyasi yetarli bo'lsa, valent zonasidan o'tkazuvchanlik zonasiga elektronlar o'tadi va natijada erkin elektronlar hamda teshiklar paydo bo'ladi. Elektronlarning harakatchanligi yuqori bo'lganligi sababli ular teshiklarga nisbatan tezroq harakatlanadi. Bu esa zaryadlar ajralishiga olib keladi va material ichida ichki elektr maydon — Dember maydoni — hosil bo'ladi [3]. Dember kuchlanishi quyidagi formulaga asosan aniqlanadi:

$$V_k = \frac{kT}{e} \ln \frac{\mu_n}{\mu_p} \quad (1)$$

Bu ifodada V_k - Dember kuchlanishi, k - Boltsman doimiysi, T -absolyut harorat (Kelvin), e -

elektron zaryadi, μ_n -elektron harakatchanligi, μ_p -teshik harakatchanligi.



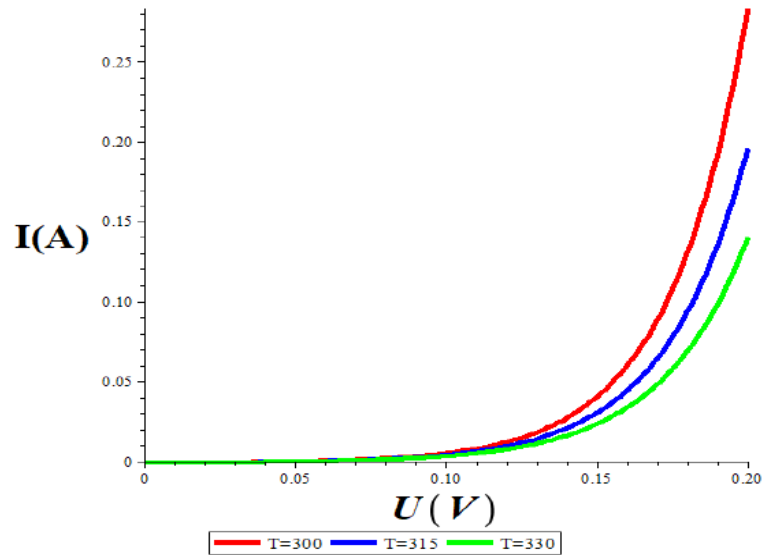
1-rasm. Dember effektini hosil bo'lishi.

Muhokama. Dember effekti natijasida yuzaga keladigan dember kuchlanishi unchalik katta qiymatga ega bo'lmaganligi sababli hali bu effekti chuqur o'rganilmagan. Chunki odatda nazariy jihatdan yarimo'tkazgich sirtiga yorug'lik doimo bir xilda taqsimlanadi deb qaralgan va shunga ko'ra yarimo'tkazgichga yorug'lik ta'sirlari umumiy jihatdan parametrlarini o'zgarishi ko'rib chiqilgan. Ushbu maqolada shu dember effekti ham hisobga olingan.

Natijalar. Ushbu ifodani yarimo'tkazgichlarga yorug'lik ta'sirini Volt-Amper harakteristikasiga ta'sirini ko'radigan bo'lsak [5], (1) ifoda quyidagi ko'rinishni oladi.

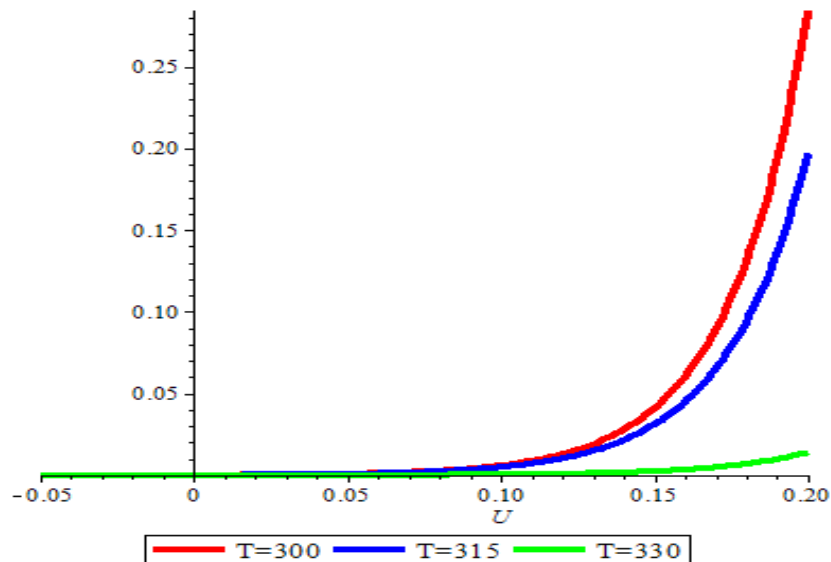
$$J = J_s \left(\frac{T}{T_0}\right)^3 e^{\left(\frac{E_g e}{kT} \left(1 - \frac{T}{T_0}\right)\right)} \left(e^{\frac{eU + \frac{kT}{e} \ln \frac{\mu_n}{\mu_p}}{kT}} - 1 \right) - J_f \quad (2)$$

(2) ifoda grafigiga harorat ta'siri ko'radigan bo'lsak va yarimo'tkazgich to'laligicha qiziydi deb olsak, u holda grafikni quyidagicha surilishini ko'rishimiz mumkin [1].



2-rasm. Yarimo'tkzgidcha dember effektiga harorat ta'siri

Grafikdan ko'rinib turibdiki, dember effektiga harorat ta'sir ettirganimizda yarimo'tkzgidchadagi zaryad tashuvchilar tezligi ortadi, bu esa harakatchanlik ortishiga olib keladi. Zaryad tashuvchilar harakatchanligi ortishi hisobiga uning VAX ni o'zgarish grafigini oladigan bo'lsak quyidagicha natijani olishimiz mumkin.

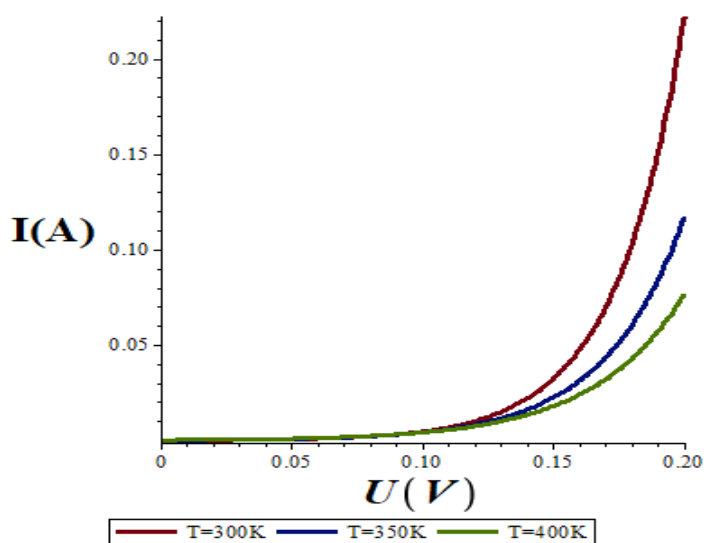


3-rasm. Zaryad tashuvchilar harakatchanligini ortishi hisobiga diodning VAX ini o'zgarishi

Dember effektiga temperatura ta'sirida VAX o'zgarishini tahlil etsak, agar zaryad tashuvchilar temperaturasi fanonning temperaturasidan farqli ravishda ortirib berilsa, quyidagi o'zgarishlari namoyon bo'ladi.

Agar zaryad tashuvchilarning harakatchanligi bir-biridan farq qilib temperaturani o'zgarishi harakatchanliklarni dastlabki holatidan o'zgartirmaydi deb qaralsa, ya'ni $T_1 < T_2 < T_3$, $\mu_{n1} = \mu_{n2} = \mu_{n3}$, $\mu_{p1} = \mu_{p2} = \mu_{p3}$ holda temperaturani ortirib borilsa-da tokning davriy ravishda kamayib borishi kuzatiladi. Temperaturaning oshib borishi kuchlanishni ortirib, potensial to'siqning balandligini davriy ravishda ortishiga sabab bo'ladi. Aksincha temperaturani ortishida harakatchanliklarni o'zgarishi T_1 uchun μ_{n1} , μ_{p1} , T_2 uchun μ_{n2} , μ_{p2} , T_3 uchun μ_{n3} , μ_{p3} holatda o'zgaradi olinsa u holda $T_1 < T_2 < T_3$, $\mu_{n1} < \mu_{n2} < \mu_{n3}$, $\mu_{p1} < \mu_{p2} < \mu_{p3}$ shartlarga asosan toklarning bir-biridan keskin farq qilib kamayishiga, kuchlanish ortishiga va potensial to'siq balandligiha keskin ortishiga olib keladi. Yanada harorat ortganda zaryad tashuvchilarning harakatchanligi kamayadi. Ya'ni $T_1 < T_2 < T_3$, $\mu_{n1} > \mu_{n2} > \mu_{n3}$, $\mu_{p1} > \mu_{p2} > \mu_{p3}$. Sababi fononlarning tebranishi ortib, tashuvchilarni

tarqalishiga to'sqinlik qiladi. Bu harakatchanliklar orasidagi farqni kamaytirib, Dember effektini kuchayishiga to'sqinlik qiladi.



4-rasm. Harorat ortishi bilan diodning VAX ning o'zgarishi

Grafikdan ko'rinib turibdiki, haroratning tez fursatda ortishi yarimo'tkazgichli diodning VAXini davriy o'zgartirib borishi vat ok kuchini kamayib ketishini oldingi grafiklarga qarab solishtirish mumkin. Shuning uchun namunaga qarab haroratni orttirish yoki kamaytirish orqali Dember effektini boshqarish mumkin. Ushbu xulosa zamonaviy optoelektronika va fotonika sohalarida katta ahamiyatga ega bo'lgan hodisadir. U fizik asoslarining nisbatan sodda bo'lishiga qaramay, yuqori texnologiyali qurilmalarda keng qo'llanilmoqda. Kelajakda ushbu effekt asosida yangi avlod sensorlar va tasvirlash texnologiyalari yaratilishi kutilmoqda.

ADABIYOTLAR:

1. Zhang, X.-C., & Xu, J. (2010). *Introduction to THz Wave Photonics*. doi:10.1007/978-1-4419-0978-7 (<https://doi.org/10.1007/978-1-4419-0978-7>)
2. Шалимова К. В., *Физика полупроводников // М. Энергоатомиздат, 1985, с. 113.*
3. Егуазарян Г., Стафеев В., *Магнитодиоди и магнитотранзистори и их применение // М. Радио и связь, 1987, с. 26.*
4. Chen J., Zhang X., Luo Z., Wang J., Piao H-G. *Large positive magnetoresistance in germanium// Journal of Applied Physics 2014. 116, 114511 pp. 1-5 <http://dx.doi.org/10.1063/1.4896173>*
5. Gulyamova G., Majidova G., R. Muhitdinovac F., Madumarova S. *Diodning volt-amper xarakteritikasini turli ta'sirlarga sezgirliigi // NamDU ilmiy axborotnoma 2022 5-son. 38-46-b.*
6. Gulyamov G., Majidova G. *Changes in diodes with a p-n-transition under the influence of microwave radiation // AIP Conference Proceedings 2023. 2700, 050008. pp. 1-5 <https://doi.org/10.1063/5.0126385>*
7. G. Gulyamov, Q. Umarov, A. Soliyev, B. Shahobiddinov, *Influence of heating of charge carriers on the contact resistance of the Schottky barrier, In AIP Conference Proceedings Vol. 2924, 1, 050006. (2024). AIP Publishing LLC. <https://doi.org/10.1063/5.0181554>.*
8. M.G'. Dadamirzaev, M.O. Kosimova, A. Makhmudov, *Effect of Variation of Non-ideal Ratio on Electrical Properties of PN-Junction in Strong Microwave Field, Iran. J. Mater. Sci. Eng., 21(4). (2024). <https://doi.org/10.22068/ijmse.3243>.*
9. G. Gulyamov, G. Majidova, *Romanian journal of Physics 68, (3-4), 110-115 (2023). https://rjp.nipne.ro/2023_68_3-4/RomJPhys.68.607.pdf.*
10. G. Gulyamov, F. Mukhitdinova, G. Majidova, *Changing the Voltage of the p-n Junction in a Magnetic Field, e-Journal of Surface Science and Nanotechnology. (2023). <https://doi.org/10.1380/ejsnt.2023-047>.*
11. Gulyamov, G., Majidova, G., & Muhitdinova, F. (2024). *Influence of a magnetic field on the characteristics of ap-n junction diode. J. Appl. Sci. Eng, 27, 1911-1917.*

NANOSEKUND IMPULSLI LAZER YORDAMIDA N-TIP KREMNIY NAMUNALARNING LIBS SPEKTRAL VA PLAZMA XUSUSIYATLARINI TADQIQ ETISH

Matkarimova Shoira Umidbekovna,
Urganch davlat universiteti tayanch doktoranti
matkarimova_shoira@urdu.uz

Vapayev Murodbek Ergashovich ,
Urganch davlat universiteti elektrotexnika va energetika kafedrası dotsenti, PhD
Davletov Ikram Yusubovich,
Urganch davlat universiteti elektrotexnika va energetika kafedrası professori, f-m.f.d.

Annotatsiya. Ushbu ishda n-tip Kremniy namunalarning nanosekund impulsli lazer ta'sirida hosil bo'ladigan plazma emissiya xususiyatlari Laser-Induced Breakdown Spectroscopy (LIBS) usuli yordamida tadqiq etildi. Tajriba 1064 nm to'lqin uzunlikda, 120 ns impuls davomiylikka ega RAYSIS 50W lazer qurilmasida qo'llanildi. Olingan spektrlar asosida p-tip va n-tip kremniy atom chiziqlarining spektr yarim kengligi (FWHM) aniqlandi hamda Stark kengayishi orqali plazmadagi elektron zichligi baholandi. Plazma temperaturasi Boltsman usuli asosida aniqlandi. Natijalar dopant turiga bog'liq holda spektral chiziqlar profili, emissiya intensivligi va plazma parametrlari sezilarli farqlanishini ko'rsatdi. Ushbu tadqiqot yarimo'tkazgichlarda nanosekund lazer–modda o'zaro ta'sir mexanizmlarini chuqurroq talqin qilish hamda LIBS usulining n-tip kremniylarni tezkor diagnostika qilishdagi amaliy imkoniyatlarini kengaytirishga xizmat qiladi. Shuningdek, eksperiment davomida plazmaning asosiy parametrlari, jumladan, plazma zichligi, spektr yarim kengligi, elektronlar temperaturasi kabi kattaliklar hisoblanildi.

Kalit so'zlar: nanosekund impulsli lazer abilatsiyasi, n-tip Kremniy, plazma zichligi, elektron zichlik, spektr yarim kengligi.

INVESTIGATION OF LIBS SPECTRAL AND PLASMA CHARACTERISTICS OF N-TYPE SILICON SAMPLES USING A NANOSECOND PULSED LASER

Abstract. In this study, the plasma emission characteristics generated from n-type silicon samples under nanosecond pulsed laser irradiation were investigated using the Laser-Induced Breakdown Spectroscopy (LIBS) technique. The experiment was carried out using a RAYSIS 50W laser system operating at a wavelength of 1064 nm with a pulse duration of 120 ns. Based on the obtained spectra, the full width at half maximum (FWHM) of spectral lines of both p-type and n-type silicon atoms was determined, and the electron density in the plasma was estimated via Stark broadening. The plasma temperature was evaluated using the Boltzmann method. The results demonstrated that the spectral line profiles, emission intensities, and plasma parameters exhibit significant variations depending on the dopant type. This study contributes to a deeper understanding of nanosecond laser–matter interaction mechanisms in semiconductors and expands the practical applicability of the LIBS technique for rapid diagnostics of n-type silicon. Additionally, key plasma parameters, including plasma density, spectral line broadening, and electron temperature, were calculated during the experiment.

Keywords: Nanosecond pulsed laser ablation, n-type silicon, plasma density, electron density, full width at half maximum (FWHM).

ИССЛЕДОВАНИЕ СПЕКТРАЛЬНЫХ И ПЛАЗМЕННЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ОБРАЗЦОВ КРЕМНИЯ N-ТИПА С ПОМОЩЬЮ НАНОСЕКУНДНОГО ИМПУЛЬСНОГО ЛАЗЕРА МЕТОДОМ LIBS

Аннотация. В данной работе с помощью метода Laser-Induced Breakdown Spectroscopy (LIBS) исследованы эмиссионные свойства плазмы, образующейся под воздействием наносекундного импульсного лазера на образцы кремния n-типа. Эксперимент проводился с использованием лазерной установки RAYSIS 50W с длиной волны 1064 нм и длительностью импульса 120 нс. На основе полученных спектров были определены полуширины спектральных линий (FWHM) атомов кремния p-типа и n-типа, а также оценена электронная плотность плазмы посредством уширения Штарка. Температура плазмы была определена методом Больцмана. Результаты показали, что профиль

спектральных линий, интенсивность эмиссии и параметры плазмы существенно различаются в зависимости от типа легирующей примеси. Данное исследование способствует более глубокому пониманию механизмов взаимодействия наносекундного лазерного излучения с веществом в полупроводниках, а также расширяет практические возможности метода LIBS для экспресс-диагностики кремния n-типа. Кроме того, в ходе эксперимента были рассчитаны основные параметры плазмы, включая плотность плазмы, полуширину спектральных линий и электронную температуру.

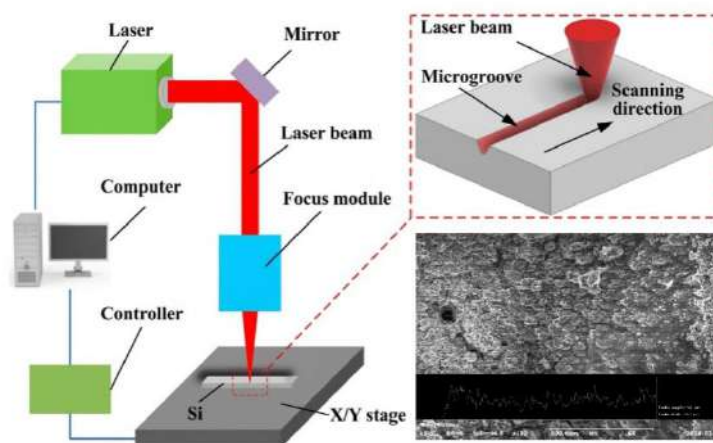
Ключевые слова: наносекундная импульсная лазерная абляция, кремний n-типа, плотность плазмы, электронная плотность, полуширина спектральной линии.

Кирish. Hozirgi vaqtda lazer texnologiyalarining jadal taraqqiyoti yuqori energiyali nurlanishning kondensirlangan muhitlar bilan o'zaro ta'sir mexanizmlarini fundamental va amaliy jihatdan o'rganishda yangi ufqlar ochmoqda. Xususan, nanosekundli impulsli lazer nurlanishining qattiq jism sirtiga ta'siri natijasida yuzaga keladigan lokal ablyatsiya jarayoni va undan keyingi plazma evolyutsiyasi zamonaviy fotonika hamda materialshunoslikning eng dolzarb yo'nalishlaridan biri hisoblanadi[1-6]. Lazer nurlanishining n-tip kremniy (n-Si) kabi yarimo'tkazgichli materiallar sirtiga tushishi nafaqat modda tarkibini bug'latish, balki sirtqi qatlamda murakkab fizik-kimyoviy o'zgarishlarni, jumladan, nanostrukturalar shakllanishi va optik xususiyatlarning modifikatsiyalanishini keltirib chiqaradi.

Ushbu tadqiqotlar doirasida Lazer-induksiyalangan emission spektral tahlil (LIBS) usuli o'zining operativligi, namunaga minimal darajada shikast yetkazishi va masofadan turib bir vaqtning o'zida ko'p elementli tahlilni amalga oshira olishi bilan ajralib turadi. Nanosekundli impulslar yordamida kremniy namunalarini tadqiq etish, plazma mash'alining (plasma plume) elektron zichligi (N_e) va plazma harorati (T_e) kabi fundamental parametrlarini aniqlash imkonini beradi[7-9].

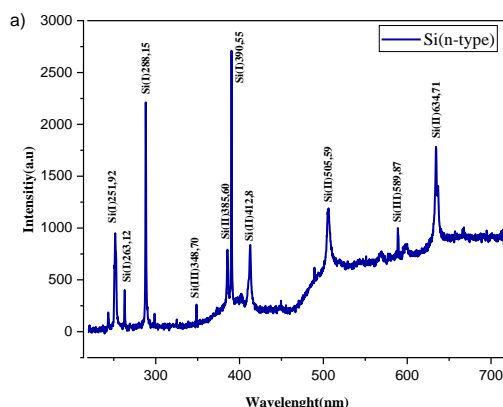
Bu esa o'z navbatida, mikroelektronika va quyosh energetikasi qurilmalarining samaradorligini oshirish uchun zarur bo'lgan sirtqi nanostrukturalarni shakllantirish jarayonlarini optimallashtirishda hal qiluvchi rol o'ynaydi. Bundan tashqari, lazer-induksiyalangan plazmaning spektral xususiyatlarini o'rganish orqali materialning elementar tarkibini yuqori aniqlikda tahlil qilish, n-tip kremniy kristallaridagi zaryad tashuvchilarning rekombinatsiyasi va sirtqi energetik sathlarning o'zgarishini nazorat qilish mumkin. Nanosekundli rejimda energiya zichligini boshqarish orqali material sirtida lazer-induksiyalangan davriy sirt strukturalarini (LIPSS) hosil qilish, sirtning optik yutilish koeffitsiyenti va mexanik mustahkamligini sezilarli darajada o'zgartiradi[10-13]. Ushbu maqolada nanosekundli Nd:YAG lazerining n-tip kremniy namunalariga ta'siri natijasida hosil bo'lgan plazma spektrlarining intensivligi va kengayishi tahlil qilinib, plazma xususiyatlarining lazer impulsi energiyasiga bog'liqlik qonuniyatlari ilmiy jihatdan asoslab beriladi.

Metodologiya. Mazkur ishda n-tip Kremniy namunalarning nanosekund impulsli lazer ta'sirida hosil bo'ladigan plazma emissiya xususiyatlari Laser-Induced Breakdown Spectroscopy (LIBS) usuli yordamida tadqiq etildi. Tadqiqotda to'lqin uzunligi 1064 nm va impuls davomiyligi 120 ns bo'lgan Ytterbiy (Yb) ionlari bilan legirlangan tolali lazer manbai nurlanishi qo'llanildi. Eksperiment uchun namuna sifatida qalinligi 680 mkm bo'lgan n-tip va 3,72 mm bo'lgan p-tip Kremniy tanlandi. Lazer nurlanishi 2 ta namuna uchun ham bir xil sharoitda quvvati 25 W, va yig'uvchi linza fokus masofasi 22,5 cm qilib tanlab olindi. Hosil bo'lgan plazmaning ekremniysion parametrlarini nur tolali optik spektrometr (Ocean Optics HR-4000) yordamida tahlil qilindi.



1-rasm. Tajriba sxemasi

Ushbu usul kremniy ionlarining o‘tish liniyalaridagi o‘zgarishlarni tahlil qilish orqali plazmaning asosiy parametrlaridan biri bo‘lgan elektron konsentratsiyasini aniqlashda samarali vosita sifatida foydalanildi. Natijada, plazma holatining aniq tavsiflarini olish imkoniyati yaratilib, bu lazer ablatsiyasi jarayonlari va u bilan bog‘liq fizika hodisalarini yanada chuqur tushunishga yordam beradi. Olingan plazma spektri tarkibida Si I, Si II, Si III zaryadli ionlardan hosil bo‘ladigan ion o‘tishlari mavjudligini ko‘rsatdi (2-rasm). Plazma spektrlariga mos keluvchi **kremniy ionlari** uchun **to‘lqin uzunliklar** va ular bilan bog‘liq o‘tish chiziqlarining **kengliklari** aniqlanib, bu kattaliklar orqali plazmadagi **erkin elektronlar konsentratsiyasini** aniqlash imkoniyati yaratildi. Bunda **Shtark kengayish usuli** qo‘llanildi. Shtark kengayishi — plazmadagi elektr maydonlari ta’sirida spektr chiziqlarining **kengayishi va siljishini** ifodalovchi hodisa bo‘lib, erkin elektronlar zichligi to‘g‘risida **miqdoriy ma’lumot** olish imkonini beradi.



2-rasm. Lazer nurlanish quvvati 25W bo‘lganda n-tip Si plazma emissiya spektrlari

Elektron zichligi va FWHM (full widths at half maximum) spektr yarim kengligi orasidagi farqi ko‘rsatilganidek, Shtark kengaytirilgan chizig‘i quyidagicha bo‘ladi:

$$\Delta\lambda_{\frac{1}{2}} = \left[2W \left(\frac{n_e}{10^{16}} \right) + 3,5A \left(\frac{n_e}{10^{16}} \right)^{\frac{1}{4}} \cdot \left(1 - \frac{3}{4} N_D^{-\frac{1}{3}} \right) W \left(\frac{n_e}{10^{16}} \right) \right]^0 \text{ \AA} \quad (1)$$

bu yerda N_D - plazmadagi Debay radiusi ichidagi erkin zarralar soni A -ionlarni o‘zaro ta’sir parametri, W - elektron ta’sir parametri. Tenglama o‘ng tomonidagi had elektronlarni o‘zaro ta’siridan kengayishni va ikkinchi tomondagi had esa elektron va ionlarni o‘zaro ta’sir parametrlarining koeffitsiyenti hisoblanadi. Vodorodsimon bo‘lmagan ionlar uchun Shtark kengayishi quyidagicha bo‘ladi [14].

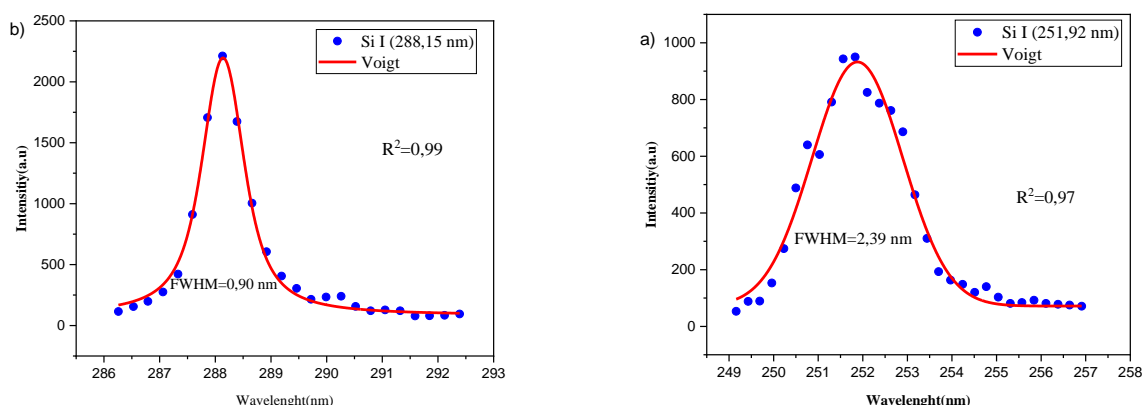
$$\Delta\lambda_{\frac{1}{2}} = 2W \left(\frac{n_e}{10^{16}} \right)^0 \text{ \AA}. \quad (2)$$

$\Delta\lambda_{\frac{1}{2}}$ =FWHM spektr yarim kengligi, n_e -elektron zichligi. Shtark kengayish usulidan foydalanib Si elementini I,II va III zaryadli ion o‘tishlaridan hosil bo‘lgan spektrlar to‘lqin uzunlik qiymatlariga mos keluvchi shkalasi yordamida elektron zichliklari aniqlandi (1-jadval). Bunda spektr kengligini yarmi (FWHM) Voigt impulsi bilan moslashtirilgan holda topildi. Moslashtirishdan shkalasi bir-biriga juda yaqin bo‘lgan ion o‘tishlar ajratildi va alohida hisoblandi. Elektronlarning o‘zaro ta’sir parametri W son qiymatlaridan foydalanildi va mos temperaturalar uchun hisoblanildi.

Kremniy elementi lazer nurlanishi 25W bo‘lgan quvvatda nurlantirildi. Bunda plazma emissiya spektrlari Ocean Optics HR-4000 spektrometri yordamida yozib olindi va spektr chiziqlari Voigt funksiyasi yordamida moslashtirildi. Plazma zichligi ortishi bilan chiziq kengligi oshadi va bu Shtark kengayishi deb ataladigan effekt bilan bog‘liq bo‘lib, ionlarning elektr maydoni sabab spektral chiziqlar kengayadi.

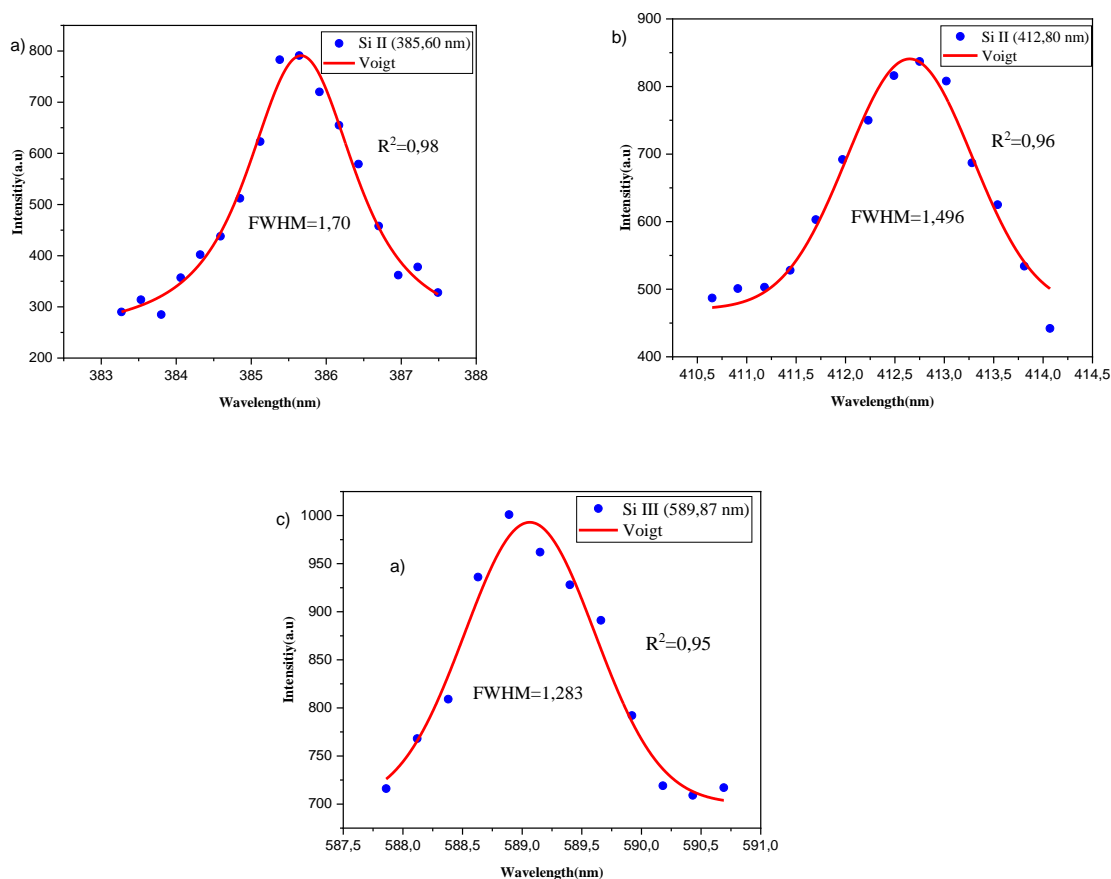
Voigt funksiyasi yordamida spektral chiziqlar markazi aniqlik bilan topiladi. **Chiziq kengligi (FWHM):** Spektral chiziqlarning to‘liq yarmi kengligi (full width at half maximum - FWHM) materialning fizik xususiyatlari haqida ma’lumot beradi. Masalan, bu kenglik plazma zichligi, harorati yoki Doppler effektlariga bog‘liq bo‘lishi mumkin.

Intensivlikni tahlil qilish: Voigt fit chiziq ostidagi umumiy maydonni aniqlash imkonini beradi, bu esa turli holatlarda modda miqdorini yoki plazma zichligini baholashga yordam beradi. Ushbu moslash (fitting) qilingan ma'lumotlar kremniy plazmasining fizik xususiyatlarini aniqroq tahlil qilishda yoki tajribalarni modellashtirishda juda foydali hisoblanadi.



3-rasm. Lazer nurlanish quvvati 25W ta'sirida n-tip Si I sirtida hosil bo'lgan plazma a) $\lambda = 251.92$ nm b) $\lambda = 288.15$ nm spektr chiziqlarini Voigt impulsi bilan moslashtirish

Bu rasmdagi Voigt impulsi bilan moslashtirishning asosiy vazifasi spektral chiziqning markazi λ_0 ni aniqlash bo'lib, bu spektral chiziqning pozitsiyalarini va plazmaning kimyoviy tarkibini aniqlashga imkon beradi



4-rasm. Lazer nurlanish quvvati 25W ta'sirida n-tipli Si II va Si III sirtida hosil bo'lgan plazma a) Si II $\lambda = 385.60$ nm b) Si II $\lambda = 412.80$ nm, c) Si III $\lambda = 589.87$ nm spektr chiziqlarini Voigt impulsi bilan moslashtirish

Agarda plazma sohasida termodinamik muvozanat mavjud bo'lsa, u holda energiya darajasining nisbiy sathlari va zarrachalarning tezligini taqsimlash kabi plazma xususiyatlarini temperatura tushunchasi orqali tasvirlash mumkin. Aslida, termodinamik muvozanat kamdan-kam hollarda to'liq bajariladi, shuning uchun foydali yaqinlashuvga, lokal termodinamik muvozanat(LTE) shartini qabul qilindi. Odatda og'ir zarralar (atomlar va ionlar) va engil zarralar (elektronlar) alohida, tezroq, keyin esa bir-biri bilan vaqt o'tishi bilan muvozanatlashadi. Asosiy sabab shundaki, to'qnashayotgan zarrachalarning massalari qanchalik yaqin bo'lsa zarralar o'rtasidagi energiya teng ravishda taqsimlanadi.

Lokal termodinamik muvozanatdagi plazma uchun zarrachalar guruhining (uyg'ongan holatlar) energetik sathi Boltsmanning taqsimot qonuni bilan ifodalanadi [9]:

$$\frac{n_{k,Z}}{n_Z} = \frac{g_{k,Z}}{P_Z} \exp\left(-\frac{E_{k,Z}}{k_B T}\right) \quad (3)$$

Bu yerda Z ionlanish bosqichidagi zarrachalar soni (ionlar soni) (Z = 0 va 1 mos ravishda neytral va yakka ionlangan atomlarga mos keladi), k_B - Boltzman doimiysi, T - plazma temperaturai, $n_{k,Z}$, $E_{k,Z}$ va $g_{k,Z}$ - mos ravishda zarrachalarning soni, Energiya va bir xil yuqori energiyali sathning darajasi k, n_Z - elektron zichligi va P_Z - Z ionlanish bosqichidagi zarrachaning termodinamik funktsiyasi. Optik jihatdan yupqa plazma, ya'ni juda kam nurlanish yutiladigan plazmadagi ionlanish darajasi Z bo'lgan zarrachalarning yuqori energetik va quyi energetik sathlari orasida hosil bo'lgan spektral chiziqning to'la intensivligi I_Z quyidagicha

$$I_Z = \frac{hc}{4\pi\lambda_{ki,Z}} A_{ki,Z} L \frac{n_Z}{P_Z} g_{k,Z} \exp\left(-\frac{E_{k,Z}}{k_B T}\right) \quad (4)$$

Bu yerda h - Plank doimiysi, c – yorug'lik tezligi, L - plazmaning xarakteristik uzunligi, $A_{ki,Z}$ – o'tish ehtimoli va $\lambda_{ki,Z}$ – o'tish chizig'i to'liq uzunligi. (2) tenglamadan natural logorifim olsak

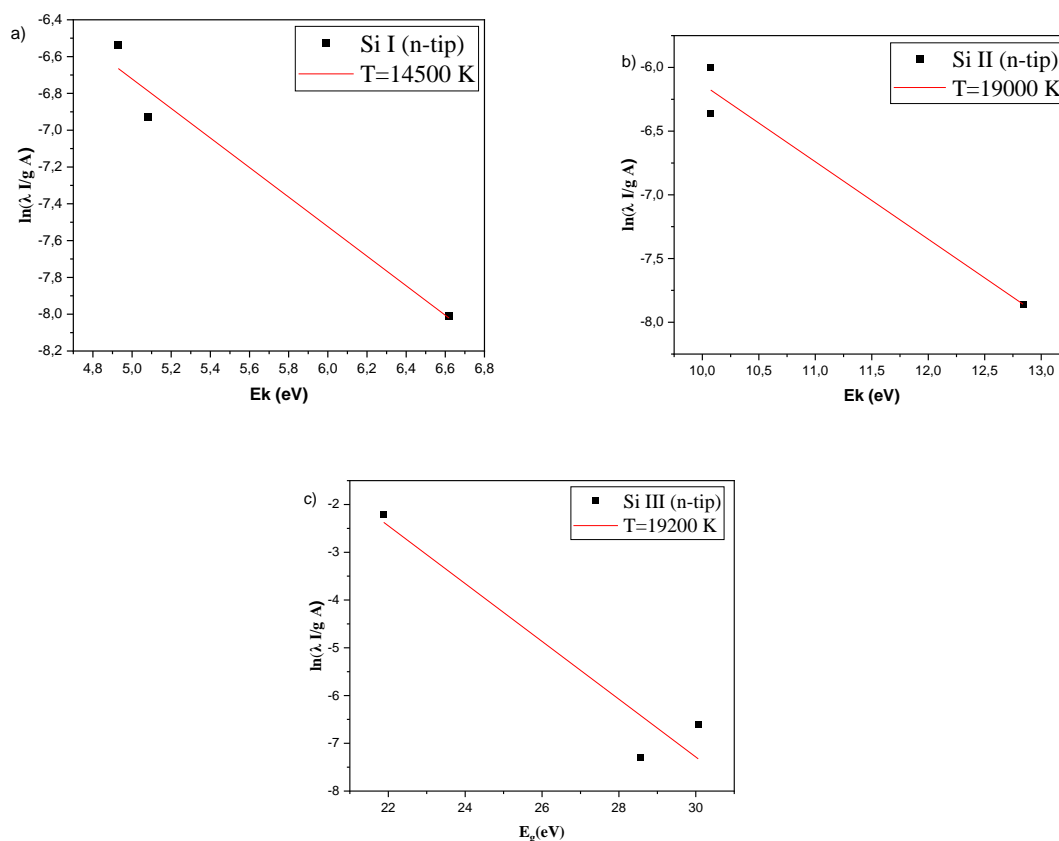
$$\ln\left(\frac{I_Z \lambda_{ki,Z}}{g_{k,Z} A_{ki,Z}}\right) = -\frac{1}{k_B T} E_{k,Z} + \ln\left(\frac{hcLn_Z}{4\pi P_Z}\right) \quad (5)$$

Agar bu chizikli tenglamaning (Boltzman tenglamasi deb ataladi) chap tomoni $\ln\left(\frac{I_Z \lambda_{ki,Z}}{g_{k,Z} A_{ki,Z}}\right)$ yuqori sathda bir necha qayta o'tishlar uchun Z ionlanish bosqichidagi zarrachalarning energiyasini ifodalasa u holda o'rnatilgan qiyalik $-\frac{1}{k_B T}$ ga teng bo'ladi, bu esa temperaturani aniqlaydi. T ning qiymati Boltzman tenglamasining darajalovchisi o'zgaruvchisi deb xulosa qilinadi. Termodinamik muvozanat holatida va plazma optik jihatdan yupqa deb faraz qilinganda (5)-tenglamaga ega bo'linadi[11].

1-jadval.

Atom/ion	To'liq uzunligi λ_{ki} , (nm)	Quyi sath energiyasi E_b (eV)	Yuqori sath energiyasi E_k (eV)	Statistik og'irlik va o'tish ehtimolligi ko'paytmasi, $g_k A_{ki}$ (s^{-1})
Si I	251.92	0.0095610	4.9296471	$1.65 \cdot 10^8$
Si I	263.12	1.9086586	6.6191858	$3.18 \cdot 10^8$
Si I	288.15	0.7809579	5.0823459	$6.51 \cdot 10^8$
Si II	385,60	6.859448	10.073880	$1.76 \cdot 10^8$
Si II	412,80	9.836720	12.839327	$8.94 \cdot 10^8$
Si II	634,71	8.121023	10.073880	$2.34 \cdot 10^8$
Si III	298,07	17.723324	21.881623	$2.47 \cdot 10^5$
Si III	348,70	24.995150	28.549670	$1.34 \cdot 10^8$
Si III	589,87	27.961701	30.062978	$4.37 \cdot 10^8$

Bir nechta emissiya liniyalarini hisobga olgan holda Boltzman usuli n-tipli Kremniy plazma elektron temperaturasini, aniqroq o'lchash imkoniyatini yaratadi. Bir xil ion o'tishli emissiya liniyalari qancha ko'p bo'lsa elektron temperaturasini o'lchash aniqligi ortadi. Bunda biz Kremniy plazma elektron temperaturasini aniqroq o'lchash uchun (5) tenglamadan foydalanib Si I uchun 3ta (Si I [251.92], [263.12], [288.15]), Si II uchun 3ta (Si II [385,60], [412,80], [634,71]), Si III uchun 3ta (Si III [298,07], [348,70], [589,87]) ion o'tish emissiya liniyalaridan foydalangan holda Boltzman chizikli grafiklari hosil qilindi (3-4-rasm).



5-rasm. n-tipli Si I va II va III ion o‘tish emissiya spektr chiziqlarini Bolsman taqsimot grafigi. a) Si I da qiyalik $T= 14500$ K , b) Si II da $T=19000$ va c)Si III da qiyalik $T=19200$ K plazma elektron temperaturasi

Si I chiziqlari asosida qurilgan Boltzman grafigida chiziqli moslashuv natijasida $R^2=0.96834$ qiymat olindi va temperatura 14500 K deb baholandi. Bu qiymat LIBS plazmasi uchun xos bo‘lgan diapazonga mos keladi hamda neytral atom chiziqlari uchun ishonchli natija hisoblanadi. McWhirter mezoni bo‘yicha hisoblangan minimal zarur elektron zichlik qiymati tajribada aniqlangan 8.3×10^{16} va $1.7 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ qiymatlardan ancha kichik bo‘lgani sababli, Si I uchun LTE sharti bajarilgan deb xulosa qilindi. Shu bois Si I bo‘yicha olingan temperatura natijasi ishonchli deb baholanadi.

Si II chiziqlari uchun olingan natijada temperatura 19000 K bo‘lib, chiziqli approksimatsiya sifati $R^2=0.96655$ ga teng bo‘ldi. Ushbu qiymat ham plazmadagi ionlashgan zarrachalar uchun real va fizik jihatdan asosli hisoblanadi. Si II chiziqlari uchun McWhirter mezoni asosida hisoblangan minimal elektron zichlik qiymati mavjud tajribaviy N_e qiymatlaridan past ekani ko‘rsatildi. Natijada Si II uchun ham LTE sharti bajarilishi tasdiqlandi. Demak, Si II asosida topilgan 19000 K temperatura ham maqolada asosli natija sifatida berilishi mumkin.

Si III chiziqlari bo‘yicha Boltzman grafigidan temperatura 19200 K deb topildi. Bu qiymat Si II uchun olingan temperaturaga juda yaqin bo‘lib, plazmada yuqori ionlanish bosqichlarining mavjudligini ko‘rsatadi. Biroq ushbu bosqich uchun mos Stark kengayish parametrlari yoki elektron-impact koeffitsiyentlari topilmagani sababli N_e ni bevosita hisoblash imkoni bo‘lmadi. Shu sababli Si III uchun LTE sharti bilvosita baholandi. McWhirter mezoni bo‘yicha Si III uchun talab qilinadigan minimal elektron zichlik taxminan $1.21 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ ga teng bo‘lib, bu qiymat faqat plazmadagi eng katta tajribaviy elektron zichlikka yaqinlashadi yoki undan biroz oshadi. Shuning uchun Si III uchun LTE sharti to‘liq va qat’iy tasdiqlangan deb aytish qiyin, ammo plazmaning eng zich qismida u chegaraviy ravishda bajarilishi mumkin. Shu bois Si III bo‘yicha olingan temperatura natijasi ehtiyotkorlik bilan talqin qilinishi lozim.

2-jadval.

lazer nurlanish quvvati 25W

Atom/ion	To'lqin uzunligi λ_{ki} , (nm)	Elektron konfiguratsiyasi	FWHM (nm)	Temperatura T(K)	Elektron ta'sir kengligi w (Å)	Elektrolar zichligi n_e , $(10^{17})\text{cm}^{-3}$
Si I	251.92	$3s^23p^2 \rightarrow 3p$	2.39	14500	0.00301	1.7
Si I	263.12	$3s^23p^2 \rightarrow 1s$	0.77	14500	0.00301	11.28
Si I	288.15	$3s^23p^2 \rightarrow 1d$	0.97	14500	0.043	0.83
Si II	385.60	$3s^23p^2 \rightarrow 1s$	1.59	19000	0.19	1.15
Si II	412,80	$3s^23d \rightarrow 3s^24f$	1.49	19000	1.29	0.57

Lazer nurlanish quvvati 25W uchun har bir spektr chiziqlari va plazma sohasidagi elektronlar zichligi aniqlanib, fizik jarayonlarning xususiyatlari tahlil qilindi. Tadqiqot davomida har bir quvvat qiymatiga mos keluvchi spektral chiziqlarning intensivligi, ularning kengligi (FWHM) va markazi o'lchandi. Bu parametrlar asosida plazma elektronlarining zichligi va harorati baholandi. Aniqlangan ma'lumotlar lazer nurlanishining moddalar bilan o'zaro ta'sir mexanizmlarini yanada chuqurroq tushunishga imkon beradi hamda lazer-plazma dinamikasini modellashtirishda qo'llash mumkin. (2 jadval).

Xulosa. Tadqiqotda kremniy plazmasining temperaturasi Boltsman usuli asosida turli ionlanish bosqichlariga mansub spektral chiziqlar yordamida aniqlandi. Hisoblash natijalariga ko'ra, Si I uchun plazma temperaturasi 14500 K, Si II uchun 19000 K, hamda Si III uchun 19200 K ga teng bo'ldi. Ushbu qiymatlar orasidagi ketma-ket o'sish plazmada ionlanish darajasi ortishi bilan yuqori energiyali sathlar va ion chiziqlari shakllanishi kuchayishini ko'rsatadi. Shu sababli temperaturaning Si I dan Si II va Si III ga o'tishda oshib borishi fizik jihatdan mantiqiy deb qaraladi.

Boltsman usuli asosida Si I, Si II va Si III chiziqlari bo'yicha n-tipli kremniy plazmasining temperaturasi mos ravishda 14500 K, 19000 K va 19200 K deb aniqlandi. Ionlanish bosqichi oshishi bilan temperaturaning ortib borishi plazmadagi yuqori energiyali ion holatlarining shakllanishi bilan izohlanadi. McWhirter mezoni bo'yicha Si I va Si II chiziqlari uchun LTE sharti bajarilgani tasdiqlandi, bu esa ushbu natijalarning ishonchligini ko'rsatadi. Si III chiziqlari uchun elektron zichlik bevosita aniqlanmagani sababli LTE sharti bilvosita baholandi va uning chegaraviy ravishda bajarilishi mumkinligi qayd etildi. Shu bois tadqiqotda Si I va Si II natijalari asosiy ishonchli temperatura ko'rsatkichlari sifatida, Si III natijasi esa qo'shimcha tasdiqlovchi ko'rsatkich sifatida qaraldi."

ADABIYOTLAR:

1. A. I. Japakov, M. E. Vapaev, R. M. Bedilov, Z. T. Azamatov, and I. Y. Davletov, "Spectra of Multiply Charged Ions in Laser Plasma Formed from Gas-Containing Targets," *East Eur. J. Phys.*, no. 3, pp. 490–494, Sep. 2023, doi: 10.26565/2312-4334-2023-3-55.
2. G. S. Boltaev, M. Iqbal, S. R. Kamalov, M. Vapaev, I. Y. Davletov, and A. S. Alnaser, "Impact of plasma conditions on the shape of femtosecond laser-induced surface structures of Ti and Ni," *Appl. Phys. A*, vol. 128, no. 6, p. 488, Jun. 2022, doi: 10.1007/s00339-022-05614-w.
3. M. R. Bedilov, K. B. Beisembaeva, and I. Y. Davletov, "Formation of the spectra of multiply charged ions from the plasma of Nd-doped glass irradiated with a neodymium laser," *Tech. Phys.*, vol. 47, no. 8, pp. 1019–1023, Aug. 2002, doi: 10.1134/1.1501684.
4. M. R. Bedilov, I. Y. Davletov, M. S. Sabitov, G. R. Berdierov, and T. G. Tsoi, "Multiply charged ion spectra of a laser plasma produced on both sides of the target," *Quantum Electron.*, vol. 31, no. 5, pp. 453–455, May 2001, doi: 10.1070/QE2001v031n05ABEH001977.
5. M. R. Bedilov, I. Y. Davletov, and S. D. Sultanov, "Charge and energy spectra of fast multicharged ions in a laser plasma," *Plasma Phys. Reports*, vol. 28, no. 12, pp. 1038–1040, Dec. 2002, doi: 10.1134/1.1528235.
6. M. R. Bedilov, K. B. Beisembaeva, and I. Y. Davletov, "Effect of γ -radiation-induced defects in glass on laser destruction," *Phys. Solid State*, vol. 44, no. 6, pp. 1093–1097, Jun. 2002, doi: 10.1134/1.1485013.
7. M. R. Bedilov, R. T. Khaidarov, and I. Y. Davletov, "Spectra of ions in a four-element laser plasma," *Quantum Electron.*, vol. 25, no. 6, pp. 567–568, Jun. 1995, doi: 10.1070/QE1995v025n06ABEH000415.
8. E. Fazio, B. Gökce, A. De Giacomo, M. Meneghetti, G. Compagnini, M. Tommasini, F. Waag, A. Lucotti, C. G. Zanchi, P. M. Ossi, M. Dell'Aglio, L. D'Urso, M. Condorelli, V.

Scardaci, F. Biscaglia, L. Litti, M. Gobbo, G. Gallo, M. Santoro, S. Trusso, and F. Neri, "Nanoparticles engineering by pulsed laser ablation in liquids: Concepts and applications," *Nanomaterials* 10, 2317 (2020).

9. A. I. Japakov, M. E. Vapaev, R. M. Bedilov, Z. T. Azamatov, and I. Y. Davletov, "Spectra of Multiply Charged Ions in Laser Plasma Formed from Gas-Containing Targets," *East Eur. J. Phys.*, no. 3, pp. 490–494, Sep. 2023, doi: 10.26565/2312-4334-2023-3-55.

10. R. Griem, *Plasma Spectroscopy, 1st Editio*. New York city: McGraw Hill, 1964. [Online]. Available: <https://www.amazon.com/Plasma-Spectroscopy-Hans-R-Griem/dp/B0000CMFJM>

11. B Zmerli, N Ben Nessib, M S Dimitrijevic' and S Sahal-Bréchet. *Stark broadening calculations of neutral copper spectral lines and temperature dependence. PHYSICA SCRIPTA* doi:10.1088/0031-8949/82/05/055301

12. Mohamed Fikry, Ibraheem A. Alhijry, Abdelnasser M. Aboufotouh, and Ashraf M. El Sherbini *Feasibility of Using Boltzmann Plots to Evaluate the Stark Broadening Parameters of Cu(I) Lines Applied Spectroscopy*. doi: 10.1177/00037028211013371

13. J. M. Liu, "Simple technique for measurements of pulsed Gaussian-beam spot sizes," *Opt. Lett.* 7, 196–198 (1982)

14. Shubho Mohajan, Nicholas F. Beier, and Amina E. Hussein. *Investigating crater formation in nanosecond laser ablation of aluminum foils* *Appl. Phys.* 136, 023102 (2024); doi: 10.1063/5.0212660

FIZIK QONUNLARNING SIMMETRIYASI VA FUNDAMENTAL SAQLANISH QONUNLARI

Nurolliyev Novruz Shoymardon o‘g‘li,

Shahrisabz davlat pedagogika instituti katta o‘qituvchisi
nurolliyevn@gmail.com

O‘taganova Adolat Urol qizi,

Shahrisabz davlat pedagogika instituti, talabasi
adolatutaganova@gmail.com

Jontemirova Xosiyat Safarovna,

Shahrisabz davlat pedagogika instituti talabasi
xosiyatjontemirova@gmail.com

Muminova Sevinch Kamoliddin qizi,

Shahrisabz davlat pedagogika instituti talabasi
muminovasevinch059@gmail.com

Annotatsiya. Ushbu maqolaning maqsadi fizik qonunlarning simmetriyasi tushunchasini ilmiy jihatdan tahlil qilish hamda uning nazariy fizika rivojlanishidagi ahamiyatini ochib berishdan iborat. Tadqiqot davomida simmetriya prinsiplari va ularning fizik jarayonlarga ta’siri o‘rganildi. Shuningdek, simmetriya va saqlanish qonunlari o‘rtasidagi bog‘liqlik nazariy jihatdan tahlil qilindi.

Tadqiqot metodlari sifatida ilmiy adabiyotlarni tahlil qilish, nazariy umumlashtirish hamda fizik modellarni solishtirish usullaridan foydalanildi. Mazkur metodlar yordamida simmetriya tushunchasining fizika fanidagi o‘rni va ahamiyati yoritildi.

Tadqiqot natijalari shuni ko‘rsatdiki, fizik qonunlarning simmetriyasi tabiatdagi fundamental jarayonlarni tushuntirishda muhim nazariy asos bo‘lib xizmat qiladi. Fazoviy, vaqt va aylanish simmetriyalarining mavjudligi energiya, impuls va burchak momentining saqlanish qonunlari bilan bevosita bog‘liq ekanligi aniqlandi.

Kalit so‘zlar: simmetriya, fizik qonunlar, invariantlik, saqlanish qonunlari, nazariy fizika, fazoviy simmetriya, vaqt simmetriyasi, aylanish simmetriyasi.

СИММЕТРИЯ ФИЗИЧЕСКИХ ЗАКОНОВ И ФУНДАМЕНТАЛЬНЫЕ ЗАКОНЫ СОХРАНЕНИЯ

Аннотация. Цель данной статьи заключается в научном анализе понятия симметрии физических законов и определении её роли в развитии теоретической физики. В ходе исследования были рассмотрены основные принципы симметрии и их влияние на физические процессы. Особое внимание уделено взаимосвязи между симметрией и законами сохранения.

В качестве методов исследования использовались анализ научной литературы, теоретическое обобщение и сравнительный анализ физических моделей. Применение данных методов позволило более подробно изучить значение симметрии в современной физике.

Результаты исследования показали, что симметрия физических законов является важным теоретическим принципом, позволяющим объяснить фундаментальные процессы природы. Было установлено, что пространственная, временная и вращательная симметрии тесно связаны с законами сохранения энергии, импульса и момента импульса.

В заключение можно отметить, что принципы симметрии занимают важное место в современной теоретической физике.

Ключевые слова: Симметрия, физические законы, инвариантность, законы сохранения, теоретическая физика, пространственная симметрия, временная симметрия, вращательная симметрия.

SYMMETRY OF PHYSICAL LAWS AND FUNDAMENTAL CONSERVATION LAWS

Abstract. The purpose of this article is to analyze the concept of symmetry in physical laws and to determine its role in the development of theoretical physics. During the research, the main symmetry

principles and their influence on physical processes were examined. Particular attention was given to the relationship between symmetry and conservation laws.

The research methods included analysis of scientific literature, theoretical generalization, and comparative analysis of physical models. These methods made it possible to explore the significance of symmetry principles in modern physics.

The results of the study show that symmetry in physical laws serves as an important theoretical principle for explaining fundamental natural processes. It was found that spatial, temporal, and rotational symmetries are directly related to the conservation laws of energy, momentum, and angular momentum.

Keywords: *Symmetry, physical laws, invariance, conservation laws, theoretical physics, spatial symmetry, time symmetry, rotational symmetry.*

Kirish. Fizika fanining fundamental asoslarini shakllantirishda va tabiat qonunlarining ichki mexanizmlarini tushunishda simmetriya prinsiplari bosh metodologik mezon hisoblanadi. Fizik qonunlarning simmetriyasi muayyan koordinataviy, vaqtinchalik yoki ichki almashtirishlar bajarilganda tizim harakatini ifodalovchi dinamik tenglamalarning o'z shaklini saqlashi, ya'ni invariant va kovariant bo'lib qolishi bilan xarakterlanadi. Klassik mexanikada simmetriya tushunchasi asosan geometrik masalalarni soddalashtirish vositasi bo'lib xizmat qilgan bo'lsa, zamonaviy nazariy fizika, xususan, relyativistik kvant mexanikasi, elementar zarrachalar fizikasi va kvant maydon nazariyalarida u yangi fundamental qonuniyatlarni bashorat qiluvchi evristik asos sifatida namoyon bo'ladi.

Simmetriya prinsiplari va fundamental saqlanish qonunlari o'rtasidagi izchil matematik bog'liqlik Emmi Neter (Noether) teoremasi orqali ifodalanadi. Ushbu teoreмага ko'ra, jismoniy tizim Lagranjianining har qanday uzluksiz global simmetriyasiga muayyan dinamik kattalikning saqlanish qonuni mos keladi. Xususan:

- Vaqtning bir jinsliliigi (vaqt o'qi bo'ylab siljishga nisbatan invariantlik) — energiya saqlanish qonunini;
- Fazoning bir jinsliliigi (fazoviy translyatsiyaga nisbatan invariantlik) — impuls saqlanish qonunini;
- Fazoning izotropiigi (fazoviy burishlarga nisbatan invariantlik) — impuls momenti saqlanish qonunini keltirib chiqaradi.

Uzluksiz simmetriyalar bilan bir qatorda, zaryadli qo'shmalik ($\$C\$$), fazoviy inversiya ($\$P\$$) va vaqtni ortga qaytarish ($\$T\$$) kabi diskret simmetriyalar va ularning buzilish mexanizmlari mikroduyodagi fundamental o'zaro ta'sirlarni tahlil qilishda hal qiluvchi rol o'ynaydi.

So'nggi yillarda nazariy fizika sohasida simmetriya va saqlanish qonunlari o'rtasidagi uzviy aloqalarni, xususan, PT (paritet va vaqt) simmetriyasiga ega noogermittov tizimlar dinamikasini hamda kalibrangan (gauge) maydonlar nazariyasini tadqiq etishga qiziqish ortib bormoqda. Shunga qaramay, turli simmetriya turlarining vaqtinchalik evolyutsiyaga ta'sirini izchil modellashtirish va ularning zamonaviy nazariyalar tarkibidagi metodologik funksiyasini yoritish muammosi dolzarbligicha qolmoqda. Bu, ayniqsa, oliy ta'lim muassasalarida nazariy fizika kurslarini o'qitish metodikasi va fizik jarayonlarni raqamli vizuallashtirish vositalarini ishlab chiqishda alohida tizimli tahlilni taqozo etadi.

Tadqiqotning maqsadi — fizik qonunlarning simmetriyasi tushunchasini zamonaviy nazariy fizika konsepsiyalari doirasida ilmiy-metodik jihatdan tahlil qilish, uning saqlanish qonunlari bilan bog'liqligini Neter teoremasi asosida tizimlashtirish hamda simmetriya prinsiplarining ilmiy va amaliy ahamiyatini ko'rsatib berishdan iborat.

Ushbu maqsadga erishish uchun quyidagi vazifalar belgilab olindi:

1. Fizik tizimlarda simmetriya, invariantlik va kovariantlik tushunchalarining fundamental-metodologik mohiyatini ochib berish;
2. Uzluksiz va diskret simmetriya turlarining o'zaro nisbati hamda ularning matematik ifodalarini klassifikatsiya qilish;
3. Variatsion hisob usullari yordamida simmetriya prinsiplari va fundamental saqlanish qonunlari o'rtasidagi Neter bog'liqligini matematik asoslash;
4. Zamonaviy nazariy fizika va kvant mexanikasi masalalarida (jumladan, PT-simmetrik modellar misolida) simmetriyaning qo'llanilish sohaslarini tahlil qilish.

Tadqiqot obyekti va qo'llanilgan metodlar. Ushbu tadqiqotning obyekti — dinamik tizimlar gamiltoniani va lagranjianing invariantlik xossalari belgilovchi uzluksiz hamda diskret simmetriya prinsiplari, shuningdek, ularning fundamental saqlanish qonunlari bilan uzviy bog'liqlik mexanizmlaridir. Kirish qismida bayon etilgan metodologik muammolardan kelib chiqqan holda, tadqiqot obyekti doirasida fizik qonuniyatlarning invariantlik xossalari, relyativistik va norelyativistik kvant mexanikasi, elementar

zarrachalar fizikasi hamda maydon nazariyalarining shakllanishidagi metodologik funksiyalari izchil tahlil qilinadi. Tadqiqotning metodologik asosi va qo'llanilgan metodlari nazariy fizika va matematik fizikaning fundamental tahlil usullariga tayanadi. Ishda qo'llanilgan ilmiy metodlar tizimi quyidagi tarkibiy qismlardan iborat: Retrospektiv va qiyosiy-tizimli tahlil: XX asr boshlaridan buyon shakllangan simmetriya konsepsiyalari, xususan, klassik va kvant mexanikasidagi fazoviy-vaqtinchalik hamda ichki (kalibrlangan) simmetriyalarning rivojlanish bosqichlari ilmiy adabiyotlar asosida tizimli ravishda qiyoslandi. Matematik fizika va nazariy mexanikaning fundamental modellari tahlil qilinib, kirish qismida qo'yilgan metodologik muammolarni bartaraf etish maqsadida mavjud ilmiy qarashlar solishtirildi va umumlashtirildi. Variatsion hisob va analitik mexanika metodlari: Simmetriya prinsiplari va fundamental saqlanish qonunlari o'rtasidagi bog'liqlik matematik fizikaning eng mukammal apparatlaridan biri bo'lgan Lagranj va Gamilton formalizmlari asosida tadqiq etildi. Variatsion hisob usullarini qo'llagan holda, harakat tenglamalarining o'zgarishsiz qolish shartlari tahliliy tushuntirildi. Neter formalizmi va invariantlik tahlili: Tizim lagranjianing cheksiz kichik (infinitesimal) global o'zgarishlarga nisbatan invariantligidan foydanib, saqlanuvchi Neter oqimlari (Noether currents) va zaryadlarini keltirib chiqarish algoritmi qo'llanildi. Kirish qismida keltirilgan fundamental bog'liqliklarni isbotlash maqsadida quyidagi o'tish mexanizmlari izchil analitik modellashtirildi: Vaqtning bir jinsliliigi (vaqt translyatsiyasi) orqali energiya saqlanish qonuni; Fazoning bir jinsliliigi (fazoviy translyatsiya) orqali impuls saqlanish qonuni; Fazoning izotropiigi (fazoviy burishlar) orqali impuls momenti saqlanish qonuni. Mantiqiy-deduktiv va nazariy umumlashtirish metodlari: Klassik saqlanish qonunlaridan tashqari, diskret simmetriyalar (C, P, T) va ularning kvant tizimlari evolyutsiyasiga (xususan, kirish qismida qayd etilgan PT-simmetrik noogermittov modellar misolida) ko'rsatadigan ta'siri mantiqiy-deduktiv yondashuv orqali tahlil etildi. Olingan nazariy xulosalar tizimlashtirilib, zamonaviy fizika nazariyalarining metodologik apparatini boyitish uchun umumlashtirildi.

Natijalar va muhokama. Tadqiqot doirasida olingan nazariy natijalar shuni ko'rsatadiki, fizik tizimlarning dinamik va kinematik xususiyatlarini aniqlovchi simmetriya prinsiplari tabiatdagi fundamental saqlanish qonunlarining kelib chiqish manbai bo'lib xizmat qiladi. Tizim lagranjianing invariantlik shartlarini tahlil qilish orqali fazoviy-vaqtinchalik uzluksiz simmetriyalar va ularga mos keluvchi fizik kattaliklarning saqlanish qonunlari tizimlashtirildi.

Ushbu uzviy bog'liqlik va translyatsion invariantlik natijalari quyidagi 1-jadvalda umumlashtirilgan holda keltirilgan:

Simmetriya turi	Transformatsiya turi	Saqlanish qonuni	Fizik kattalik
Vaqt simmetriyasi	Vaqt bo'yicha uzluksiz siljish (vaqtning bir jinsliliigi)	Energiyaning saqlanish qonuni	Energiya (\$E\$)
Fazoviy simmetriya	Fazo bo'ylab parallel siljish (fazoning bir jinsliliigi)	Impulsning saqlanish qonuni	Impuls (\$p\$)
Aylanish simmetriyasi	Fazoda burchak ostida burish (fazoning izotropiigi)	Impuls momentining saqlanish qonuni	Impuls momenti (\$L\$)

1-jadval. Uzluksiz simmetriyalar va fundamental saqlanish qonunlari o'rtasidagi bog'liqlik.

Jadval tahlili va olingan nazariy natijalar fizik qonunlarda simmetriyaning shunchaki geometrik xossa emas, balki eng muhim konseptual tamoyil (invariantlik mezon) ekanligini tasdiqlaydi. Harakat tenglamalarining invariantligi muayyan transformatsiyalar guruhi ostida koordinatalar tizimi o'zgaranda ham fundamental fizik qonuniyatlarining o'z analitik shaklini saqlab qolishini kafolatlaydi.

Natijalar muhokamasi jarayonida quyidagi muhim ilmiy xulosalar ilgari suriladi va asoslanadi:

- Simmetriya va Dinamik Invariantlik: Vaqt simmetriyasi buzilmagan (ya'ni tashqi vaqtinchalik maydon ta'sir etmayotgan yopiq) tizimlarda energiya vaqt o'tishi bilan qat'iy saqlanadi. Agarda tizim lagranjiani vaqtga oshkor bog'liq bo'lmasa ($\partial L / \partial t = 0$), Neter teoremasiga ko'ra to'liq energiya harakat integrali bo'lib qoladi. Xuddi shunday, fazoviy siljishga nisbatan invariantlik (fazoning bir jinsliliigi) impuls saqlanishini ta'minlasa, fazoviy burishga nisbatan izotropiklik burchak (impuls) momentining saqlanishini kafolatlaydi.

- Kvant tizimlari va elementar zarralar fizikasidagi o'rni: Zamonaviy elementar zarrachalar fizikasi va kvant maydon nazariyasida simmetriya g'oyalari yangi dinamik modellarni (masalan, kalibrlangan maydonlar nazariyasi, standart model) yaratishda hal qiluvchi evristik vositadir. Ayniqsa, global simmetriyalarni lokal simmetriyalarga o'tkazish orqali tabiatdagi to'rtta fundamental o'zaro ta'sirning tashuvchisi bo'lgan gauge maydonlari va ularning kvantlari (fotonlar, glyuonlar, oraliq bozonlar) matematik jihatdan bashorat qilinadi.

- Diskret va Noan'anaviy Simmetriyalar: Tadqiqotda ko'rib chiqilgan klassik uzluksiz simmetriyalardan tashqari, kvant mexanikasida diskret simmetriyalar (fazoviy paritet P, vaqtni ortga

qaytarish T va zaryadli qo'shmalik C) tizim holatini tushuntirishda alohida ahamiyatga ega. Muhokamalar shuni ko'rsatadiki, so'nggi yillardagi nazariy ishlanmalarda (xususan, PT-simmetrik kvant mexanikasida) an'anaviy germitovlik shartlarining PT-simmetriya operatorlari bilan almashtirilishi tizimning real energiya spektriga ega bo'lishini ta'minlovchi yangi invariantlik klassini ochib berdi.

Xulosa. Fizik qonunlarning simmetriyasi va fundamental saqlanish qonunlari o'rtasidagi uzviy bog'liqlikni tizimli tahlil qilish hamda zamonaviy nazariy fizika konsepsiyalari doirasida o'rganish natijasida quyidagi fundamental xulosalarga erishildi:

1. Simmetriya prinsiplari zamonaviy fizikada faqatgina matematik yoki geometrik masalalarni soddalashtirish vositasi emas, balki tabiatning fundamental qonuniyatlarini va yangi dinamik tizimlarni bashorat qiluvchi evristik mezon (boshlang'ich aksioma) hisoblanadi. Harakat tenglamalarining invariantligi va kovariantligi fizik dunyo manzarasining o'zgarmas qonuniyatlarini belgilab beradi.

2. Uzluksiz simmetriyalar va saqlanish qonunlari o'rtasidagi dinamik muvofiqlik (vaqtning bir jinsliligi — energiya saqlanishi, fazoning bir jinsliligi — impuls saqlanishi, fazoning izotropi — impuls momenti saqlanishi) Neter teoremasi doirasida variatsion va analitik hisoblashlar orqali to'liq asoslandi. Tizim lagranjiani vaqtga oshkor bog'liq bo'lmaganda, energiyaning harakat integrali sifatida qat'iy saqlanishi matematik va fizik jihatdan yana bir bor o'z isbotini topdi.

3. Simmetriya prinsiplari elementar zarralar fizikasi va kvant maydon nazariyasining strukturaviy poydevori ekanligi ko'rsatildi. Global simmetriyalarni lokal kalibrlangan (gauge) simmetriyalarga o'tkazish orqali tabiatdagi fundamental o'zaro ta'sirlarning tashuvchi maydonlarini generatsiya qilish mumkinligi tizimli tahlil etildi.

4. An'anaviy uzluksiz simmetriyalardan tashqari, diskret simmetriyalar (C, P, T) va ularning kombinatsiyalari kvant tizimlari evolyutsiyasini tushuntirishda hal qiluvchi ahamiyatga ega. Xususan, so'nggi yillarda rivojlanayotgan noogermitov fizik tizimlarda an'anaviy germitovlik shartining PT (paritet-vaqt) simmetriyasi bilan almashtirilishi tizimning real energiya spektrini saqlab qolishini ta'minlovchi yangi invariantlik toifasini ochib berishi tahliliy asoslandi.

Ushbu tadqiqot natijalari fizika yo'nalishidagi mutaxassislar, tadqiqotchilar hamda oliy ta'lim muassasalarida nazariy fizika (nazariy mexanika, kvant mexanikasi) kurslarini o'qitish metodikasini takomillashtirishda, shuningdek, mikro- va makrotizimlar muvozanatini kompyuter yordamida modellashtirishda muhim ilmiy-metodik manba bo'lib xizmat qiladi.

ADABIYOTLAR:

1. *Baggott J. Quantum Space: Loop Quantum Gravity and the Search for the Structure of Space, Time, and the Universe.* – Oxford: Oxford University Press, 2018. – 336 p.
2. *Carroll S. The Big Picture: On the Origins of Life, Meaning, and the Universe Itself.* – New York: Dutton, 2016. – 480 p.
3. *Griffiths D. J., Schroeter D. F. Introduction to Quantum Mechanics.* – 3rd Edition. – Cambridge: Cambridge University Press, 2018. – 506 p.
4. *Lancaster T., Blundell S. J. Quantum Field Theory for the Gifted Amateur.* – Oxford: Oxford University Press, 2014. – 496 p.
5. *Landau L. D., Lifshitz E. M. Mechanics: Volume 1 (Course of Theoretical Physics).* – 3rd Edition (Reissued). – Oxford: Butterworth-Heinemann, 2011. – 174 p.
6. *Schwartz M. D. Quantum Field Theory and the Standard Model.* – Cambridge: Cambridge University Press, 2014. – 952 p.
7. *Taylor J. R. Classical Mechanics.* – Mill Valley: University Science Books, 2023. – 786 p.

ANIQ INTEGRALNING FIZIKAGA TATBIQI

Pardayeva Zamira Uktamovna,

*Jizzax davlat pedagogika universiteti katta o'qituvchisi,
pardayevazamira17@gmail.com*

Annotatsiya. Ushbu maqolada aniq integral nazariyasining fizikaning asosiy sohalariga — mexanika, termodinamika va elektrostatikaga — tatbiqi tizimli bayon etilgan. O'zgaruvchan kuch bajargan ish, gazning termodinamik jarayonlardagi ishi, zaryadlar potentsial energiyasi hamda notekis taqsimlangan jismlar massasini hisoblashda aniq integraldan foydalanish usullari tahlil qilingan. Bundan tashqari, Karno sikli va uning foydali ish koeffitsienti, radioaktiv parchalanish qonuni hamda kondensator energiyasi kabi fundamental fizik munosabatlar integral hisob vositasida isbotlanadi. Maqolada yagona metodologik yondashuv — fizik jarayonni infinitezimal bo'laklarga ajratib, elementar kattalikni aniqlash va aniq integral orqali umumiy natijaga erishish — qo'llaniladi. Pedagogik nuqtai nazardan, matematik tushunchalarni aniq fizik kontekst orqali o'rgatish talabalar motivatsiyasini oshirishi va bilimlarni chuqurlashtirishi asoslanadi.

Kalit so'zlar. aniq integral, o'zgaruvchan kuch ishi, termodinamik jarayon, Karno sikli, radioaktiv parchalanish, differentsial tenglama.

ПРИМЕНЕНИЕ ОПРЕДЕЛЕННОГО ИНТЕГРАЛА В ФИЗИКЕ

Аннотация. В статье систематически изложено применение теории определенного интеграла к основным разделам физики — механике, термодинамике и электростатике. Проанализированы методы использования определенного интеграла при расчете работы, совершаемой переменной силой, работы газа в термодинамических процессах, потенциальной энергии зарядов, а также массы неравномерно распределенных тел. Педагогическая точка зрения основана на том факте, что обучение математическим концепциям через конкретный физический контекст повышает мотивацию учащихся и углубляет знания.

Ключевые слова. также энергия конденсатора. В статье используется единый методологический подход — разбиение физического процесса на бесконечно малые части, определение элементарной величины и получение общего результата с помощью определенного интеграла. Педагогическая точка зрения основана на том факте, что обучение математическим концепциям через конкретный физический контекст повышает мотивацию учащихся и углубляет знания.

Ключевые слова. определенный интеграл, работа переменной силы, термодинамический процесс, цикл Карно, радиоактивный распад, дифференциальное уравнение.

APPLICATION OF DEFINITE INTEGRAL TO PHYSICS

Abstract. This article systematically describes the application of the theory of definite integrals to the main branches of physics — mechanics, thermodynamics, and electrostatics. The methods of using definite integrals to calculate the work done by a variable force, the work done by a gas in thermodynamic processes, the potential energy of charges, and the mass of bodies with uneven distributions are analyzed. In addition, fundamental physical relationships such as the Carnot cycle and its efficiency, the law of radioactive decay, and the energy of a capacitor are proven using integral calculus. The article uses a single methodological approach — dividing the physical process into infinitesimal parts, determining the elementary quantity, and obtaining the general result through a definite integral. From a pedagogical point of view, it is based on the fact that teaching mathematical concepts through a clear physical context increases student motivation and deepens knowledge.

Keywords. definite integral, variable force work, thermodynamic process, Carnot cycle, radioactive decay, differential equation.

Integral hisob XVII asr oxirida I. Nyuton va G. Leybnits tomonidan birinchi navbatda fizik masalalarni yechish zarurati tufayli yaratilgan [1]. Fizikaning asosiy sohalarida — mexanika, termodinamika, elektrodinamika va kvant mexanikasida — fundamental qonunlar aniq yoki noaniq integral

orqali ifodalanadi. Shunga qaramay, talabalar ko‘pincha integral hisobini fizik mazmunsiz, abstrak tarzda o‘rganadilar. Bu esa matematik vositalarni haqiqiy masalalarda qo‘llash qobiliyatini susaytiradi.

Ushbu maqolaning maqsadi — fizik masalalarda aniq integralning qanday paydo bo‘lishini, uning geometrik va fizik ma’nosini hamda mexanika, termodinamika va elektrostatikadagi asosiy tatbiqlarini tizimli bayon etishdir.

Aniq integral nazariyasini fizika masalalariga tatbiq etish pedagogik jihatdan ham katta ahamiyatga ega. Tadqiqotlar shuni ko‘rsatadiki, matematik tushunchalar aniq fizik kontekst orqali tushuntirilganda, talabalar formulalarni abstrakt tarzda yodlash o‘rniga ularning mazmunini chuqurroq anglaydilar [3]. Shu sababli aniq integralning fizik ma’nosini — biror jismoniy kattalikning kichik bo‘laklar yig‘indisi ekanini — o‘quv jarayonining markaziga qo‘yish zamonaviy ta’lim metodikasining muhim talablaridan biriga aylanib bormoqda.

Maqolada ko‘rilgan barcha masalalar yagona metodologik yondashuv asosida tahlil qilinadi: birinchi navbatda fizik jarayon infinitezimal bo‘laklarga ajratiladi, so‘ngra elementar kattalik (dA , dW , dm) aniqlanadi va oxirida aniq integral orqali umumiy natija olinadi. Bu yondashuv Riemann integrali g‘oyasining bevosita tadbiquidir va matematik analiz bilan fizika o‘rtasidagi chuqur aloqani namoyon etadi [5].

O‘zgaruvchan kuch bajargan ish

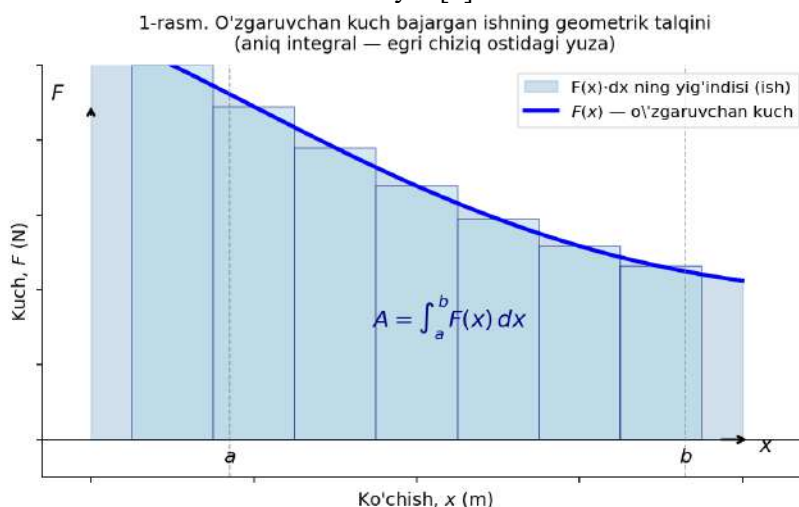
Fizikaning maktab kursida ish formulasi $A = F \cdot s$ ko‘rinishida, ya’ni doimiy kuch uchun beriladi. Amaliy masalalarda esa kuch — ko‘chish, tezlik yoki vaqtning funksiyasi hisoblanadi. Infinitezimal yondashuv asosida [1, §1]: jism dx kichik bo‘lak bo‘ylab siljiganda $F(x) \approx const$ va $dA = F(x) \cdot dx$. To‘liq yo‘ldagi ish:

$$A = \int_a^b F(x) dx$$

bu yerda a va b — integrallash chegaralari. $F(x) > 0$ holda integral $F(x)$ egri chizig‘i, x o‘qi va $x = a, x = b$ to‘g‘ri chiziqlari orasidagi yuzaga teng (1-rasm). Bu aniq integralning asosiy geometrik ma’nosidir [1, 2].

Kuchning ko‘chishga bog‘liqligining klassik namunasi — Guk qonuniga bo‘ysunadigan prujina masalasidir. Prujina qattiqligi k bo‘lsa, x masofaga siqilishdagi kuch $F(x) = kx$ ga teng. Prujinani $x = 0$ dan $x = x_0$ gacha siqishda bajarilgan ish $A = kx_0^2/2$ bo‘lib, uni doimiy kuch formulasi $A = F \cdot s$ yordamida hisoblash mumkin emas — faqat integral (1) orqali natijaga erishiladi. Bu misol integral hisobining zaruriyatini o‘quvchilarga tabiiy va motivatsion tarzda tushuntirishda juda samarali quroldir [2, 3].

Shunday qilib, o‘zgaruvchan kuch bajargan ish masalasi integral hisob kursining kirish qismi sifatida alohida ahamiyatga ega. O‘quvchi birinchi navbatda doimiy kuch uchun $A = F \cdot s$ formulasini biladi; so‘ngra kuch o‘zgaruvchan bo‘lganda bu formula ishlamay qoladi va integral (1) uning umumlashmasi sifatida tabiiy ravishda paydo bo‘ladi. Aynan shu pedagogik ketma-ketlik — xususiydan umumiyga o‘tish — talabalar ongida tushunchaning mustahkam o‘rnashishini ta’minlaydi [4].



1-rasm. O‘zgaruvchan kuch bajargan ishning geometrik talqini: $A = \int F(x) dx$ — $F(x)$ egri chizig‘i ostidagi yuzaga teng. Riman yig‘indisi yordamida ko‘rsatilgan (Yumashov [1] asosida)

Tezlik va yo'l. Agar $v(t)$ — vaqtning o'zgaruvchan funksiyasi bo'lsa, dt kichik vaqt oralig'ida jism $v(t) \cdot dt$ yo'l bosadi. t_1 dan t_2 gacha bosib o'tilgan to'liq yo'l:

$$s = \int_{t_1}^{t_2} v(t) dt$$

Masalan, aerodinamik to'xtash masalasida [1, §4.1.2] kuch tezlikning kvadratiga proporsional bo'lganda $F = -\beta v^2$, tezlik $v(t) = \frac{v_0}{1 + \beta v_0 t/m}$ qonuniga bo'ysunadi. Bunday holda yo'lni oddiy formula

bilan hisoblash mumkin emas — faqat integral (2) yordam beradi.

Tezlik-vaqt grafigi ostidagi maydonning yo'lga tengligi g'oyasi o'rta maktabda grafik orqali tushuntiriladi, lekin uning matematik asosi — aniq integral — faqat oliy ta'limda to'liq ochib beriladi. Agar jism $t = 0$ dan $t = T$ gacha harakat qilsa va tezligi $v(t) = v_0 + at$ bo'lsa, yo'l: $s = v_0 T + aT^2/2$ — bu kinematikaning tanish formulasidir, lekin uning integral asosi $s = \int v(t) dt$ ekanini ko'pchilik bilmaydi. Aniq integral bu formulani isbotlaydi va umumlashtiradi [2, 3].

Notekis taqsimlangan jismning massasi. $\rho(r)$ o'zgaruvchan zichlikka ega (masalan, radial zichlik taqsimotiga ega) sferik jism uchun $dm = \rho(r) \cdot 4\pi r^2 \cdot dr$ elementar massani beradi. Butun jism massasi [1, §1.5]:

$$m = \int_0^R \rho(r) \cdot 4\pi r^2 dr$$

Bu masalani integral hisobisiz yechib bo'lmaydi — maktab dasturida esa natija isbotlamasdan beriladi. Aynan shu yerda aniq integralning zaruriyati yaqqol namoyon bo'ladi.

Yana bir amaliy misol — uzunligi L bo'lgan notekis sterjen. Agar zichlik $\rho(x) = \rho_0(1 + x/L)$ bo'lsa, kesimi S bo'lgan sterjenning to'liq massasi: $m = \int_0^L \rho_0(1 + x/L) \cdot S \cdot dx = \rho_0 S \cdot 3L/2$. Tekis taqsimlangan holda ($\rho = \text{const}$) esa natija oddiy $m = \rho SL$ formulasiga qaytadi. Shunday qilib, aniq integral tekis va notekis taqsimlangan jismlarni bir xil algoritm bilan hisoblash imkonini beradi [1, 5].

Gaz bajargan ish. Piston S yuzaga ega bo'lsa va bosim $p(V)$ bo'lsa, dx kichik siljishda ish $dW = p \cdot S \cdot dx = p \cdot dV$. V_1 dan V_2 gacha kengayishdagi to'liq ish:

$$W = \int_{V_1}^{V_2} p(V) dV$$

Geometrik jihatdan bu — p - V diagrammada egri chiziq ostidagi yuzadir. Izotermik jarayon uchun $p = \nu RT/V$ bo'lgani tufayli:

$$W_{iz} = \nu RT \cdot \int_{V_1}^{V_2} \frac{dV}{V} = \nu RT \cdot \ln \frac{V_2}{V_1}$$

Izotermik kengayish uchun gaz bosimi $p = \nu RT/V$ bo'lib, $T = \text{const}$ sharti asosida ish: $W_{iz} = \nu RT \cdot \ln(V_2/V_1)$. Bu natija termodinamikaning eng muhim formulalaridan biri bo'lib, faqat integral hisob yordamida chiqariladi. Izobarik jarayon ($p = \text{const}$) uchun: $W_b = p \cdot (V_2 - V_1)$ — bu holda integral elementar, lekin izobarik emas, adiabatik jarayonda esa hisob tubdan murakkablashadi [4].

Karno sikli va termodinamik FIK. Termodinamikadagi eng muhim tatbiqlardan biri — Karno issiqlik mashinasining siklidir. Karno sikli to'rtta jarayondan iborat: T_1 haroratdagi izotermik kengayish (1→2), adiabatik kengayish (2→3), T_2 haroratdagi izotermik siqilish (3→4) va adiabatik siqilish (4→1). Har bir bosqich uchun ish p - V diagrammada tegishli egri chiziq ostidagi yuza sifatida aniq integral orqali hisoblanadi [4].

Izotermik kengayish bosqichi uchun: $W_{12} = \nu RT_1 \cdot \ln(V_2/V_1)$. Adiabatik jarayonda esa $pV^\gamma = \text{const}$ shart o'rinni bo'lib, integral: $W_{23} = \nu R(T_1 - T_2)/(\gamma - 1)$. Karno siklining foydali ishi $W = W_{12} - |W_{34}|$ bo'lib, $FIK: \eta = 1 - T_2/T_1$. Bu natijaga erishish faqat aniq integral yordamida mumkin va termodinamika qonunlarining matematik asosini tashkil etadi [1, 4].

Zaryadlarning potentsial energiyasi. Ikkita bir xil ishorali q_1 va q_2 zaryadlar ro masofada turgan holat uchun [1, §1.7] Kulon kuchi ta'sirida ularning uzoqlashuvi davomida bajarilgan ish:

$$A = \int_{r_0}^{\infty} \frac{q_1 q_2}{4\pi \epsilon_0 r^2} dr = \frac{q_1 q_2}{4\pi \epsilon_0 r_0}$$

Bu ifoda zaryadlar tizimining boshlang'ich potentsial energiyasiga tengdir. Ko'rinadiki, zaryadlarni cheksiz uzoqqa ajratish uchun zarur bo'lgan ish faqat integral (7) orqali aniqlanadi.

Kondensator energiyasini hisoblashda ham aniq integral qo'llaniladi. Sig'imi C bo'lgan kondensatorni Q zaryadgacha zaryadlashda, har bir elementar dq zaryad keltirishga sarflangan ish $dA = (q/C) \cdot dq$ bo'lib, to'liq ish: $A = \int_0^T (q/C) dq = Q^2/(2C) = CU^2/2$. Kondensatorida to'plangan elektr energiyasi $W = CU^2/2$ — bu elektrotexnikada keng qo'llaniladigan fundamental formuladir [2].

Ko'rinib turibdiki, elektrostatika bo'limidagi asosiy energetik formulalar — zaryadlar potentsial energiyasi va kondensator energiyasi — aniq integral orqaligina isbotlanadi. Bu natijalar muhandislik amaliyotida kondensator batareyalari, energiya akkumulyatorlari va elektr zanjirlarni hisoblashda bevosita ishlatiladi [2, 3].

Radioaktiv parchalanish qonuni

$dN = -\lambda N \cdot dt$ tenglamasi — eng sodda differentsial tenglama. O'zgaruvchilarni ajratib integrallash [1, §2.6]:

$$\frac{dN}{N} = -\lambda dt \rightarrow \int \frac{dN}{N} = -\lambda \int dt \rightarrow N(t) = N_0 \cdot e^{-\lambda t}$$

Bu yerda λ — parchalanish doimiysi, $T_{1/2} = \ln 2 / \lambda$ — yarim parchalanish davri. Natija — yadroviy fizikaning fundamental qonuni bo'lib, faqat integral hisobi yordamida isbotlanadi.

Misol tariqasida: uglerod - 14 (^{14}C) izotopining yarim parchalanish davri $T_{\text{D}} = 5730$ yil. Arxeologik topilmadagi ^{14}C miqdori boshlang'ich miqdorning 25% ga teng bo'lsa, topilmaning yoshi: $N(t)/N_0 = 0,25 = e^{-\lambda t}$ tenglamasidan $-\lambda t = \ln(0,25) = -2\ln 2$, binobarin $t = 2T_{\text{D}} = 11460$ yil. Bu natija radiokarbon tahlili metodining asosini tashkil etadi va arxeologiya hamda paleontologiyada keng qo'llaniladi [1].

Radioaktiv parchalanish qonunini integrallash tibbiyotda ham amaliy tatbiq topadi. Diagnostik maqsadlarda ishlatiladigan radioaktiv preparatning t vaqt o'tgandan keyingi faolligi: $A(t) = A_0 \cdot e^{-\lambda t}$. Bemorga yuborilgan preparatning t_1 dan t_2 oralig'ida uzatgan umumiy nurlanish dozasi: $D = \int A(t) dt = (A_0/\lambda)(e^{-\lambda t_1} - e^{-\lambda t_2})$. Bu formula tibbiy fizikada nurlanish xavfsizligini ta'minlash uchun muhimdir [3].

Quyidagi 1-jadvalda fizikaning turli sohalarida aniq integral tatbiqlarining qiyosiy tahlili keltirilgan:

Fizika sohasi	Tatbiq masalasi	Formula	Fizikaviy ma'no
Mexanika	O'zgaruvchan kuch ishi	$A = \int F(x) dx$	Egri chiziq ostidagi yuza
Mexanika	Tezlik bo'yicha yo'l	$s = \int v(t) dt$	Grafik ostidagi maydon
Mexanika	Notekis taqsimlangan massa	$m = \int \rho(r) dV$	Zichlikning hajmiy integrali
Termodinamika	Gaz bajargan ish (p-V)	$W = \int p(V) dV$	p-V diagrammadagi yuza
Elektrostatika	Zaryadlar potentsial energiyasi	$U = \int F(r) dr$	Kulon kuchi ishi
Yadro fizikasi	Radioaktiv parchalanish	$N = N_0 e^{-\lambda t}$	Ekspontensial atenuatsiya

1-jadval. Aniq integralning fizikaning turli sohalarida tatbiqlari

Xulosa. Maqolada Yumaşev D.V. qo'llanmasi [1] asosida aniq integralning fizik masalalardagi tatbiqlari tizimli tahlil qilindi. Asosiy xulosalar:

1. Aniq integral fizik kontekstda har doim biror kattalikning infinitezimal qismlari yig'indisi sifatida namoyon bo'ladi: $A = \int F dx, W = \int p dV, s = \int v dt$.

PHYSICS

2. Geometrik ma'no (egri chiziq ostidagi yuza) barcha fizik holatlarda saqlanadi va talabalarga abstrakt matematik tushunchani vizualizatsiya qilish imkonini beradi.
3. Radioaktiv parchalanish qonuni $N = N_0 e^{-\lambda t}$, notekis taqsimlangan jism massasi — bularni integral hisobisiz isbotlab bo'lmaydi.
4. Fizik masalalar orqali integralga kirish talabalar motivatsiyasini kuchaytiradi, matematik va fizik bilimlarni integrallashga yordam beradi.
5. Kelajakda ushbu yondashuv muhandislik va texnika yo'nalishlarida aniq integral kursini o'qitish metodikasini takomillashtirish uchun asos bo'la oladi.

ADABIYOTLAR:

1. Юмашев Д.В. *Интегралы и производные в физике: учебно-методическое пособие.* — ФАИТ МФТИ, Манчестер, 2006. — 107 с.
2. Irodov I.E. *Fizikadan masalalar to'plami.* — M.: Nauka, 1988. — 384 b.
3. Savyel'ev I.V. *Umumiy fizika kursi. I tom: Mexanika va molekulyar fizika.* — M.: Nauka, 1982. — 432 b.
4. Kikoin I.K., Kikoin A.K. *Molekulyar fizika.* — M.: Nauka, 1976. — 480 b.
5. Fikhtengol'ts G.M. *Differentsial va integral hisob kursi. I tom.* — M.: Nauka, 1970. — 607 b.

HARORAT, NAMLIK VA HAVO OQIMINI NAZORAT QILISH SENSORLARI

Rustamova Ruxshona Aminjonovna,

Buxoro davlat texnika universiteti III bosqich talabasi

rustamovaruxshona88@gmail.com

Annotatsiya. Ushbu maqolada atrof-muhit parametrlarini nazorat qilishda qo‘llaniladigan harorat, namlik va havo oqimi sensorlarining ishlash prinsiplari, turlari hamda amaliy qo‘llanilish sohalari tahlil qilingan. Shuningdek, ushbu qurilmalarning zamonaviy avtomatlashtirilgan tizimlardagi o‘rni va ahamiyati yoritilgan. Sensor texnologiyalarining rivojlanishi natijasida energiya samaradorligini oshirish va qulay muhit yaratish imkoniyatlari kengayib borayotgani ko‘rsatib o‘tilgan.

Ushbu maqolada zamonaviy avtomatlashtirilgan tizimlarda muhim o‘rin tutuvchi harorat, namlik va havo oqimi sensorlarining ishlash prinsiplari, asosiy turlari hamda texnologik jarayonlardagi roli batafsil ko‘rib chiqilgan. Muallif atrof-muhit parametrlarini aniq monitoring qilish orqali sanoat, qishloq xo‘jaligi va maishiy sohalarda energiya tejash va tizimlarning xavfsizligini oshirish masalalariga alohida e‘tibor qaratgan. Maqolada haroratni o‘lchashda Seebek effekti (termojuftlar) va metallar qarshiligining haroratga bog‘liqligi (RTD) kabi fizik hodisalar, namlikni aniqlashda sig‘imli va qarshilikli usullar, havo oqimini nazorat qilishda esa issiq simli anemometrilar va ultratovushli sensorlarning ishlash mexanizmlari tahlil qilingan. Shuningdek, sensorlarni Arduino, STM32, ESP32 kabi raqamli tizimlarga ulash, signalni kuchaytirish, analog-raqamli aylantirish (ADC) va I2C, SPI protokollari orqali ma‘lumot uzatish jarayonlari ham yoritilgan. Xulosa qismida esa bu sensorlarning kelajakda sun‘iy intellekt va IoT texnologiyalari bilan chuqur integratsiyalashuvi tizimlarni inson aralashuvisiz boshqarish imkonini berishi ta‘kidlangan.

Kalit so‘zlar: harorat sensori, namlik sensori, havo oqimi, IoT, avtomatlashtirish, aqlli tizimlar, monitoring, sensor texnologiyalari, Seebek effekti, mikrokontroller.

ДАТЧИКИ КОНТРОЛЯ ТЕМПЕРАТУРЫ, ВЛАЖНОСТИ И ВОЗДУШНОГО ПОТОКА

Аннотация. В данной статье проанализированы принципы работы, виды и области практического применения датчиков температуры, влажности и воздушного потока, используемых для контроля параметров окружающей среды. Также освещены роль и значение этих устройств в современных автоматизированных системах. Показано, что развитие сенсорных технологий расширяет возможности повышения энергоэффективности и создания комфортной среды.

В статье подробно рассмотрены принципы действия, основные типы и роль датчиков температуры, влажности и воздушного потока, занимающих важное место в современных автоматизированных системах. Автор уделяет особое внимание вопросам энергосбережения и повышения безопасности систем в промышленности, сельском хозяйстве и бытовой сфере за счёт точного мониторинга параметров окружающей среды. Рассмотрены физические явления, лежащие в основе измерения температуры, такие как эффект Зеебека (термопары) и зависимость электрического сопротивления металлов от температуры (RTD). Для измерения влажности проанализированы ёмкостные и резистивные методы, а для контроля воздушного потока — механизмы работы термоанемометров и ультразвуковых датчиков. Кроме того, освещены процессы подключения сенсоров к цифровым системам, таким как Arduino, STM32 и ESP32, усиление сигнала, аналого-цифровое преобразование (ADC), а также передача данных через протоколы I2C и SPI. В заключении подчёркивается, что в будущем глубокая интеграция данных сенсоров с технологиями искусственного интеллекта и IoT позволит управлять системами без участия человека.

Ключевые слова: датчик температуры, датчик влажности, воздушный поток, IoT, автоматизация, интеллектуальные системы, мониторинг, сенсорные технологии, эффект Зеебека, микроконтроллер.

SENSORS FOR MONITORING TEMPERATURE, HUMIDITY, AND AIRFLOW

Abstract. *This article analyzes the operating principles, types, and practical application areas of temperature, humidity, and airflow sensors used for monitoring environmental parameters. It also highlights the role and importance of these devices in modern automated systems. The development of sensor technologies has significantly expanded opportunities for improving energy efficiency and creating comfortable environments.*

This paper provides a detailed review of the working principles, main types, and technological roles of temperature, humidity, and airflow sensors, which occupy an important place in modern automated systems. The author pays special attention to issues of energy saving and improving system safety in industry, agriculture, and household applications through accurate environmental monitoring. The study examines physical phenomena used in temperature measurement, such as the Seebeck effect (thermocouples) and the temperature dependence of metal resistance (RTD). Capacitive and resistive methods for humidity detection, as well as the operating mechanisms of hot-wire anemometers and ultrasonic sensors for airflow monitoring, are also analyzed. In addition, the article discusses the integration of sensors with digital systems such as Arduino, STM32, and ESP32, signal amplification, analog-to-digital conversion (ADC), and data transmission through I2C and SPI communication protocols. The conclusion emphasizes that the future integration of these sensors with artificial intelligence and IoT technologies will enable fully autonomous system control without human intervention.

Keywords: *temperature sensor, humidity sensor, airflow, IoT, automation, smart systems, monitoring, sensor technologies, Seebeck effect, microcontroller.*

Kirish. Hozirgi kunda texnologik jarayonlarni avtomatlashtirish va nazorat qilish masalalari dolzarb ahamiyat kasb etmoqda. Atrof-muhit parametrlarini aniq o'lchash va tahlil qilish sanoat, qishloq xo'jaligi hamda maishiy sohalarda samaradorlikni oshirishga xizmat qiladi. Zamonaviy texnologiyalar rivojlanishi natijasida atrof-muhit parametrlarini nazorat qilish muhim ahamiyat kasb etmoqda. Ayniqsa, harorat, namlik va havo oqimi kabi ko'rsatkichlarni doimiy monitoring qilish orqali tizimlarning barqaror ishlashi ta'minlanadi. Sensor qurilmalari ushbu jarayonlarda asosiy vosita hisoblanadi. Ular real vaqt rejimida ma'lumotlarni yig'ib, boshqaruv tizimlariga uzatadi. Natijada inson omilini kamaytirish va jarayonlarni optimallashtirish imkoniyati yuzaga keladi. Shu sababli, sensorlarning tuzilishi, ishlash prinsipi va qo'llanilish sohasini o'rganish muhim ilmiy va amaliy ahamiyatga ega. Zamonaviy texnologiyalar davrida jarayonlarni avtomatlashtirish va energiya samaradorligini oshirish ko'p jihatdan sensorlarning sifati va aniqligiga bog'liq. Harorat, namlik va havo oqimi ko'rsatkichlari nafaqat odamlar uchun qulay muhit yaratishda, balki murakkab texnologik uskunalarning xavfsiz ishlashida ham juda muhim ahamiyatga ega.

Asosiy qism. Zamonaviy texnologiyalar rivojlanishi bilan atrof-muhit parametrlarini nazorat qilish tobora muhim ahamiyat kasb etmoqda. Ayniqsa, sanoat korxonolari, qishloq xo'jaligi, tibbiyot muassasalari va aqlli uy tizimlarida harorat, namlik hamda havo oqimini o'lchash va boshqarish muhim vazifalardan biridir. Ushbu jarayonlarda turli xil sensor qurilmalari asosiy rol o'ynaydi.

Harorat sensorlari va termodinamik nazorat tizimlari o'rtasidagi bog'liqlik zamonaviy fizika va muhandislikning eng muhim yo'nalishlardan biri bo'lib, u issiqlik energiyasini elektr signaliga aylantirish va ushbu ma'lumotlar asosida muhitni boshqarish jarayonini qamrab oladi. Termodinamik nazoratning mohiyati shundaki, har qanday fizik obyektning holati uning harorati bilan belgilanadi va u ko'rsatkichni aniq o'lchamasdan turib, tizimdagi entropiya yoki energiya almashinuvini boshqarib bo'lmaydi. Harorat sensorlari bu jarayonda sezgi organ vazifasini bajarib mikrokontroller yoki nazorat qurilmalariga teskari aloqanita'minlaydi. Masalan, sanoat pechlarida yoki laboratoriya reaktorlarida termodinamik muvozanatni saqlash uchun sensorlar real vaqt rejimida haroratning minimal tebranishlarini ham aniqlashi shart. Bu jarayonda har xil fizik effektlardan foydalaniladi: masalan termoparalar ikki xil metallning tutashgan joyidagi haroratlar farqi natijasida yuzaga keladigan elektr yurituvchi kuch fenomeniga asoslanadi, bu esa ularga inertlik darajasi past bo'lgan va yuqori dinamika ega jarayonlarni kuzatish imkonini beradi. Boshqa tomondan, qarshilikli termometrlar (RTD) metallarning o'tkazuvchanligi haroratga bog'liqligi qonuniyatiga tayanib, termodinamik jarayonlarning o'ta yuqori aniqlikdagi tahlilini ta'minlaydi.

Yarim o'tkazgichli sensorlar esa zamonaviy elektronika bilan integratsiyalashgan holda, kichik hajmdagi tizimlarning termal rejimini boshqarishda qo'llaniladi. Termodinamik nazorat nafaqat joriy haroratni o'lchash, balki tizimning issiqlik sig'imi, issiqlik o'tkazuvchanligi va atrofda muhit bilan energiya almashinuvi tezligini hisobga olgan holda, bashorat qiluvchi algoritmlarni (masalan, PID-nazorat) qo'llashni ham anglatadi. Bu esa o'z navbatida energiya sarfini optimallashtirishga, qurilmalarning xizmat muddatini uzaytirishga va texnologik jarayonlarning barqarorligini ta'minlashga xizmat qiladi. Raqamli transformatsiya davrida ushbu sensorlar aqlli algoritmlar bilan boyitilib, termodinamik jarayonlarni

masofadan turib va inson omilisiz boshqarish imkonini beruvchi murakkab fizik tizimlarning ajralmas qismiga aylanadi.

Metodologiya. Harorat sensorlari muhit yoki jismlarning issiqlik darajasini aniqlash uchun ishlatiladi. Ular fizik xususiyatlarning o'zgarishiga asoslanadi, masalan, qarshilik yoki kuchlanish o'zgarishi. Haroratni o'lchash uchun mo'ljallangan sensorlar turli prinsiplarga asoslanadi. Eng keng tarqalgan turlari - termorezistorlar, termojuftlar va yarimo'tkazgichli sensorlardir. Ular muhitdagi issiqlik darajasini aniqlab, uni elektr signaliga aylantiradi. Ushbu signal keyinchalik boshqaruv tizimlariga uzatiladi. Masalan, aqlli isitish tizimlarida harorat sensorlari xonadagi issiqlik darajasini doimiy kuzatib boradi va zarur bo'lsa, isitish yoki sovitish moslamalarini avtomatik ravishda ishga tushiradi. Bu esa energiya tejash va qulay muhit yaratishga yordam beradi.

Eng ko'p qo'llaniladigan turlari: termoparalar, termojuftlar, termistorlar, qarshilik harorat detektorlari (RTD). Bu sensorlar harorat o'zgarishini elektr signaliga aylantirib, uni qayta ishlash imkonini beradi. 1-rasmda termojuft namunasi keltirilgan.



1-rasm. Termojuft

Termojuftlarning vazifalari obyektning haroratini o'lchash uchun bir xil bo'lsa-da, ularning prinsiplari va xususiyatlari boshqacha. Termojuft haroratni o'lchashda eng ko'p ishlatiladigan harorat moslamasidir. Uning asosiy xarakteristikalarini keng o'lchov diapazoni, nisbatan barqaror ishlash, oddiy tuzilish, yaxshi dinamik javob va 4-20 mA elektr signallarini masofadan uzatish qobiliyatidir, bu avtomatik boshqarish va kontsentratsiya uchun qulaydir. Boshqaruv prinsipi-termojuft haroratini o'lchash prinsipi termoelektrik ta'sirga asoslangan. Ikki xil o'tkazgich yoki yarim o'tkazgich yopiq pastadirga ulangan. Ikkala tutashuvdagi haroratlar har xil bo'lsa, halqada termoelektrik potentsial hosil bo'ladi. Ushbu hodisa piroelektrik effekt deb ataladi, shuningdek, Seebek effekti deb ham ataladi. Yopiq konturda hosil bo'lgan termoelektrik potentsial ikki xil elektr potentsialidan iborat; termoelektrik potentsial va kontakt potentsiali. Termoelektrik potentsial deganda bir xil o'tkazgichning ikki uchi turli xil haroratlar tufayli hosil bo'lgan elektr potentsiali tushuniladi.

Namlikni nazorat qilish oziq-ovqat sanoati, farmatsevtika va issiqxonalarda mahsulot sifatini belgilovchi asosiy omildir. Namlik sensorlari havodagi suv bug'i miqdorini o'lchash uchun xizmat qiladi. Namlik darajasi ham muhit sifatini belgilovchi muhim ko'rsatkichlardan biridir. Namlik sensorlari havodagi suv bug'i miqdorini aniqlaydi. Ular asosan kapasitiv yoki rezistiv usulda ishlaydi. Qishloq xo'jaligida bunday sensorlar tuproq va havo namligini nazorat qilish orqali o'simliklar uchun optimal sharoit yaratishga xizmat qiladi. Bundan tashqari, server xonalari yoki laboratoriyalarda ortiqcha namlikning oldini olish orqali uskunalarning ishonchli ishlashi ta'minlanadi. Ular asosan ikki turga bo'linadi:

- Nisbiy namlik sensorlari (RH)
- Absolyut namlik sensorlari

Namlik sensori ishlash prinsipi shundan iboratki, u havodagi namlik o'zgarishiga qarab sig'im yoki qarshilikni o'zgartiradi va bu o'zgarish elektr signal ko'rinishida qayd etiladi. Namlik sensori muhitdagi suv bug'i miqdorini o'lchash uchun ishlatiladi va uning ishlashi havodagi namlik o'zgarishi bilan bog'liq fizik yoki elektr xossalarning o'zgarishini aniqlashga asoslanadi. Eng ko'p qo'llaniladigan sensorlarda namlik ortishi yoki kamayishi bilan materialning elektr sig'imi yoki qarshiligi o'zgaradi. Masalan, sig'imga asoslangan sensorlarda ikki elektrod orasidagi maxsus qatlam havodan namlikni yutadi va shu tufayli uning dielektrik xossasi o'zgarib, elektr sig'imi o'zgaradi; qurilma aynan shu o'zgarishni o'lchab namlik qiymatini hisoblaydi. Boshqa turdagi sensorlarda esa namlik ta'sirida materialning elektr qarshiligi o'zgaradi va bu

o'zgarish orqali natija olinadi. Ayrim hollarda havo issiqlik o'tkazuvchanligining namlikka bog'liqligidan ham foydalaniladi. Shu tarzda sensor chiqishida hosil bo'lgan signal qayta ishlanib, odatda foiz ko'rinishida ifodalanadigan nisbiy namlik qiymati aniqlanadi. 2-rasmda namlik sensori namunasini ko'rish mumkin.



2-rasm. Namlik sensori

Havo oqimini o'lchovchi sensorlar ventilyatsiya va konditsioner tizimlarida keng qo'llaniladi. Ular havoning tezligi va yo'nalishini aniqlash imkonini beradi. Eng ko'p uchraydigan turlari - issiqlik asosida ishlovchi (termal) va bosim farqiga asoslangan sensorlardir. Masalan, sanoat binolarida havo oqimi noto'g'ri taqsimlansa, bu ishchi muhitga salbiy ta'sir ko'rsatishi mumkin. Shu sababli, bunday sensorlar yordamida ventilyatsiya tizimlari samaradorligi oshiriladi. Havo oqimi sensorlari gaz yoki havo harakat tezligini aniqlash uchun ishlatiladi. Ular ventilyatsiya tizimlari, iqlim nazorati (HVAC), sanoat qurilmalari kabi sohalarda ko'p ishlatiladi.

Bu sensorlar odatda issiqlik yoki bosim o'zgarishiga asoslanib ishlaydi. Masalan, issiqlik anemometrlari havo oqimi tezligiga qarab sovish tezligini o'lchaydi. Harorat, namlik va havo oqimi sensorlari quyidagi yo'nalishlarda keng qo'llaniladi: Aqlli uy tizimlari, qishloq xo'jaligi (issiqxonalar), tibbiyot uskunalari, sanoat avtomatizatsiyasi, meteorologiya stansiyalari. Ushbu sensorlar real vaqt rejimida ma'lumot berib, avtomatik boshqaruv tizimlarini yaratishga imkon beradi. Hozirgi kunda sensorlar mikrokontrollerlar (Arduino, ESP32) bilan integratsiya qilinib, aqlli tizimlar yaratilmoqda. Masalan, DHT11 yoki DHT22 sensorlari yordamida xona harorati va namligini avtomatik nazorat qilish.

Integratsiyalashgan harorat va namlik sensori, raqamli integratsiyalashgan sensori raqamli ishlov berish davriga ega bo'lgan zond sifatida qabul qiladi, u atrof-muhitning harorat va nisbiy namlik sensorini mos keladigan standart analog signalga (4-20mA, 0-5V yoki 0-10V) aylantira oladi. Analog o'rnatilgan harorat va namlik sensori harorat va namlikdagi o'zgarishlarni bir vaqtning o'zida oqim / kuchlanish qiymatlaridagi o'zgarishlarga aylantira oladi, ikkilamchi asboblarni turli xil standart analog kirishlar bilan to'g'ridan-to'g'ri ulaydi. HENGKO raqamli harorat va namlikni nazorat qilish tuproq namligi harorati probi, raqamli monitor displeyi harorat, namlik va shudring nuqtasini ko'rsatishi mumkin, nazorat va monitorni amalga oshiradi. Bizning datchik qobig'imiz suv o'tkazmaydigan bo'lib, suvning sensorga o'tishiga va sensorga zarar etkazishiga yo'l qo'ymaydi. HVAC, ob-havo stantsiyasi, sinov va o'lchash, tibbiy davolash, namlagich va boshqa sohalarda keng qo'llaniladi, ayniqsa kislotaga, gidroksidga, korroziyaga, yuqori harorat va yuqori bosimli sanoat qattiq muhit uchun javob beradi.

Havo oqimi (Airflow) sensorlari - havo oqimi tezligi va hajmini o'lchash shamollatish (HVAC) tizimlari va avtomobil dvigatellarining to'g'ri ishlashi uchun zarur.

Issiq simli anemometrlar - elektr oqimi yordamida qizdirilgan sim havo oqimi ta'sirida soviydi. Sovush darajasiga qarab havo tezligi hisoblanadi.

Differensial bosim sensorlari - pitot naychalari yordamida havo bosimi farqini o'lchab, oqim tezligini aniqlaydi.

Ultratovushli sensorlar - havo oqimi yo'nalishida ultratovush to'lqinlarining tarqalish vaqtini o'lcham orqali ishlaydi.

Sensorlardan olingan analog signallar odatda raqamli ko'rinishga keltirilishi kerak. Bugungi kunda bu jarayon quyidagi bosqichlarni o'z ichiga oladi.

Kuchlanish juda past bo'lsa, uni operatsion kuchaytirgichlar orqali oshirish signalni kuchaytirish deyiladi.

Analog-raqamli o'zgartirish (ADC): Mikrokontrollerlar (Arduino, STM32, ESP32) tushunadigan tilga o'tkazish.

Ma'lumot uzatish: I2C, SPI yoki UART protokollari orqali ma'lumotlarni markaziy serverga yuborish.

Sensornlarni umumiy tizimga integratsiya qilish jarayoni fizik miqdorning analog tabiatini raqamli mantiqiy darajaga o'tkazish, signallarni qayta ishlash va ma'lumotlarni uzatish kabi murakkab bosqichlarni o'z ichiga olgan yaxlit texnik zanjirdir. Bu jarayon sensor tomonidan qabul qilingan juda kuchsiz va ko'p hollarda shovqinlarga boy analog signalni (masalan, mikrovoltlar darajasidagi kuchlanish yoki qarshilikning kichik o'zgarishi) mikrokontroller yoki sanoat kontrolleri (PLC) tushunadigan formatga keltirishdan boshlanadi. Integratsiyaning dasturiy-apparat qismida birinchi navbatda signalni konditsiyalash, ya'ni operatsion kuchaytirgichlar yordamida uni kerakli darajagacha ko'tarish va past chastotali filtrlar orqali tashqi elektromagnit xalaqitlardan tozalash amalga oshiriladi. Shundan so'ng, Analog-raqamli o'zgartirgich (ADC) qurilmasi uzluksiz signalni diskret (raqamli) bitlar ketma-ketligiga aylantiradi, bunda kvantlash darajasi va namuna olish chastotasi sensorning aniqligini belgilab beradi. Raqamli darajadagi integratsiya esa ma'lumotlarni uzatish protokollarini (I2C, SPI, UART yoki sanoatdagi RS-485, Modbus kabi) sozlashni talab qiladi, bu esa sensor va markaziy protsessor o'rtasida uzluksiz ma'lumot almashinuvini ta'minlaydi. Tizimli yondashuvda nafaqat apparat ulanishi, balki dasturiy kalibrash ham muhim o'rin tutadi; ya'ni sensorning chiziqli bo'lmagan xarakteristikalarini matematik modellar yordamida to'g'rilash va harorat kompensatsiyasini hisobga olish orqali olingan natijalarning haqiqiyliги ta'minlanadi. Zamonaviy IoT (Buyumlar interneti) va bulutli platformalar bilan integratsiyalashuv bosqichida esa ushbu ma'lumotlar simsiz aloqa modullari (Wi-Fi, LoRaWAN, ZigBee) orqali masofaviy serverlarga yuboriladi, u yerda ma'lumotlar vizuallashadi va tahliliy algoritmlar yordamida boshqaruv qarorlari qabul qilinadi. Yakuniy bosqichda sensorning real vaqt rejimidagi ishlashi tizimning umumiy xavfsizlik va energiya tejamkorlik parametrlariga muvofiqlashtirilib, avtonom boshqaruv sikli (teskari aloqa) shakllantiriladi.

Yuqori harorat va namlik sensorlari ko'pincha suvni tozalashda ishlatiladi. Qatronlar filtri elementi - bu sun'iy ishlov berish orqali tayyorlangan toza suv materialining bir turi. Ko'pincha ichimlik suvi va toza suv filtrlashda ishlatiladi. Filtrlovchi mahsulot sifatida filtr elementi turli sanoat muhitlarida keng qo'llaniladi. Turli materiallarning filtr elementlari turli xil professional ehtiyojlarga odatlangan va filtr elementlarini sotib olish va ishlatish hali ham o'z ehtiyojlariga qarab mos mahsulotlarni tanlashdir.

Xulosa. Harorat, namlik va havo oqimini nazorat qilish sensorlari zamonaviy texnologiyalarning ajralmas qismiga aylangan. Ular yordamida turli tizimlar samaradorligi oshadi, energiya tejash imkoniyati yaratiladi va inson uchun qulay muhit ta'minlanadi. Kelajakda bu sensorlar yanada takomillashib, sun'iy intellekt bilan integratsiyalashgan holda ishlashi kutilmoqda.

ADABIYOTLAR:

1. Лачин В.И., Савёлов Н.С. *Электроника: Учебное пособие.* – Изд. 8-е. – Ростов н/Д: Феникс, 2010. – 703 с.
2. Забродин Ю.С. *Промышленная электроника: Учебник для вузов.* – М.:Альянс, 2008. – 496 с.
3. Гусев В.Г., Гусев Ю.М. *Электроника и микропроцессорная техника: Учеб. для вузов.* – М.: Высш. шк., 2008. – 798 с.
4. Степаненко И.П. *Основы теории транзисторов и транзисторных схем.* – М.: Энергия, 1977. – 608 с.
5. Жеребцов И.П. *Основы электроники.* – Л.: Энергоатомиздат. Ленинград. 1990. – 352 с.
6. Лачин В.И., Савёлов Н.С. *Электроника: Учебное пособие.* – Изд. 8-е. – Ростов н/Д: Феникс, 2010. – 703 с.
7. Ginzburg A.S. *“Osnovi teorii i texniki sushki pishevix produktov”.*
8. Safarov J.E. *“Quritish texnologiyalari va uskunalari”.*

**^{60}Co GAMMA QUANT VA 5 MeV ELEKTRONLAR TA‘SIRIDAN KEYIN STRONTIY
GEKSAFERRIT KERAMIKALARINING MAGNETLANISHI**

Salaxitdinova Maysara Kamolidinovna,

Sharof Rashidov nomidagi

Samarqand davlat universiteti Muhandislik fizikasi instituti dotsenti

Aliqulova Munisa Eshbolta qizi,

Sharof Rashidov nomidagi

Samarqand davlat universiteti 1-bosqich magistranti

smaysara@yandex.ru

Annotatsiya. Ushbu ishda stronsiy geksaferrit $\text{SrFe}_{12}\text{O}_{19}$ asosidagi keramikaning strukturaviy-faza tarkibi va magnit xossalari gamma nurlari va tezlashtirilgan elektronlar energiyalari >1 va 5 MeV bilan nurlanish ta‘sirini o‘rgandik. $\text{Sr}_2(\text{Fe}_2\text{O}_5)$ va Fe_2O_3 aralashma fazalari nurlanmagan keramikalarda topilgan, ularning tarkibi nurlanish natijasida ortadi. Nurlanishdan oldin to‘yingan magnitlanish (300 K da o‘lchanganda) $1,2\text{ emu/g}$ ni tashkil etdi, va $2 \cdot 10^7\text{ R}$ dozasi bilan gamma-nurlar ta‘siridan keyin u $\sim 34\text{ emu/g}$ gacha sezilarli darajada oshadi. Bu spin-to‘lqinli va mikroto‘lqinli qurilmalarda stronsiy geksaferritdan foydalanish imkonini beradi.

Kalit so‘zlar: stronsiy geksaferriti, gamma nurlanish, elektron nurlanish, kristall struktura, to‘yingan magnitlanish.

**STRONSIY GEKSAFERRIT KERAMIKASINING ^{60}Co GAMMA-KVANTLARI VA 5 MeV
ENERGIYALI ELEKTRONLAR TA‘SIRIDAN KEYINGI MAGNITLANISHI**

Аннотация. В данной работе исследовано влияние облучений гамма-квантами и ускоренными электронами с энергиями >1 и 5 МэВ на структурно-фазовый состав и магнитные свойства керамик на основе гексаферрита стронция $\text{SrFe}_{12}\text{O}_{19}$. В необлученной керамике обнаружены примесные фазы $\text{Sr}_2(\text{Fe}_2\text{O}_5)$ и Fe_2O_3 , содержание которых в результате облучений увеличивается. До облучения намагниченность насыщения (измеренная при 300 K) составляет $1,2\text{ emu/g}$, а после γ -облучения дозой $2 \cdot 10^7\text{ Р}$ значительно возрастает до $\sim 34\text{ emu/g}$. Это позволяет использовать гексаферрит стронция как в спин-волновых, так и в микроволновых устройствах.

Ключевые слова: гексаферрит стронция, гамма- облучение, электронное облучение, кристаллическая структура, намагниченность насыщения.

**MAGNETIZATION OF STRONTIUM HEXAFERRITE CERAMICS AFTER IRRADIATION
WITH ^{60}Co GAMMA-QUANTA AND 5 MeV ELECTRONS**

Abstract. In this work, we investigated the effect of irradiation with gamma rays and accelerated electrons with energies >1 and 5 MeV on the structural-phase composition and magnetic properties of ceramics based on strontium hexaferrite $\text{SrFe}_{12}\text{O}_{19}$. Impurity phases $\text{Sr}_2(\text{Fe}_2\text{O}_5)$ and Fe_2O_3 were found in non-irradiated ceramics, the content of which increased after these irradiations. Before irradiation, the saturation magnetization (measured at 300 K) was 1.2 emu/g , and after γ -irradiation to the dose of $2 \cdot 10^7\text{ R}$ it significantly increased to $\sim 34\text{ emu/g}$. This allows the use of strontium hexaferrite in both spin-wave and microwave devices.

Keywords: strontium hexaferrite, gamma irradiation, electron irradiation, crystal structure, saturation magnetization.

Kirish. M turdagi $\text{SrFe}_{12}\text{O}_{19}$ geksaferritlar temir oksidining noyob modifikatsiyasi — $\epsilon\text{-Fe}_2\text{O}_3$ bilan bir qatorda yuqori magnitokristall anizotropiyaga ega ferritlar turkumiga kiradi. Hozirgi vaqtda ushbu materiallar doimiy magnitlar, axborotni saqlash uchun magnit materiallar hamda elektromagnit nurlanishning yuqori chastotali filtrlari sifatida keng qo‘llanilmoqda. Biroq $\epsilon\text{-Fe}_2\text{O}_3$ fazasi sezilarli darajada yuqori ko‘rsatkichlarga ega bo‘lib, xususan, koertsitiv kuchi ($20\text{--}30\text{ kE}$) va tabiiy ferromagnit rezonans chastotalari ($100\text{--}220\text{ GGts}$) bilan ajralib turadi [1–3, 7–9].

M-turdagi geksaferrit ($\text{SrFe}_{12}\text{O}_{19}$) magnit qattiq materialini olish uchun sirt-faol moddalar qo'llanilmagan oddiy sonokimyoviy strategiya usuli va undan keyingi kalsinatsiya (qizdirib pishirish) jarayoni qo'llaniladi [6]. Namunaning sirt morfologiyasi, tuzilishi va Kyuri harorati kukunsimon rentgen difraksiyasi (XRD), yuqori aniqlikdagi skanerlovchi elektron mikroskopiya, o'tkazuvchi elektron mikroskopiya hamda termogravimetrik tahlil usullari yordamida o'rganildi. Rentgenografik tahlil natijalari $\text{SrFe}_{12}\text{O}_{19}$ stronsiy geksaferritining bir fazali holatda hosil bo'lganini, R_{63}/mmc (194) fazoviy guruhga mansubligini hamda o'rtacha ~ 44 nm o'lchamdagi sferik shaklli kristallitlarga ega geksagonal tuzilishga ega ekanini tasdiqladi. O'lchangan Kyuri harorati (T_C) nanopowder uchun taxminan 462°C ni tashkil etdi. Namunaning magnit xossalari 4 dan 300 K gacha bo'lgan harorat oralig'ida o'ta o'tkazuvchan kvant interferensiya qurilmasi (SQUID) magnetometri yordamida o'lchandi. 300 K haroratda to'yingan magnitlanish (M_s) 33 emu/g ni tashkil etdi, bu esa hajmiy $\text{SrFe}_{12}\text{O}_{19}$ ga nisbatan ancha past bo'lib, ehtimol nanoo'lcham effekti bilan izohlanadi [4].

[5, 10] ishlarda $(\text{Sr,Ca})\text{Fe}_{12-x}\text{Al}_x\text{O}_{19}$ ($0 < x < 6$) tarkibli geksaferritlarning bir domenli zarrachalarini olishning samarali usuli ishlab chiqilgan va ularning magnit xossalari Al-Fe almashinish darajasi hamda haroratga bog'liq holda o'rganilgan. Ko'rsatilishicha, Al miqdori ortishi bilan magnitlanish va Kyuri nuqtasi kamayadi. Koertsitiv kuch $x = 5,5$ gacha ortib boradi va 300 K da ferritlar uchun rekord qiymat — 36 kE ga yetadi. Bunday zarrachalar polimer matritsada magnit yo'naltirilganda, koertsitiv kuch 41 kE gacha oshadi. $x > 2$ bo'lganda koertsitiv kuch 5–300 K harorat oralig'ida deyarli haroratga bog'liq bo'lmaydi, holbuki almashmagan geksaferrit va $\epsilon\text{-Fe}_2\text{O}_3$ da u 150 K dan past haroratlarda keskin kamayadi. $x = 5,5$ da koertsitiv kuch 200 K da 42 kE ni, 5 K da esa 35 kE ni tashkil etadi. $x = 6$ bo'lganda magnitlanish deyarli yo'qoladi, koertsitiv kuch esa susayadi. Shuningdek, $x = 4\text{--}5,5$ bo'lgan namunalar 160–250 GGts diapazonda elektromagnit nurlanishni yutishning rekord chastotalarini namoyon etadi. Namunalar kristall va magnit tuzilmalari 4–730 K harorat oralig'ida sinxrotron nurlanishi va neytron difraksiyasi usullari yordamida o'rganilgan. Sintez haroratiga bog'liq holda Al ionlarining Fe panjarachalari bo'yicha taqsimlanishi aniqlashtirilgan. Sr ning qisman Ca bilan almashishi temirning 2b bipiramidal holatidagi kislorod muhitining siqilishiga olib kelishi va natijada magnitokristall anizotropiyaning ortishi ko'rsatilgan.

Zamonaviy texnika uchun dolzarb talab shundan iboratki, nafaqat yuqori sifatli materiallar yaratish, balki ularni faqat stronsiy o'tish metallari ionlari bilan almashirish orqali emas, balki tashqi omillar ta'sirida ularning funksional xususiyatlarini boshqarish va optimallashtirish imkoniyatini ham ta'minlash zarur. Ushbu masalani hal etishning keng tarqalgan usullaridan biri — $\text{SrFe}_{12}\text{O}_{19}$ tuzilmasiga turli xil tashqi ta'sirlar (xususan, yadroviy zarrachalar bilan nurlantirish) orqali material strukturasi modifikatsiya qilishdan iborat.

Mazkur ishning maqsadi gamma-nurlar oqimi va tezlashtirilgan elektronlar ta'sirining stronsiy geksaferrit keramikalarining kristall tuzilishi hamda magnit xossalari ta'sirini o'rganishdan iborat.

Namunalar va tadqiqot usullari. Tadqiqot obyekti — stronsiy geksaferriti — [6] ishda bayon etilgan metodika asosida sintez qilindi va tayyorlandi. To'g'ri to'rtburchak shakldagi namunalar 1 sm^2 yuzaga ega bo'lib, ularning qalinligi $1 \pm 0,05$ mm va $8 \pm 0,1$ mm ni tashkil etdi.

Radiatsion ta'sir ^{60}Co manbasidan chiqadigan γ -kvantlar yordamida, 84 P/c quvvatda, nurlantirish kanalining izotrop geometriyasida, havo harorati 323 K bo'lgan sharoitda amalga oshirildi (O'zR FA Yadro fizikasi instituti). 1,17 va 1,33 MeV energiyali gamma-nurlar Sr, Fe va O yadrolarini qo'zg'atish uchun yetarli bo'lib, ular yadro maydonida elektron–pozitron juftliklar hosil bo'lishi chegarasidan yuqori energiyaga ega va atomlarning siljishi hamda keyingi struktura-fazaviy o'zgarishlarni yuzaga keltiradi.

Gamma-kvantlarning elektronlarda sochilishi mexanizmi orqali yuzaga keladigan ikkilamchi o'zaro ta'sirlar ionlanishga, kristall panjaraning radiatsion qizishiga va magnitlanishga olib keladi. Elektron tezlatgich — ELU-003 (O'zR FA Yadro fizikasi instituti) da nurlantirish 300 K haroratda 5 MeV energiyali elektronlar bilan, nur dastasi tok zichligi $1\ \mu\text{A}/\text{sm}^2$ va flyuens qiymatlari $10^{14}\text{--}10^{16}\ \text{sm}^{-2}$ oralig'ida amalga oshirildi. Namunalar ortiqcha zaryad va issiqlikni chiqarib yuborishni ta'minlaydigan alyuminiy (Al) tutqichga mahkamlandi. Bunday elektron energiyasida qisqa umrli izotoplar hosil bo'lishi bilan kechadigan yadroviy reaksiyalar, shuningdek tormozlanish gamma-nurlanishi ta'siri ham yuzaga kelishi mumkin.

Struktura va magnitlanish o'lchovlari namunalar tarkibida beqaror nuqsonlar va fazalar hosil bo'lgandan keyin, ularning uzoq muddatli relaksatsiyasidan so'ng amalga oshirildi. Namunalar tuzilishi va fazaviy tarkibi O'zR FA Yadro fizikasi institutida joylashgan XRD difraktometri (PANalytical, Niderlandiya) yordamida aniqlangan. Namunalarni yuqori darajada zichlashtirilgan kukun sifatida modellashtirish va ularni 30 ayl/min tezlikda aylanuvchi stol rejimida o'lchash mumkin. Difraktometrda $\text{CuK}\alpha$ nurlanishi (Ni β -filtri, trubka toki 30 mA va kuchlanishi 30 kV) qo'llanildi. Detektor goniometr yoy

bo'ylab 4 grad/min doimiy tezlikda, 0,02° qadam bilan harakatlantirildi. Spektrlar 2θ burchaklar oralig'ida 4° dan 80° gacha skaner qilindi.

Magnit o'lovlar barcha namunalar uchun 300 K xona haroratida 12 000 E maydonda VSM-250 vibratsion magnetometri yordamida amalga oshirildi, nurlantirilmagan SrFe₁₂O₁₉ namunalar bundan mustasno. Ular uchun o'lovlar 300 K haroratda 16 000 E maydonda Lakeshore 7407 seriyali vibratsion magnetometrda bajarildi [11,12]. Namunalar nurlantirilgan plastinalardan kesib olingan kichik parallelepiped shaklida tayyorlangan.

Ekspirimental natijalar va ularning muhokamasi. Strukturasi va fazaviy tarkibi. 1-rasm (a, b) da stronsiy geksaferritning etalon (standart) difraktogrammasi hamda 2·10⁷ P doza bilan γ-nurlar ta'sirida nurlantirilgan SrFe₁₂O₁₉ namunasi rentgen difraktogrammalari keltirilgan.

Rentgenogrammalar tahlili asosida fazaviy tarkib aniqlandi va u 1-jadvalda keltirilgan.

1-jadval

Nurlantirilmagan hamda gamma- va elektron nurlanishdan keyingi stronsiy geksaferrit keramikasining fazaviy tarkibi

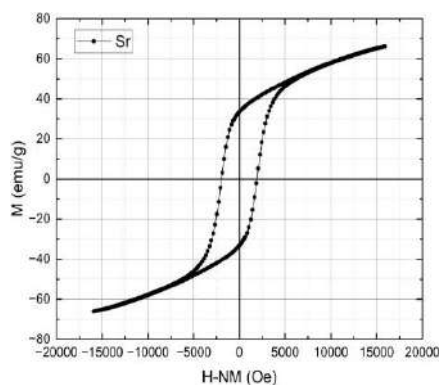
Bazadagi PDF-2016 kodi	Kimyoviy formula	Nurlantirilmagan hajm, %	Elektronlar 10 ¹⁶ sm ⁻² , hajm %	Gamma 2·10 ⁷ P, hajm %
01-079-1412	Sr(Fe ₁₂ O ₁₉)	60	61	56
01-071-3590	Sr ₂ (Fe ₂ O ₅)	36	21	34
01-072-6232	Fe ₂ O ₃	4	11	10
01-076-3169	Fe ₂ O ₃	-	7	-

XRD spektrlardan ko'rinadiki, nurlantirilmagan keramika namunalarida ikki ferrit fazasi 1:2 nisbatda ustunlik qiladi. γ-nurlar bilan nurlantirilgandan so'ng Sr(Fe₁₂O₁₉) fazasi hamda ferrit shpinel Sr₂(Fe₂O₅) fazasi kamayadi, aksincha Fe₂O₃ fazasi geksaferritning parchalanishi hisobiga ikki martadan ko'proq ortadi.

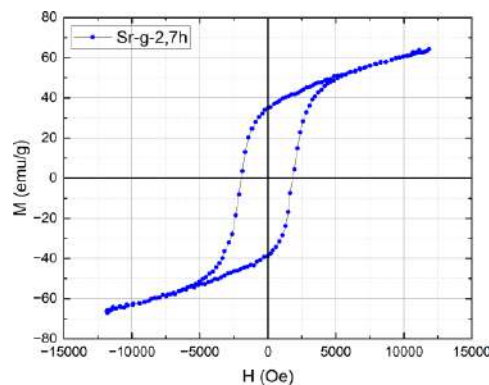
Elektronlar bilan nurlantirilgandan keyingi kutilmagan natija shundan iboratki, magnetit fazalarining ikki turi to'rt baravar ko'paygan bo'lib, bu faqat ferrit shpinelning parchalanishi hisobiga yuzaga kelgan. Ehtimol, keramika donalari ikki fazali (yadro-qobiq) tuzilishga ega bo'lib, donalar orasida esa radiatsiya ta'sirida hosil bo'lgan nanoo'lchamli Fe₂O₃ fazasi taqsimlangan.

Namuna ustida jamlanuvchi (konvergent) γ-nur dastasi bilan nurlantirishda yuqori γ-ta'sir zichligi yuzaga keladi va kristall panjarada radiatsion qizish hosil bo'lib, bu struktura-fazaviy o'tishlar uchun yetarli sharoit yaratadi. Stronsiy geksaferritning rentgen-difraktometrik tahlili shuni ko'rsatadiki, 2·10⁷ P dozali γ-nurlanish SrFe₁₂O₁₉ asosiy struktura fazasining ortishiga va Sr₂Fe₂O₅ fazasi miqdorining kamayishiga olib keladi. Shu bilan birga, Fe₂O₃ fazasining miqdori deyarli o'zgarmaydi.

Magnit xossalari. 2·10⁷ P doza bilan γ-nurlar ta'sirida nurlantirilgan namunalar uchun magnetlanish egri chiziqlari 2-rasmida keltirilgan. Olingan tajriba magnetlanish egri chiziqlari asosida asosiy magnit parametrlar (M_s, M_r, H_c) qiymatlari aniqlandi va ular quyida 2-jadvalda keltirilgan. Hisoblash jarayonida namunalarning geometrik parametrlaridan kelib chiqib qabul qilingan N = 0,255 qiymatli demagnitlash (magnitni so'ndirish) faktori ta'siri hisobga olindi.



a)



b)

1-rasm. SrFe₁₂O₁₉ keramika namunalarining nurlantirilishdan oldingi (a) va 2·10⁷ P dozali γ-nurlar bilan nurlantirilgandan keyingi (b) magnetlanish egri chiziqlari.

2-jadval.

Asosiy magnit parametrlar (M_s, M_r, H_c) qiymatlari

PHYSICS

Namuna	Vaqt [h]	Massa m, [mg]	H= 12 kOe, H = 16kOe, T = 300K		
			Ms, [emu/g]	Mr, [emu/g]	Hc, Oe
SrFe ₁₂ O ₁₉	0	22,18	50,7	33,3	1926
SrFe ₁₂ O ₁₉ -g-2,7	2,7	81,1	55,5	36,9	1886,6
SrFe ₁₂ O ₁₉ -g-7	7	58,1	48	37,9	2738,6
SrFe ₁₂ O ₁₉ -g-17	17	45,3	47,9	35,1	1676,8
SrFe ₁₂ O ₁₉ -g-33	33	55,2	47,9	37,3	2059,2
SrFe ₁₂ O ₁₉ -g-55	55	54,7	40	15,7	476,3

Asosiy xulosalar. Boshlang'ich (etalon, olingan holatdagi) keramika namunalarida asosiy geksaferrit fazasi Sr(Fe₁₂O₁₉) bilan bir qatorda ferrit shpinel Sr₂(Fe₂O₅) fazasi hamda oz miqdorda Fe₂O₃ mavjud. Ehtimol, keramika donalari ikki fazali (yadro–qobiq) tuzilishga ega bo'lib, donalar orasida nanoo'lchamli ferromagnit Fe₂O₃ fazasi taqsimlangan.

5 MeV energiyali elektronlar (10¹⁶ e⁻/sm²) ferrit shpinel Sr₂(Fe₂O₅) fazasini parchalaydi va Fe₂O₃ ning turli modifikatsiyalariga tegishli qo'shimcha fazalarning hosil bo'lishini induksiyalaydi.

⁶⁰Co gamma-kvantlari (1,17 va 1,33 MeV), 2·10⁷ R = 10¹⁷ γ/sm² doza bilan, Sr(Fe₁₂O₁₉) asosiy geksaferrit fazasini parchalaydi va qo'shimcha Fe₂O₃ fazasining o'sishini induksiyalaydi. Ushbu faza, ehtimol, nurlantirishdan keyin magnitlanishning ortishiga javobgar hisoblanadi.

1. Elektronlar bilan nurlantirishning kichik dozalarida to'yingan magnitlanishning (M_s) ortishi kuzatiladi, katta dozalarda esa sezilarli kamayish qayd etiladi.

2. Gamma-kvantlar bilan nurlantirishda stronsiy ferritlari uchun M_s(x) o'zgarishi atom massasi bilan bog'liq bo'lishi mumkin — stronsiy og'ir element bo'lib, gamma-nurlanish bilan temirga nisbatan boshqacha o'zaro ta'sir qiladi. Shu sababli stronsiy ferritida elektron nurlanishga o'xshash tarzda magnitlanish ortishi kuzatiladi.

3. Qoldiq magnitlanish (M_r) ning zaif o'zgarishlari demagnitlovchi (magnitni so'ndiruvchi) faktor ta'siri bilan izohlanishi mumkin.

Minnatdorchilik.

Mualliflar geksaferritlarni taqdim etgani uchun prof. D.A. Vinnikga hamda foydali muhokamalar uchun prof. A.B. Granovskiya minnatdorchilik bildiradilar.

ADABIYOTLAR:

1. Deyang Chen, Yuying Meng, Kinjal H. Gandha, Dechang Zeng, Hongya Yu, and Ping Liu. *Morphology control of hexagonal strontium ferrite micro/nano-crystals//AIP ADVANCES 7, 056214 (2017).* <https://doi.org/10.1063/1.4974283>.

2. Kostishyn V.G., Panina L.V., Timofeev A.V., Kozhitov L.V., Kovalev A.N., Zyuzin A.K. *Dual ferroic properties of hexagonal ferrite ceramics BaFe₁₂O₁₉ and SrFe₁₂O₁₉ //Journal of Magnetism and Magnetic Materials, Volume 400, 15 February 2016, Pages 327-332.* <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2015.09.011>.

3. Zimeng Hu, Gavin B. G. Stenning, Vladimir Koval, Jiyue Wu, Bin Yang, Alisa Leavesley, Richard Wylde, Michael John Reece, Chenglong Jia, and Haixue Yan. *Terahertz Faraday Rotation of SrFe₁₂O₁₉ Hexaferrites Enhanced by Nb Doping // American Chemical Society ACS Appl. Mater. Interfaces 2022, 14, 46738–46747* <https://doi.org/10.1021/acsami.2c13088>.

4. Sivakumar P., Shani L., Yeshurun Yo., Shaulov A., Gedanken A. *Facile sonochemical preparation and magnetic properties of strontium hexaferrite (SrFe₁₂O₁₉) nanoparticles. // J Mater Sci: Mater Electron. DOI 10.1007/s10854-016-4482-9.*

5. Gorbachev E.A., Trusov L.A., Sleptsova A.E., Anokhin E.O., Zaytsev D.D., Vasiliev A.V., Eliseev A.A., Kazin P.E. *Synthesis and magnetic properties of the exchange-coupled, SrFe_{10.7}Al_{1.3}O₁₉/Cocomposite. //Mendelevov Communications, (Netherlands), том 28, №4, с.401-403. DOI: 10.1016/j.mencom.2018.07.020.*

6. Винник Д.А., Живулин В.Е., Зыкова А.Р. и др. *Спектроскопия высокоэнтропийной керамики со структурой магнетопломбита / Д.А.Винник, В.Е.Живулин, А.Р.Зыкова, Д.Шерстюк, А.Ю.Пунда, С.В.Таскаев, А.А.Гурченко, Е.С. Жукова, Л.Н.Алябьева, Б.П.Горишинов, С.А.Гудкова, М.К.Салахитдинова, С.А.Созыкин, Г.П.Вяткин // Журнал структурной химии. – 2023.- т.64.-№ 6 –*

c.1-9.

7. Long Peng, Lezhong Li, Xiaoxi Zhong, Yuebin Hu and Sanming Chen. Effects of La^{3+} - Zn^{2+} doping on the structure, magnetic, electrical, and dielectric properties of low temperature sintered Sr-hexaferrites. // *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, <http://dx.doi.org/10.1016/j.jmmm.2016.10.146>.

8. Shumin Du, Huaiyin Chen, Ruoyu Hong. Preparation and electromagnetic properties characterization of reduced graphene oxide/strontium hexaferrite nanocomposites. // *Nanotechnol.Rev.,...2020; ...9:105–114*. <https://doi.org/10.1515/ntrev-2020-0010>.

9. Shashanka H.M., Anantharamaiah P.N., Joy P.A. Magnetic parameters of $\text{SrFe}_{12}\text{O}_{19}$ sintered from a mixture of nanocrystalline and micron-sized powders. // *Ceramics International*, Volume 45, Issue 10, July 2019, Pages 13592-13596.

<https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2019.04.023><https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2019.04.023>

10. Marian Stingaciu, Martin Topole, Paul McGuinness, Mogens Christensen. Magnetic properties of ball-milled $\text{SrFe}_{12}\text{O}_{19}$ particles consolidated by Spark-Plasma Sintering. // *Scientific Reports* 5:14112 | DOI: 10.1038/srep14112.

11. Panpan Jing, Jinlu Du, Jianbo Wang, Jinwu wei, Lining Pan, Jianan Li, Qingfang Liu. Width-controlled M-type hexagonal strontium ferrite ($\text{SrFe}_{12}\text{O}_{19}$) nanoribbons with high saturation magnetization and superior coercivity synthesized by electrospinning. // *Scientific Reports* | 5:15089 | DOI: 10.1038/srep15089.

12. Zi Z.F., Sun Y.P., Zhu X.B., Yang Z.R., Dai J.M., Song W.H. Structural and magnetic properties of $\text{SrFe}_{12}\text{O}_{19}$ hexaferrite synthesized by a modified chemical co-precipitation method. // *Journal of Magnetism and Magnetic Materials* 320 (2008) 2746-2751. <https://doi.org/10.1016/j.jmmm.2008.06.009>.

ANISOTROPY OF EFFECTIVE ELASTIC CONSTANTS IN Si CRYSTALS**Akhmedzhanov Farkhad Rashidovich,**

Sciences of Academy of Republic of Uzbekistan

Institute of Ion-Plasma and laser technology

Tashkent 100125, Durmon yuli street 33

akhmedzhanov.f@gmail.com**Toshpulatov Ibrat Shavkat ugli,**

Sciences of Academy of Republic of Uzbekistan

Institute of Ion-Plasma and laser technology

Tashkent 100125, Durmon yuli street 33

ibrat.toshpulatov96@gmail.com**Tursunov Ixvoliddin Baxtiyor o'g'li,**

Sciences of Academy of Republic of Uzbekistan

Institute of Ion-Plasma and laser technology

Tashkent 100125, Durmon yuli street 33

ixvoliddin33@gmail.com

Abstract. Silicon crystal has been investigated at the frequency of 30 MHz, the velocity and an attenuation coefficients of acoustic waves were measured. Elasticity tensor, the real and imaginary components in crystals were determined. The study of anisotropy of sound attenuation in crystals is a powerful tool for understanding the mechanism of interaction of sound wave with the crystal lattice [1]. Si is an effective crystal that has become technologically important through its numerous applications. It has been used as a diamond simulant, as well as the active element in high-power lasers [2]. The applicability conditions are investigated, components and elasticity tensors are considered. A special direction of acoustic wave propagation is discovered, and it is shown that these crystals are practically anisotropic. In general, Si crystals have found further applications in memory devices, magneto-optics, and microwave engineering [3].

Key words: Effective, elastic, constants, polarization, silicon, crystals, plane, waves, propagation, real, imaginary.

SI KRISTALLARIDA SAMARALI ELASTIKLIK DOIMIYLARINING ANIZOTROPIYASI

Annotatsiya. 30 MHz chastotada kremniy (Si) kristalli tadqiq qilinib, akustik to'lqinlarning tezligi hamda so'nish koeffitsiyentlari o'lchandi. Kristallardagi elastiklik tenzorining haqiqiy va mavhum komponentlari aniqlandi. Kristallarda tovush to'lqinlarining so'nishi anizotropiyasini o'rganish tovush to'lqinining kristall panjarasi bilan o'zaro ta'sir mexanizmini tushunishda muhim vosita hisoblanadi [1]. Si kristallining ko'plab qo'llanilish sohalari tufayli texnologik jihatdan muhim bo'lgan samarali kristalldir. U olmos imitatori sifatida, shuningdek yuqori quvvatli lazerlarning aktiv elementi sifatida qo'llanilgan [2]. Qo'llanish shartlari tadqiq qilinib, komponentalar va elastiklik tenzorlari ko'rib chiqildi. Akustik to'lqin tarqalishining maxsus yo'nalishi aniqlanib, ushbu kristallarning amalda anizotrop ekanligi ko'rsatildi. Umuman olganda, Si kristallari xotira qurilmalari, magnitoptika va mikroto'lqin texnikasida keng qo'llanilmoqda [3].

Kalit so'zlar: effektiv, elastiklik, doimiylar, qutblanish, kremniy, kristallar, tekislik, to'lqinlar, tarqalish, haqiqiy, mavhum.

АНИЗОТРОПИЯ ЭФФЕКТИВНЫХ УПРУГИХ ПОСТОЯННЫХ В КРИСТАЛЛАХ Si

Аннотация. Кристалл кремния (Si) был исследован на частоте 30 МГц, измерены скорость и коэффициенты затухания акустических волн. Были определены действительные и мнимые компоненты тензора упругости в кристаллах. Изучение анизотропии затухания звуковых волн в кристаллах является важным инструментом для понимания механизма взаимодействия звуковой волны с кристаллической решёткой [1]. Кристалл Si является эффективным материалом, имеющим важное технологическое значение благодаря многочисленным областям применения. Он использовался в качестве имитатора алмаза, а также активного элемента в мощных лазерах [2].

Были исследованы условия применения, рассмотрены компоненты и тензоры упругости. Обнаружено особое направление распространения акустических волн, и показано, что данные кристаллы на практике являются анизотропными. В целом кристаллы Si нашли широкое применение в устройствах памяти, магнитооптике и микроволновой технике [3].

Ключевые слова: Эффективные упругие постоянные, поляризация, кремний, кристаллы, плоскость, волны, распространение, действительный, мнимый.

Introduction. Both velocity and attenuation of acoustic waves have been determined in Si crystals in the frequency of 30 MHz. The Si sample had the shape of a parallelepiped, with the length of ~12 mm, 5 and 6 mm respectively, oriented along the [100] direction with an accuracy of 1°. Piezoelectric transducers made of X- or Y-cut quartz were used to excite acoustic waves. The velocity of acoustic waves V was determined either by the pulse interference method with an accuracy of 0.01%, or using a delay generator, which makes it possible to measure the time intervals between elastic pulses with an accuracy of 0.01 μs [3].

Research methodology. Experimental block scheme is shown in figure 1. This method is called acoustic method. Electromagnetic wave is generated by high frequency generator and then it is converted from electromagnetic wave to acoustic wave by transducer.

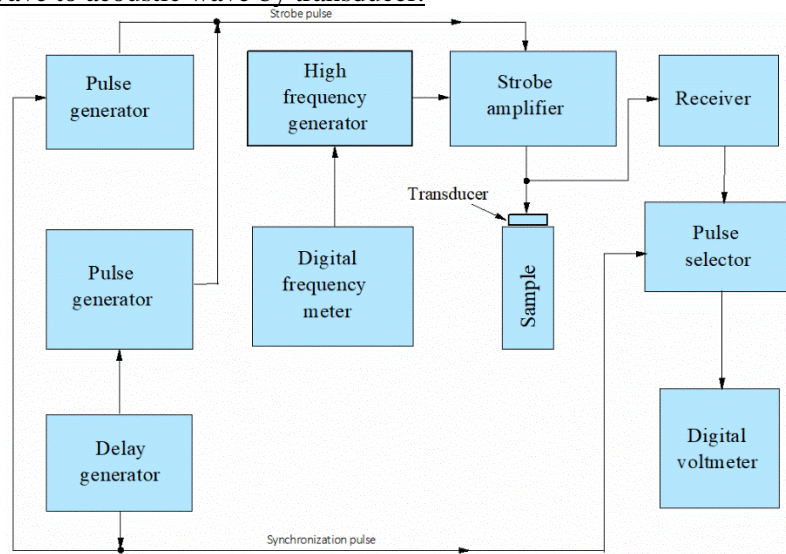


Fig.1. Block diagram of the measurement system for determining the acoustic wave characteristics using the Williams–Lamb method

The figure 2 illustrates an oscilloscope screenshot displaying a signal waveform based on the image. The horizontal axis represents time, with a scale of 5.00 μs per division. The vertical axis represents voltage, with a scale of 300 mV per division.



Fig.2. An image of a series of echo pulses with a delay interval relative to each other

Based on the measured values of A_1 , A_2 and L , the attenuation coefficient of acoustic waves is determined using this equation [4, 5].

PHYSICS

The amplitude of the total echo pulses, which is the result of the interference of acoustic signals, depends on the phase difference between the oscillations filling these pulses and the length of the sample L_0 . By changing the frequency of these oscillations within small limits, it is possible to fix the frequency values at which the amplitude of the total pulses reaches a minimum or maximum, and determine the velocity of the acoustic waves with an accuracy of $\sim 0.1\%$ from the relation:

$$V = 2L_0\Delta\nu, \quad (1)$$

where $\Delta\nu$ is the difference between two adjacent frequencies at which the minimum of the total interference pulse is achieved. The accuracy of determining the acoustic wave velocity is limited by the limits of the sample length measurement and is $\sim 0.1\%$. The linear operating mode of the measuring system was ensured by an attenuator at the input of the measuring receiver.

For crystals of cubic symmetry, which include Si crystals, it is necessary to know three independent components of both the real and imaginary parts of the elasticity tensor. The values of the effective elastic constants c'_{eff} and c''_{eff} for longitudinal and transverse acoustic waves along the directions [100], [110], and [111] were determined from the values of velocity and attenuation coefficient of these acoustic waves [6].

$$c_{ijkl} = c'_{ijkl} + ic''_{ijkl} \quad (2)$$

Results and discussions. For Si crystals, which have cubic symmetry, it is necessary to know three independent components of the real and imaginary parts of the elasticity tensor. The Si crystal elasticity tensor, taken from the present components of the values in [3], cites literature that provides a good fit. In crystals, each has an optional direction along the acoustic wave propagation velocity and attenuation coefficient expressions using the effective elastic constant, with calculations possible [7].

$$c'_{eff} = \rho V^2. \quad (3)$$

Figure 3 illustrates the angular dependence of the effective elastic constant C'_{eff} for silicon (Si) in the (001) plane. The maximum and minimum values occur along the [100] and [110] directions, confirming that the effective elastic constant of Si is direction-dependent. This anisotropy plays a crucial role in determining polarization characteristics in the crystal.

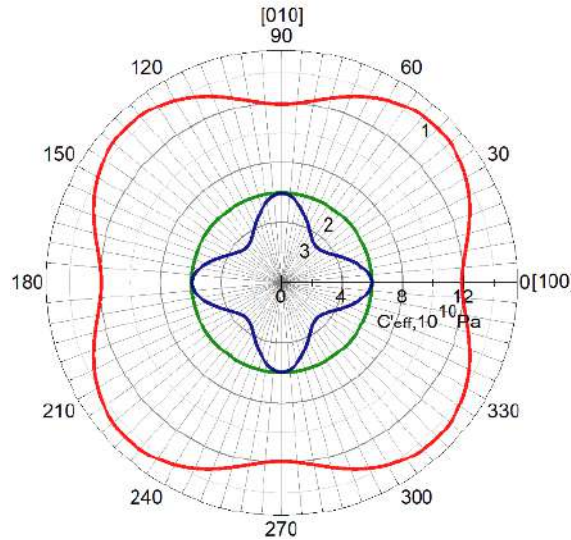


Fig. 3. Effective real elastic constants of quasi-longitudinal (1), shear (2) and quasi-shear (3) acoustic waves in the (001) plane

Figure 4 shows the angular dependence of the effective elastic constant C'_{eff} for silicon (Si) in the (110) plane. There is an anisotropy for shear waves in this plane.

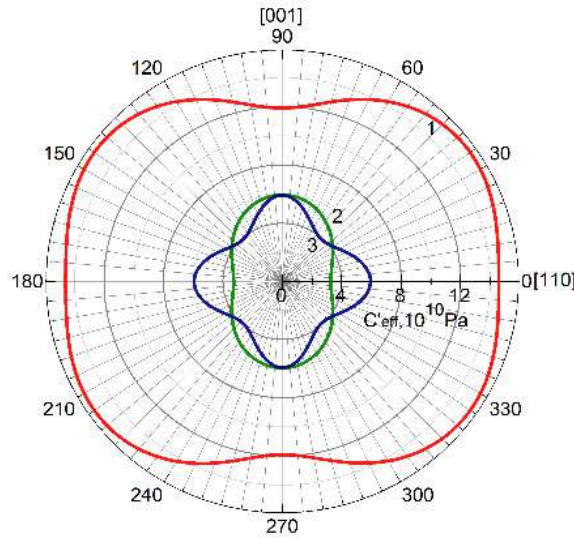


Fig. 4. Effective real elastic constants of quasi-longitudinal (1), shear (2) and quasi-shear (3) acoustic waves in the (110) plane

For the [100] direction, the effective elastic constants c'_{eff} and c''_{eff} coincide, respectively, with the elasticity tensor components c'_{11} and c''_{11} for longitudinal waves and with c'_{44} and c''_{44} for transverse waves. The values of the components c'_{12} and c''_{12} were determined from the data on the velocity and attenuation of transverse acoustic waves along the [110] direction with polarization along the [110] axis from the relations:

$$c'_{eff} = \frac{c'_{11} - c'_{12}}{2}, \quad (4)$$

$$c''_{eff} = \frac{c''_{11} - c''_{12}}{2}. \quad (5)$$

The values of the obtained real components of the elasticity tensor are in good agreement with the literature data given in [2, 3]. The propagation velocity and acoustic attenuation along any arbitrary direction can be calculated using effective elastic constants with the help of expressions [4]:

Deviation of the polarization direction of quasi-longitudinal waves from their propagation direction in the (110) plane is higher than that in the (001) plane. It is meaning that greater anisotropy effect and stronger directional dependence of wave propagation in the (110) plane. The direction of the polarization vector of a quasi-longitudinal wave (angle Ψ relative to the [100] axis) propagating in the (001) plane is determined using an expression that can easily be derived from the Green–Kristoffel system of equations by substituting the corresponding values of the effective elastic constants and the real components of the Green–Kristoffel tensor [8, 9, 10]:

$$\Psi = \arctg\left(\frac{\sqrt{2} \cdot \Gamma'_{13}}{\rho V^2 - \Gamma'_{33}}\right), \quad (6)$$

V–velocity of acoustic waves The components Γ'_{13} and Γ'_{33} in (6) are determined by the relations

$$\Gamma'_{13} = (c'_{12} + c'_{44}) \cdot \kappa_1 \cdot \kappa_3, \quad (7)$$

$$\Gamma'_{33} = c'_{44}(\kappa_1^2 + \kappa_2^2) + c'_{11}\kappa_3^2, \quad (8)$$

where the angle φ sets the direction of the wave vector of a longitudinal acoustic wave in the (001) plane.

The direction of the energy transfer of longitudinal acoustic waves is determined through the components of the group velocity vector V_g of the acoustic wave with a wave normal κ and polarization γ [11, 12, 13]:

$$V_{gi} = \frac{1}{\rho V} c_{ijkl} \kappa_k \eta_j \eta_l \quad (9)$$

The results of calculating the deviation of the polarization vector and the energy transfer direction for longitudinal acoustic waves from the direction of their propagation in the (001) plane are presented in Fig. 5. It can be seen that the deviation of the energy flux from the wave vector is very small for the longitudinal acoustic waves under consideration. The maximum deviation of the energy flux from the wave vector is 10° . These results confirm once again that Si crystals are practically elastically anisotropic media.

The calculation results in the form of dependence of the deviation of the polarization vectors of quasi-longitudinal waves on the direction of their propagation in the plane (110) are shown in Fig. 5. Since this

plane is perpendicular to the axis of symmetry of the second order, the calculation data are presented in the range of angles from 0 to 180 degrees. Angles are measured from the [110] direction.

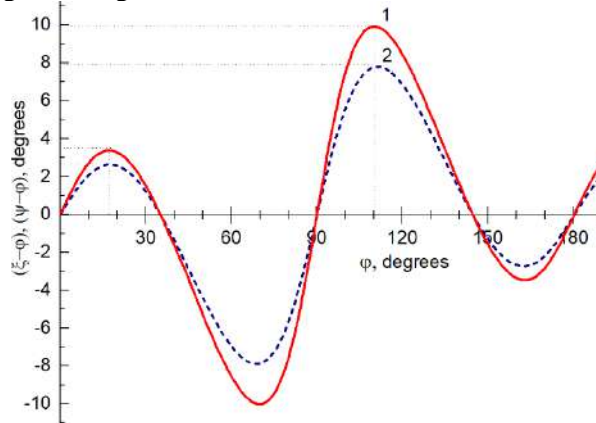


Fig. 5. Deviation of energy flux density (1) and polarization (2) of quasi longitudinal acoustic waves propagated in the (110) plane in Si crystal

Conclusion. The study simultaneously determined the temperature dependence of the attenuation coefficient and the propagation velocity of acoustic waves in a Si crystal. The obtained values of the real components of the elasticity tensor allow us to analyze the spatial distribution of these acoustic wave properties. It was shown that the attenuation coefficient of acoustic waves increases linearly not only at low temperatures but also at temperatures above room temperature. The experimental results obtained at room temperature are consistent with the results obtained from literature sources [8]. It is evident that for these waves the maximum deviation of the polarization vector from the wave normal, equal to approximately ± 8 degrees, is observed when the wave normal is directed in the plane (110) at angles close to 60 or 110 degrees relative to the [110] axis. The values of the real and imaginary components of the elasticity tensor which allow to analyze the spatial dispersion of the characteristics of acoustic waves have been obtained. It is shown that the strongest attenuation anisotropy is observed for purely transverse acoustic waves propagating in the (110) plane with polarization along the [001] axis. The revealed features of the anisotropy of the characteristics of acoustic waves can be used in the development of acoustic delay lines, acousto-optic modulators and deflectors based on gallium arsenide crystals.

REFERENCES:

1. Singh R. K. and Singh R. P., *Studies on Acoustical Dissipation and Related Parameters in Vth Group Mononitrides, Proceedings of 20th International Congress on Acoustics, ICA 2010.*
2. Koechner W., *Rev. Sci. Instrum.* 41, 1699 (1970).
3. Von Aulock W. H., Ed., *Handbook of Microwave Ferrite Materials (Academic, New York, 1.965).*
4. Dieulesain E., Royer D, *Elastic waves in solids I Free and guided propagation.* pp. 177-199, 1996.
5. Akhmedzhanov F.R., Kurbanov J.O., Boltabaev A.F., *Attenuation of acoustic waves in single-domain and polydomain LiTaO3 crystals, Sensors & Transducers 246, No.7, 2020. P. 43-47.*
6. Newnham R.E. *Properties of Materials /Anisotropy/ Symmetry, New York, Oxford University Press, 2005.*
7. D. Royer, E. Dieulesaint, *Elastic Waves in Solids II, Verlag Berlin, Heidelberg, Springer, 2000.*
8. M.P Shaskolskaya. (ed.) *Acoustic crystals. Handbook. M., Nauka, 1982.*
9. Akhmedzhanov F.R., Lemanov V.V., Nasyrov A.N., *Acoustic attenuation surfaces in crystals, J. Tech. Phys. Letters, Vol. 6, Issue 10, 1980, pp. 589-592.*
10. I. D. Royer and E. Dieulesaint, *Elastic Waves in Solids I: Free and Guided Propagation (Springer-Verlag, Berlin,2000).*
11. Newnham R. E., *Properties of Materials: Anisotropy, Symmetry, Structure (Oxford Univ. Press, New York, 2005).*
12. Jaeken J. W. and Cottenier S., "Solving the Christoffel equation: Phase and group velocities," *Comput. Phys. Commun.* 207, 445–451 (2016).
13. Akhmedzhanov F. R., Mirzaev S. Z., and Saidvaliev U. A., "Parameters of elastic anisotropy in bismuth silicate crystals," *Ferroelectrics* 556 (1), 23–28 (2020).<https://doi.org/10.1080/00150193.2020.1713335>

**ПРИМЕНЕНИЕ МЕТОДОВ СПЕКТРОСКОПИИ ДЛЯ СОХРАНЕНИЯ
ЦВЕТНОСТИ АБРИКОСОВОГО СОКА****Турсунов Сардор Уйгунович,***Базовый докторант Бухарского государственного технического университета***Астанов Солих Хусенович,***Профессор кафедры точных наук Бухарского государственного
технического университета**s.h.ostonov@rambler.ru***Касимова Гузал,***Доцент кафедры точных наук Бухарского государственного
технического университета***Мухаммадова Анзура Баходир кизи,***Базовый докторант Бухарского государственного технического университета*

Аннотация. В данной работе разработан усовершенствованный способ получения сухого абрикосового сока, обеспечивающий максимальное сохранение микроэлементов, витаминов и биологически активных веществ (БАВ) исходного сырья. Определены рациональные технологические параметры и условия процесса, позволяющие получать сухой сок высокого качества с сохранением его функциональных свойств.

Ключевые слова: цветность, спектр поглощения, индивидуальные полосы, каротиноиды, хроматография, сок абрикосовый, гипохромный эффект, красящий пигмент.

**O‘RIK SHARBATINING RANGINI SAQLASH UCHUN SPEKTROSKOPIYA
USULLARIDAN FOYDALANISH**

Annotatsiya. Ushbu ishda quritilgan o‘rik sharbatini olishning takomillashtirilgan usuli ishlab chiqildi. Bu usul xomashyo tarkibidagi mikroelementlar, vitaminlar va biologik faol moddalar (BFM)ni maksimal darajada saqlab qolishni ta‘minlaydi. Jarayonning optimal texnologik parametrlari va sharoitlari aniqlanib, yuqori sifatli, o‘zining funksional xususiyatlarini saqlagan holda quruq sharbat olish imkoniyati yaratildi.

Kalit so‘zlar: ranglilik, yutilish spektri, individual polosalar, karotinoidlar, xromatografiya, o‘rik sharbati, gipoxrom effekt, bo‘yoq pigmenti.

**APPLICATION OF SPECTROSCOPY METHODS FOR PRESERVING THE COLOR
OF APRICOT JUICE**

Abstract. In this study, an improved method for producing dried apricot juice was developed, ensuring maximum preservation of microelements, vitamins, and biologically active substances (BAS) present in the raw material. Optimal technological parameters and process conditions were determined, enabling the production of high-quality dried juice while maintaining its functional properties.

Keywords: color intensity, absorption spectrum, individual bands, carotenoids, chromatography, apricot juice, hypochromic effect, coloring pigment.

В настоящее время разработка эффективных технологий получения сухих фруктовых соков является одной из актуальных задач пищевой промышленности. Особое внимание уделяется сохранению биологически активных веществ, витаминов и органолептических свойств продукта в процессе переработки. Известен способ получения концентрированного сока, при котором процесс осуществляется при давлении 10^{-1} Па и температуре около $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ [1]. Однако в результате получают продукт с повышенной влажностью, который не соответствует требованиям сухого продукта. Также известен способ получения сухого сока, включающий замораживание сырья при температуре $-38\text{ }^{\circ}\text{C}$ и последующую сублимацию при температуре около $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ с последующим измельчением в порошок [2]. Несмотря на эффективность данного метода, он является многостадийным и энергоёмким, что увеличивает себестоимость готовой продукции. Наиболее близким по технической сущности

является способ, основанный на выпаривании сока прямого отжима при пониженном давлении (10^{-1} Па) и температуре не выше $50\text{ }^{\circ}\text{C}$ до получения концентрата с влажностью 60–70%, с последующей сушкой при атмосферном давлении в течение длительного времени (до 5 суток) до достижения влажности около 12% [3]. Однако данный способ характеризуется рядом недостатков. Использование вакуумных условий требует значительных энергетических затрат, а длительное воздействие температуры может привести к деструкции витаминов и биологически активных веществ. Кроме того, наблюдаются изменения цвета и вкусовых характеристик продукта, что снижает его качество. Получаемые гранулы сухого сока не в полной мере соответствуют современным требованиям к пищевой продукции. В связи с этим возникает необходимость разработки более эффективного способа получения сухого абрикосового сока, обеспечивающего сохранение его качественных и функциональных свойств. Однако, концентрация каротиноидов в растительных средах и в живых организмах очень низкая. В зеленых листьях она составляет порядка 0,07-0,2% в расчёте на сухое вещество [4]. В основном каротиноиды получают из природных растительных источников.

Из приведённого литературного обзора следует, что в растворах и соках плодов может быть достаточное количество молекул O_2 . Присутствие этих молекул способствует окислению молекул красящих пигментов, в частности, каротиноидов.

Методика исследования. В качестве объекта исследования выбран сок абрикосовых плодов, являвшийся сырьём для получения натуральных красителей. Удаление молекулярного кислорода, растворённого в соках, существенно приостанавливает ухудшение готовых продуктов. Адсорбционные показатели сока до- и после откачки молекулярного кислорода отмечены изменением значения оптической плотности, которая регистрировалась на спектрофотометрах Specord 50 SA и EMC-30 PC-UV (Analytik jena, Германия), позволяющих проводить измерения оптической плотности в диапазоне 190-1100 нм. Отражательная способность пищевых продуктов регистрировалась на спектрометре (СФ-18 и Пульсар Россия). Наличие полученных соединений определяли масс-спектрометром (MAT-311 США).

В работе используются порошки флавонов кверцетина, мирицетина, рутина торговой марки "CHDA". Электронные спектры поглощения были измерены на спектрофотометре EMC30 PC-UV, который позволяет измерять значения оптической плотности с точностью 0,3% и высоким разрешением в диапазоне 190-1100 нм. Спектры флуоресценции и возбуждения люминесценции измерялись с помощью установки на базе двух монохроматоров типа MDR-76 с фотоэлектронной регистрацией. Для удобства сравнения спектров поглощения и флуоресценции они нормализованы к единице. Спектры дисперсии оптического вращения и линейного дихроизма были получены на круговом дихрографе Jasko-20 с использованием оптической насадки в виде двойного параллелепипеда Френеля, рассчитанной для видимой и ультрафиолетовой областей спектра.

Использовались следующие растворители: дистиллированная вода, этиловый спирт, ацетон, хлороформ, очищенные по способу [5].

Спектроскопические показатели абрикосового сока. Исследованы адсорбционные свойства сока в зависимости от времени хранения при атмосферном давлении и температуре (рис 1). Из рис 1 видно, что спектры поглощения абрикосового сока не являются структурными. И на их основе выделяются максимумы полос поглощения определённых соединений, имеющих в составе объёма сока который отмечен соответствующими стрелками (рис2, крив.2).

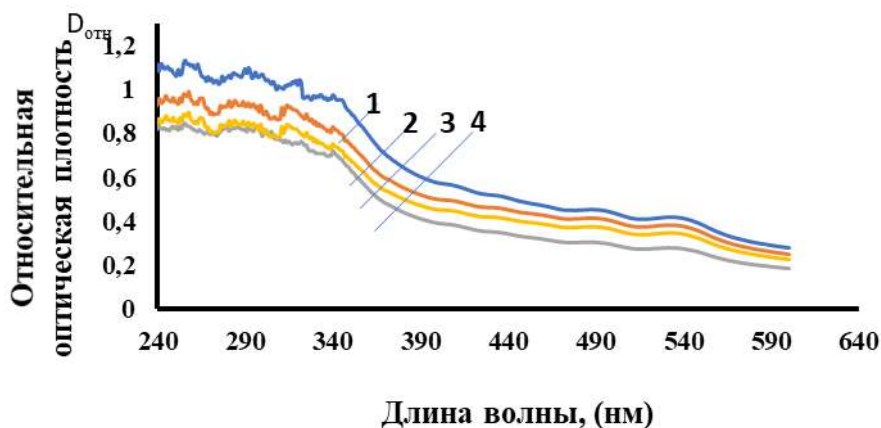


Рис.1. Спектр поглощения абрикосового сока (1) в зависимости от времени его хранения 0(1); 3(2); 6(3); 9 часов (4)

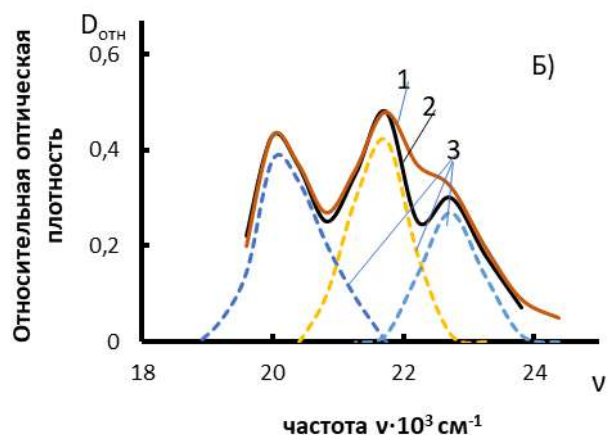
Исследованиями установлено, что спектр поглощения абрикосового сока претерпевает существенную деформацию в зависимости от времени его хранения. Наблюдаемая деформация проявляется в виде уменьшения поглощательной способности (гипохромноэффект) сока от времени его хранения, необходимого для проведения технологического процесса в течение девяти часов (рис.1, крив.4), с целью получения готового продукта в виде сухого сока.

Также из рис.1 следует, что хранение сока в течение первых трёх часов при нормальном состоянии (атмосферной температуре и давлении) приводят к падению поглощательной способности сока на 14 % (рис.1, срав. крив. 1 и 2). Во второй и третьей трёх часовых периодах хранения уменьшение адсорбционной способности составляет по 8 % соответственно (рис.1, срав. крив. 2, 3 и 4).

Определение каротиноидов в качестве красящих веществ абрикосового сока. Спектр поглощения абрикосового сока, приведенного на рис.1, состоит из широкой полосы, где явно выделяющиеся максимумы имеют следующие длины волн: 410; 440; 458; 495 и 545 нм, которые отмечены стрелками (рис.2). Предполагается, что отмеченные максимумы полос поглощения могут быть сильно перекрывающимися между собой, а также с отсутствием для них формы спектров. Для получения сведений о формах спектров адсорбции красящих пигментов сока использованы литературные данные о цветности абрикоса. Авторами [6-8] показано, что внешняя окраска этих плодов связана присутствием в их составе каротиноидов, флавонов и антоцианов. Формы электронных полос флавонов, каротиноидов и антоцианов были определены из анализа литературных данных. При этом получены сведения о формах спектров поглощения молекулярных полос, которые были связаны между собой (рис.2, крив.2). Из рис.2, кривая.2 следует, что формы объединённых полос спектров поглощения построены с учетом максимумов в данных спектрах абрикосового сока (рис.1). Спектры поглощения имеют сильно перекрывающийся характер (рис.2, крив.2). В целях определения индивидуальных полос, составляющие сильно перекрывающиеся спектры поглощения, показанные на рис.2 в качестве сплошной линии расчёт индивидуальных полос производился методом Аленцева-Фока [8-11].

Для разделения перекрывающихся полос спектров поглощения абрикосового сока были приведены шкалы частот (рис.2 крив.2). Нами были проанализированы литературные данные о формах спектров поглощения пищевых красителей растительного происхождения, в которых содержатся каротиноиды, флавоны, антоцианы и их производные, а также ряд реодахлоринов [12-14]. В случае отсутствия спектров поглощения красящих пигментов нами использованы спектры возбуждения люминесценции [15] для разрешения спектров поглощения растительных молекул. Полученные результаты расчёта индивидуальных полос абрикосового сока показаны на рис.2 и они отмечены пунктирными линиями. Из рис.3 видно, что индивидуальные полосы в виде крив.3-10 имеют колоколообразные формы, которые подтверждаются соответствующими решениями уравнения, модифицированного метода Аленцева-Фока, на основе которого были решены функции Гаусса.

Значение полуширины σ - индивидуальных полос определены методом, разработанный авторами, который использован в целях определения значения σ для дискретных полос поглощения ассоциатов витамина B₂ [16-17]. На рис.2, крив.2 имеет форму спектра поглощения красящих пигментов, состоящие из молекул флавона, каротиноида и антоциана, отмеченные сплошной линией.



Индивидуальные полосы являются результатом теоретического расчёта модифицированного метода Аленцева-Фока. На основе этих данных представлены индивидуальные полосы, разделённые на 3 группы. К первой группе отнесены индивидуальные полосы с максимумами, совпадающими с флавоном, находящейся в интервале $22,3 - 40 \cdot 10^3 \text{ см}^{-1}$. Вторая и третья

группы имеют индивидуальные полосы, находящиеся в интервалах $18,5-25 \cdot 10^3 \text{ см}^{-1}$ и $16,3-21,2 \cdot 10^3 \text{ см}^{-1}$, относящиеся к каротиноидам и

антоцианам соответственно. Полученные теоретические расчёты положения максимумов и величины полуширины индивидуальных полос, сопоставленные с экспериментальными данными, приведены в табл.1

Из анализа литературных данных следует, что наблюдаемые максимумы поглощения могут быть отнесены к красящим пигментам растительного происхождения: флавонам, каротиноидам и антоцианам. Следует отметить, что флавоны и каротиноиды широко распространены в плодах с жёлтыми красящими веществами, в том числе и в плодах абрикоса [5]. Антоцианы имеют красный цвет с различными оттенками и интенсивностями. Этим параметрам соответствует цвет абрикоса, обладающий жёлто-оранжевым цветом с красным оттенком. При этом использован его спектр поглощения и рассчитанные индивидуальные полосы флавонов, каротиноидов и антоцианов в виде их молекулярных красящих пигментов (рис.2, крив. 1).

Рис.2., Расчётные адсорбционные способности красящих пигментов абрикосового сока (1), их индивидуальные полосы (3), а также его экспериментальные спектры поглощения (2), вторым (Б) группам соответственно.

Из рис.2 следует, что расчётные адсорбционные способности сока можно представить в виде трёх групп молекулярных спектров. Первая из этих групп полос поглощения относятся к красящим пигментам с молекулярной структурой флавонов и их производными [12-13]. Экспериментальные параметры индивидуальных полос, длины волн максимумов (λ_{max}) и полуширины σ - полос приведены в таблице 1. На основании расчётных и экспериментальных спектров определена нативность молекулярной структуры красящего пигмента абрикосового плода что является кверцетином, относящийся к классу флавоноидов. В результате выше приведённых рассуждений нами сделан вывод, а том что один из красящих пигментов абрикосового сока является кверцетином. Вторая группа расчётных полос поглощения соответствует спектрам красящих пигментов абрикосового сока и находится в интервале частот $18870 \div 25000 \text{ см}^{-1}$ (рис.2). Из анализа литературных данных установлено, что форма полос второй группы соответствует производным каротиноидов [13]. Согласно рис.2 данная рассчитанная полоса обладает тремя индивидуальными спектрами (рис.2, крив.2).

Согласно рис.2 данная рассчитанная полоса обладает тремя индивидуальными спектрами (рис.2Б, крив.2).

Максимумы длин волн (λ_{max}) и значения полуширины σ - спектров приведены в табл.1. Для выделения производных каротиноида, имеющихся в абрикосовом соке, он был экстрагирован в бензоле с применением длительной (разделяющей) воронки. Выбор растворителя осуществлялся из расчёта, что каротиноид хорошо растворим в бензоле.

Таблица 1.

Сопоставление теоретических и экспериментальных параметров индивидуальных полос поглощения красящих пигментов абрикосового сока.

Обозначения полос ν	Теоретические параметры			Экспериментальные параметры			Литература
	$\nu_{max}, \text{ см}^{-1}$	$\lambda_{max}, \text{ нм}$	$\sigma, \text{ см}^{-1}$	$\nu_{max}, \text{ см}^{-1}$	$\lambda_{max}, \text{ нм}$	$\sigma, \text{ см}^{-1}$	
ν_3	38461	260	7185	38460	260	7180	[28,29]
ν_4	34482	292	2380	34400	290	2380	[28,29]
ν_5	31250	320	3923	31256	320	3923	[28,29]
ν_6	28571	349	2384	29410	355	2384	[28,29]
ν_7	22720	440	1032	22720	440	1032	[30]
ν_8	21739	458	947	21730	460	945	[30]
ν_9	20202	495	801	20408	490	800	[30]
ν_{10}	18518	545	1687	18519	540	15544	[31,32]
ν_{11}				25000	400	610	[31,32]

Форма расчётного спектра поглощения показана на рис.3, где спектр поглощения сока в бензоле занимает область длин волн $360 \div 510 \text{ нм}$, что относится к адсорбционной способности каротиноидов. Бензольный раствор сока подвергался колончатой хроматографии на “Сефадекс-G25”, при этом проявлялись три скользящие зоны. Первая скользящая зона обладает объёмом 55% от

общего объёма колонки. Объёмы второй и третьей подвижных зон составляли 30 и 15% от объёма раствора в колонке соответственно.

Дальнейшее увеличение времени хранения сока до значений времени 15 и 18 часов приводит к гипохромному спектру поглощения абрикосового сока на 20 и 30 % соответственно. Таким образом, увлечение хранения сока с нейтрализацией молекулярного кислорода способствует сохранности цветности полуфабриката только в течение первых девяти часов. Однако, хранение сока в течение последующих девяти часов приводит к уменьшению интенсивности спектра поглощения на 70%. При этом цветность сока также ухудшается. Увеличение времени хранения сока не только способствует гипохромной поглотительной способности сока, но и приводит к исчезновению максимумов индивидуальных полос поглощения, которые относятся к красящим пигментам абрикосовых плодов.

Таким образом, на основании экспериментальных данных, по третьему разделу настоящей статьи следует вывод: стабилизация абрикосового сока в зависимости от времени его хранения можно достичь нейтрализацией молекулярного кислорода в соковом объёме полуфабриката в интервале каждых восьми - девяти часов хранения. Для сохранности цветности абрикосового сока нейтрализация молекулярного кислорода необходимо осуществлять через каждые девять часов его хранения.

Вывод. Таким образом хроматографическими и спектральными исследованиями было определены, основные красящие пигменты абрикосового сока, являющиеся каротиноидами, доля которых [условно принято равным 100%] в β -изомере составляет 55, ϵ -30 и ϵ -15%, соответственно. Цветность сока наряду с каротиноидами формируется катехинами, флавонами и антоцианами. Проведёнными исследованиями, обнаружено, что цветность абрикосового сока в зависимости от времени его хранения в течение 40 часов остаётся неизменным при его кристаллизации и удалении молекулярного кислорода, растворённого в соковом объёме. Постоянность цветности сока в период хранения достигается барботированием сокового объёма газом молекулярного азота (N_2).

REFERENCES:

1. Емельянов А.А, Емельянов К.А. Устройства для удаления влаги в вакууме. патент RU 2276314 С 10.05.2006.
2. Газин М.Ю, Шепошпилова Г.И. Способ производства сухого сока. патент RU 2136182 С 10.09.1999.
3. Емельянов А.А, Емельянов К.А. патент RU 2370164 нуб 20.10.2009.
4. Gunjević, V., Musa, M. M., Zurak, D., Svečnjak, Z., Duvnjak, M., Grbeša, D. and Kljak., K., "Carotenoid degradation rate in milled grain of dent maize hybrids and its relationship with the grain physicochemical properties," *Food Research International* 177, 113909 (2024).
5. Gordon, A. and Ford, R., [Chemist's companion], Moscow, Publishing houses, Mir, 437-445 (1976).
6. Kholmamatov, H. H. and Khabibov, Z. H., [Medicinal plants], Uzbekiston "Medicine" of the Uzbek SSR, 134 (1978).
7. Hammerman, A. F., Kadaev, G. N. and Yatsenko-Khmolovsky, A. A., [Plants are healers], Moscow, Stagnation school, 544 (1990).
8. Astanov, S. H., Shamsiev, R. H. and Fayzullaev, A. R., [Food coloring: methods of preparation and stabilization], Tashkent, 195 (2014).
9. Deineka, V. I. and Kulchenko, Ya. Yu., "Quantum chemical calculations of the electronic absorption spectra of some anthocyanidins," *Journal of Physical Chemistry* 95(7), 1051-1058 (2021).
10. Nekrasov, A. A. and Vannikov, A. B., "Spectroelectrochemical processes in polyaniline layers obtained by various methods," *Electrochemistry* 47(1), 3-17 (2011).
11. Li, X., Xu, Yi-Q. and Zhou, G.-Q., "Airy transformation of Lorentz-Gauss beams," *Results in physics* 19, 103643 1-10 (2020)
12. Taraba, A. and Szymczyk, K., "Quercetin and rutin mixtures with alcohols: Spectroscopic and conductometric studies," *Journal of Molecular Structure*, 1-8 (2020).
13. Jawad ur Rehman, Imdad Ali, Salim Saifullah, Shafi Ullah, Muhammad Raza Shah and Muhhad Imrah, "Synthesis of quercetin based self-assembling supramolecular amphiphiles for amphotericin B delivery," *Journal of Molecular Liquids* 333, 115941 (2021).

PHYSICS

14. Peng, A., Tang, X., Feng, Y., Huang, Y., Jilai, Tian, K., Lu, M., Zhao, Y., Pan, Y., Wang, S., Hu, Y., Zhao, W., Song, C. and Wang, Q., "Molecular mechanism of lycopene cyclases regulating carotenoids ratio in different branches during tea leaf and flower development," *Horticultural Plant Journal* 9(6), 1177-1192 (2023).
15. Thi Ngoc Nhon Hoang, Ngoc Phuong Minh Nguyen, Thi Anh Dao Dong and Thi Hong Anh Le, "Anthocyanin isolation from *Hibiscus sabdariffa* L. flowers by extraction, macroporous D101 resin purification, and biological evaluation," *Journal of Agriculture and Food Research* 14, 100848 (2023).
16. S.X.Astanov, G.K..Kasimov, E.N.Kurtaliyev, N.N.Nizomov, A.Jumabayev. "Electronic nature and structure of aggregates of riboflavin molecules" *Spectrochimica Acta Part A: Molecular and Biomolecular Spectroscopy* 248 (2021) 119177. P.1-8
17. Astanov, S. Kh., Daminov, M. I., Kasimova, G. K. and Shamsiev, R. Kh., "Spectroscopy of a non-luminescent associate of indigo carmine in solutions," *Scientific reports of bukhara state university* 2(84), 3-15 (2021).

ЭЛЕКТРОННЫЕ И МАГНИТНЫЕ СВОЙСТВА ИНТЕРМЕТАЛЛИЧЕСКОГО СОЕДИНЕНИЯ DyFe₂, ИССЛЕДОВАННЫЕ МЕТОДОМ DFT+U

Имамназаров Даврон Хамраевич,
доцент, Самаркандский государственный университет имени Шарофа Рашидова
Журакулова Хосият Холмуродовна,
магистрант, Самаркандский государственный университет имени Шарофа Рашидова.
juraqulovaxosiyat11@gmail.com

Аннотация. Электронные и магнитные свойства интерметаллического соединения DyFe₂ исследованы методом DFT+U с использованием программного пакета Quantum ESPRESSO. Были применены параметры Хаббарда $U = 5$ эВ для Dy и $U = 4$ эВ для Fe. Оптимизированный параметр решётки $a = 7.312$ Å отличается от экспериментального значения всего на 0.19%. Рассчитанные плотность состояний и зонная структура подтвердили металлический характер проводимости DyFe₂. Анализ магнитных моментов показал антипараллельное упорядочение атомов Dy (-0.477 μB) и Fe ($+2.680$ – 2.683 μB), что свидетельствует о ферримагнитной природе данного соединения.

Ключевые слова: DyFe₂, интерметаллическое соединение, кристаллическая структура, плотность состояний, магнитный момент

DyFe₂ INTERMETALLIK BIRIKMASINING ELEKTRON VA MAGNIT XOSSALARINI DFT+U USULI YORDAMIDA TADQIQ QILISH

Annotatsiya. DyFe₂ intermetallik birikmasining elektron va magnit xossalari Quantum ESPRESSO dasturi yordamida DFT+U usulida tadqiq etildi. Dy uchun $U = 5$ eV, Fe uchun $U = 4$ eV Xabbard parametrlari qo'llanildi. Optimallashtirilgan panjara parametri $a = 7.312$ Å eksperimental qiymatdan 0.19% ga farq qiladi. Hisoblangan holatlar zichligi va zona tuzilishi DyFe₂ ning metall o'tkazuvchanligiga ega ekanligini tasdiqladi. Magnit momentlar tahlili Dy atomlari (-0.477 μB) va Fe atomlari ($+2.680$ - 2.683 μB) ning qarama-qarshi yo'nalishlarda tartiblanishini ko'rsatib, birikmaning ferrimagnitik tabiatini namoyon etdi.

Kalit so'zlar: DyFe₂, intermetallik birikma, kristall tuzilish, holatlar zichligi, magnit moment.

ELECTRONIC AND MAGNETIC PROPERTIES OF THE DyFe₂ INTERMETALLIC COMPOUND INVESTIGATED BY THE DFT+U METHOD

Abstract. The electronic and magnetic properties of the DyFe₂ intermetallic compound were investigated using the DFT+U method implemented in the Quantum ESPRESSO package. Hubbard parameters of $U = 5$ eV for Dy and $U = 4$ eV for Fe were applied. The optimized lattice parameter $a = 7.312$ Å deviates by only 0.19% from the experimental value. The calculated density of states and band structure confirmed the metallic conductivity of DyFe₂. Analysis of the magnetic moments revealed antiparallel alignment of Dy atoms (-0.477 μB) and Fe atoms ($+2.680$ – 2.683 μB), demonstrating the ferrimagnetic nature of the compound.

Keywords: DyFe₂, intermetallic compound, crystal structure, density of states, magnetic moment

Введение. Интерметаллические соединения, содержащие редкоземельные элементы, в последние десятилетия активно исследуются как перспективные функциональные материалы. Особый интерес научного сообщества вызывают кристаллизация соединения диспрозий-железо (DyFe₂) в кубической фазе Лавеса и его необычные магнитные свойства [1]. Данное соединение формирует структуру типа C15, относящуюся к пространственной группе Fd-3m, и отличается высокой магнитной анизотропией, а также сложными магнитными фазовыми состояниями [2].

Соединение DyFe₂ обладает металлическим типом проводимости, и в его электронной структуре запрещённая энергетическая щель не наблюдается. Введение различных легирующих элементов позволяет целенаправленно модифицировать его электронную структуру и магнитные

свойства [3]. Именно эти особенности дают основание рассматривать данное соединение как перспективный функциональный материал для применения в промышленности и медицине.

В соединении DyFe_2 ключевую роль играет обменное взаимодействие между ионами диспрозия (Dy^{3+}) и атомами железа. Именно это взаимодействие обуславливает возникновение высокой магнитной анизотропии и формирование различных сложных магнитных фазовых состояний в материале. В результате система демонстрирует ферромагнитно упорядоченное состояние [4].

Следует также отметить, что характер данного упорядочения определяет отклик материала на внешнее магнитное поле. В частности, особенности изменения магнитной восприимчивости и гистерезисного поведения непосредственно связаны с указанными внутренними взаимодействиями [5]. По этой причине исследование соединений типа DyFe_2 представляет значительный интерес и с прикладной точки зрения.

Современные вычислительные подходы, в частности программные пакеты, основанные на методе первых принципов, — такие как Quantum ESPRESSO, — позволяют проводить детальное и достоверное изучение электронной структуры веществ. Подобные расчёты, как правило, выполняются в рамках теории функционала электронной плотности (DFT). Несмотря на высокую эффективность метода DFT для широкого класса систем, в материалах с сильно коррелированными электронами — в частности, в соединениях с участием редкоземельных элементов — он может иметь определённые ограничения. В таких случаях применяется подход DFT+U, обеспечивающий более точный учёт локальных электрон-электронных взаимодействий.

С помощью указанных инструментов возможно с достаточной точностью рассчитать плотность электронных состояний (DOS) и зонную структуру, что играет важную роль в понимании электронных и магнитных свойств материала [6]. С этой точки зрения атомистическое исследование электронной структуры и магнитных характеристик соединения DyFe_2 является одной из ключевых задач настоящей работы [7].

В ходе исследования с помощью программного пакета Quantum ESPRESSO моделируется кристаллическая структура DyFe_2 , после чего на основе подхода DFT+U рассчитываются плотность электронных состояний и зонная структура. Кроме того, проводится анализ магнитных моментов и даётся интерпретация ферромагнитной природы соединения. Полученные таким образом результаты способствуют более глубокому пониманию физических свойств DyFe_2 .

Методы расчёта и моделирование. Расчёты выполнялись в рамках теории функционала электронной плотности (DFT) с использованием программного пакета Quantum ESPRESSO [8]. В качестве обменно-корреляционного функционала применялось обобщённое градиентное приближение (GGA-PBE) [9]. Для корректного описания f-электронов редкоземельного элемента был использован подход DFT+U [10], при этом параметр Хаббарда U был задан равным 5 эВ для Dy и 4 эВ для Fe.

В процессе расчётов применялись ультрамягкие псевдопотенциалы [11]. Энергетический порог разложения волновых функций составил 60 Ry, а для плотности заряда — 600 Ry. Для интегрирования по зоне Бриллюэна была выбрана сетка k-точек Монкхорста–Пака [12] размером $8 \times 8 \times 8$.

Результаты и их обсуждение.

1 Кристаллическая структура. Кристаллическая структура соединения DyFe_2 представлена на рисунке 1. Соединение кристаллизуется в кубической фазе Лавеса типа C15 в пространственной группе Fd-3m [1]. Атомы Dy занимают узлы с большим координационным объёмом, тогда как атомы Fe формируют плотную трёхмерную подрешётку с тетраэдрической координацией. Подобное пространственное распределение усиливает обменные взаимодействия и является одним из ключевых факторов, определяющих магнитную анизотропию соединения [2].

В результате расчётов оптимизированный параметр решётки составил $a = 7.312 \text{ \AA}$, что отличается от экспериментального значения (7.326 \AA) всего на 0.19%. Данный результат свидетельствует о достаточно высокой точности функционала GGA-PBE применительно к соединению DyFe_2 [9].

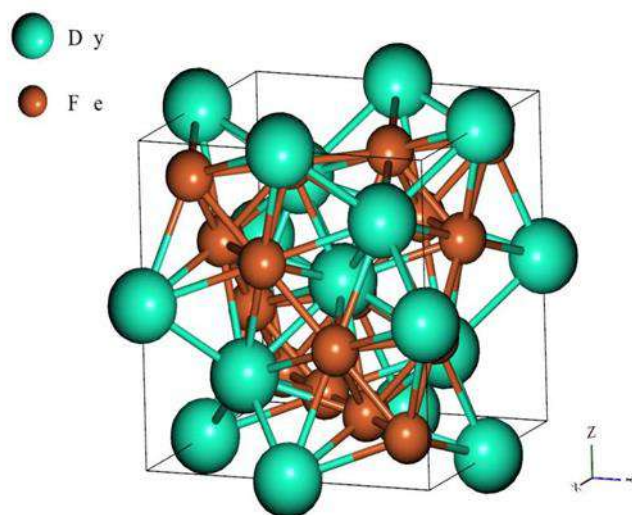


Рисунок 1. Кристаллическая структура интерметаллического соединения $DyFe_2$

2 Электронная структура и плотность состояний. На рисунке 2 представлена рассчитанная плотность электронных состояний (DOS) соединения $DyFe_2$. График включает полную DOS, а также парциальные вклады атомов Dy и Fe для спин-вверх и спин-вниз компонент.

Вблизи уровня Ферми ($E \approx 0$ эВ) плотность состояний отлична от нуля, что свидетельствует о металлическом характере $DyFe_2$ и отсутствии запрещённой энергетической щели. Кроме того, из графика DOS установлено, что вклад электронов со спином вниз в перенос электрического тока превышает вклад электронов со спином вверх.

Асимметрия между состояниями спин-вверх и спин-вниз атомов Dy указывает на наличие магнитного упорядочения. Возникающий вследствие этого магнитный момент приведён в таблице 1. Незначительная асимметрия на атомах Dy обуславливает малую величину магнитного момента, составляющего $-0.4773 \mu_B$.

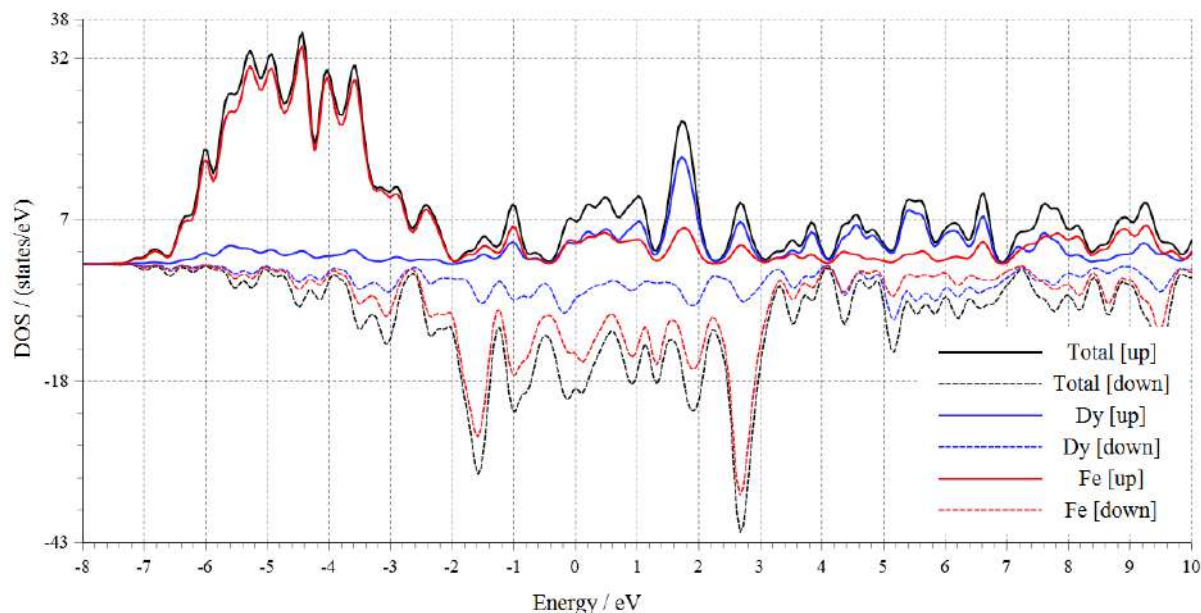


Рисунок 2. Плотность электронных состояний (DOS) интерметаллического соединения $DyFe_2$. Чёрная линия — полная DOS, красная — парциальная DOS атомов Fe, синяя — парциальная DOS атомов Dy; пунктирные линии — спин-вниз компонента

На атомах Fe картина иная: разница в спиновой асимметрии значительно больше, что приводит к формированию высокого магнитного момента величиной $2.6830 \mu_B$.

3 Зонная структура. На рисунке 3 представлена электронная зонная структура $DyFe_2$, рассчитанная вдоль высокосимметричных направлений зоны Бриллюэна. Синие линии соответствуют состояниям спин-вверх, красные пунктирные линии — состояниям спин-вниз [8].

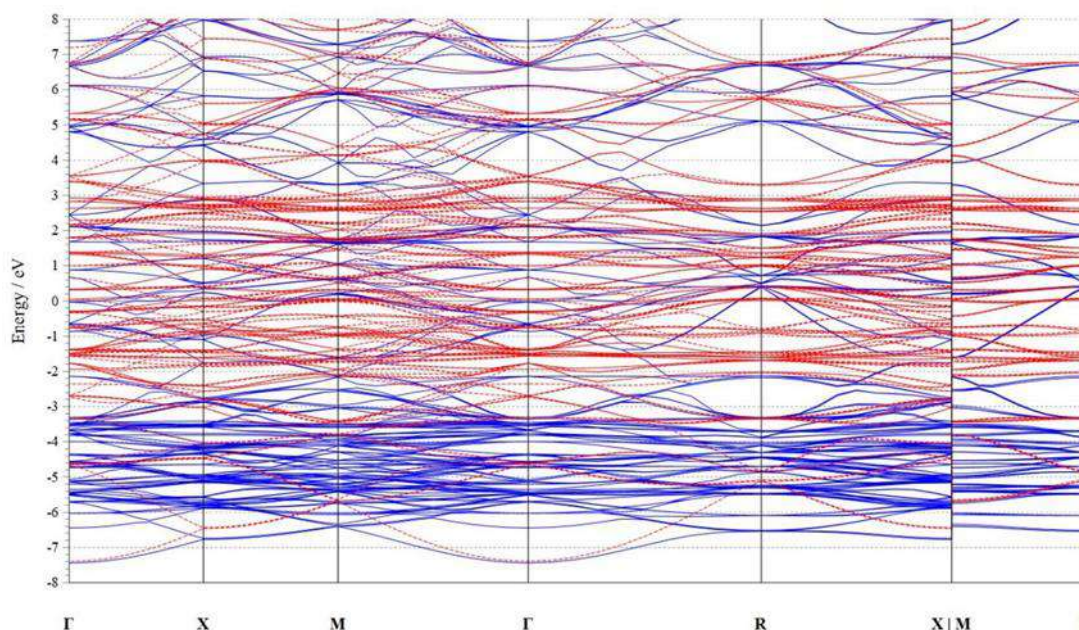


Рисунок 3. Зонная структура интерметаллического соединения $DyFe_2$. Синяя линия — состояния спин-вверх, красный пунктир — состояния спин-вниз

В зонной структуре присутствуют энергетические состояния спин-вверх и спин-вниз, пересекающие уровень Ферми ($E = 0$ эВ), что ещё раз подтверждает металлический характер проводимости соединения. Значительное энергетическое расщепление между зонами спин-вверх и спин-вниз свидетельствует о наличии сильной спиновой поляризации. Закономерно, что именно спиновая поляризация обуславливает возникновение результирующего магнитного момента.

4 Анализ магнитных моментов. В таблице 1 приведены рассчитанные значения магнитных моментов для всех 24 атомов, расположенных в узлах решётки соединения $DyFe_2$.

Таблица 1. Магнитные моменты соединения $DyFe_2$, рассчитанные методом DFT+U

#	Атом	Маг. момент (μ_B)	Направление
1	Dy1	-0.4773	Антипараллельное (\downarrow)
2	Dy2	-0.4772	Антипараллельное (\downarrow)
3	Dy3	-0.4773	Антипараллельное (\downarrow)
4	Dy4	-0.4772	Антипараллельное (\downarrow)
5	Dy5	-0.4773	Антипараллельное (\downarrow)
6	Dy6	-0.4772	Антипараллельное (\downarrow)
7	Dy7	-0.4778	Антипараллельное (\downarrow)
8	Dy8	-0.4772	Антипараллельное (\downarrow)
9	Fe1	2.6802	Параллельное (\uparrow)
10	Fe2	2.6830	Параллельное (\uparrow)
11	Fe3	2.6830	Параллельное (\uparrow)
12	Fe4	2.6802	Параллельное (\uparrow)
13	Fe5	2.6830	Параллельное (\uparrow)
14	Fe6	2.6830	Параллельное (\uparrow)

#	Атом	Маг. момент (μB)	Направление
15	Fe7	2.6830	Параллельное (\uparrow)
16	Fe8	2.6830	Параллельное (\uparrow)
17	Fe9	2.6830	Параллельное (\uparrow)
18	Fe10	2.6802	Параллельное (\uparrow)
19	Fe11	2.6802	Параллельное (\uparrow)
20	Fe12	2.6830	Параллельное (\uparrow)
21	Fe13	2.6830	Параллельное (\uparrow)
22	Fe14	2.6830	Параллельное (\uparrow)
23	Fe15	2.6830	Параллельное (\uparrow)
24	Fe16	2.6830	Параллельное (\uparrow)

Из анализа таблицы следует, что все атомы Dy упорядочены антипараллельно с отрицательным магнитным моментом ($-0.477 \mu\text{B}$), тогда как атомы Fe ориентированы параллельно с положительным магнитным моментом ($+2.680-2.683 \mu\text{B}$). Данная картина свидетельствует о том, что соединение DyFe_2 обладает ферромагнитным поведением, обусловленным антипараллельным упорядочением подрешёток Dy и Fe.

Закключение. В результате проведённых расчётов методом DFT+U были определены ряд важных физических свойств соединения DyFe_2 . Подтверждено, что соединение кристаллизуется в кубической фазе Лавеса типа C15 и относится к пространственной группе Fd-3m. Анализ электронной структуры показал металлический характер соединения, то есть отсутствие запрещённой энергетической щели на уровне Ферми. Согласно результатам расчёта магнитных моментов, подрешётки Dy и Fe упорядочены в противоположных направлениях, формируя ферромагнитное состояние. Сильная спиновая поляризация отчётливо наблюдается также в зонной структуре. Полученные результаты научно обосновывают перспективность DyFe_2 как функционального материала для применения в промышленности и медицине.

ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Yuan, Y., Shen, T., Feng, Y., Liu, C., Liu, X., & Zhao, S. (2023). Tuning the structure, electricity, elasticity and magnetism of DyFe_2 by doping Co atoms: A first-principle study. *Physica B: Condensed Matter*, 666, 415051. <https://doi.org/10.1016/j.physb.2023.415051>
2. Atsumi, H., Hirscher, M., Büchler, E., Mössinger, J., & Kronmüller, H. (1995). Hydrogen diffusion in DyFe_2 and its effect on magnetic properties. *Journal of Alloys and Compounds*, 231(1–2), 71–77. [https://doi.org/10.1016/0925-8388\(95\)01840-9](https://doi.org/10.1016/0925-8388(95)01840-9)
3. Latturner, S. E. (2024). From ternary to quaternary rare earth carbide intermetallics: Trends in structural characteristics. In *Elsevier eBooks* (pp. 275–319). <https://doi.org/10.1016/bs.hpcr.2024.05.001>
4. Bourée-Vigneron, F., Pinot, M., Golab, M., Szytula, A., & Oles, A. (1990). Magnetic order in DyFe_2Si_2 compound. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 86(2–3), 383–386. [https://doi.org/10.1016/0304-8853\(90\)90147-i](https://doi.org/10.1016/0304-8853(90)90147-i)
5. Clark, A. E. (1980). Magnetostrictive rare earth-Fe₂ compounds. *Ferromagnetic Materials*, 1, 531–589.
6. Giannozzi, P., et al. (2009). QUANTUM ESPRESSO: a modular and open-source software project for quantum simulations of materials. *Journal of Physics: Condensed Matter*, 21(39), 395502. <https://doi.org/10.1088/0953-8984/21/39/395502>
7. Kresse, G., & Furthmüller, J. (1996). Efficient iterative schemes for ab initio total-energy calculations using a plane-wave basis set. *Physical Review B*, 54(16), 11169–11186. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.54.11169>
8. Giannozzi, P., et al. (2017). Advanced capabilities for materials modelling with Quantum ESPRESSO. *Journal of Physics: Condensed Matter*, 29(46), 465901. <https://doi.org/10.1088/1361-648X/aa8f79>

PHYSICS

9. Perdew, J. P., Burke, K., & Ernzerhof, M. (1996). *Generalized Gradient Approximation Made Simple*. *Physical Review Letters*, 77(18), 3865–3868. <https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.77.3865>
10. Dudarev, S. L., Botton, G. A., Savrasov, S. Y., Humphreys, C. J., & Sutton, A. P. (1998). *Electron-energy-loss spectra and the structural stability of nickel oxide: An LSDA+U study*. *Physical Review B*, 57(3), 1505–1509. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.57.1505>
11. Vanderbilt, D. (1990). *Soft self-consistent pseudopotentials in a generalized eigenvalue formalism*. *Physical Review B*, 41(11), 7892–7895. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.41.7892>
12. Monkhorst, H. J., & Pack, J. D. (1976). *Special points for Brillouin-zone integrations*. *Physical Review B*, 13(12), 5188–5192. <https://doi.org/10.1103/PhysRevB.13.5188>

КВАНТОВАЯ ЗАПУТАННОСТЬ: ФИЗИЧЕСКИЕ ОСНОВЫ, МАТЕМАТИЧЕСКОЕ ОПИСАНИЕ И СОВРЕМЕННЫЕ ИНТЕРПРЕТАЦИИ

*Музафарова Севинч Мухаммадовна,
Бухарский государственный университет
smuzaffarova989@gmail.com*

Аннотация. В статье проводится комплексный анализ квантовой запутанности как фундаментального явления квантовой физики и ключевого ресурса квантовых технологий. Рассматриваются физические основы запутанности, включая принцип суперпозиции и несепарабельность составных систем, а также её строгая математическая формализация в рамках гильбертовых пространств, операторов плотности и энтропийных мер. Особое внимание уделяется количественным критериям запутанности, таким как энтропия фон Неймана, и анализу неравенств Белла как инструмента выявления нелокальных корреляций. Обсуждаются современные интерпретации квантовой механики, включая копенгагенскую и многомировую, а также проблема локального реализма. Представлен обзор ключевых экспериментальных подтверждений запутанности, включая современные тесты без лазеек. Показано, что квантовая запутанность играет центральную роль в развитии квантовых вычислений, квантовой криптографии и квантовой телепортации, формируя основу перспективных квантовых коммуникационных сетей. Сделан вывод о том, что запутанность является не только фундаментальной характеристикой квантовой реальности, но и критически важным ресурсом для технологий будущего.

Ключевые слова: квантовая запутанность; квантовая механика; суперпозиция; гильбертово пространство; оператор плотности; энтропия фон Неймана; неравенства Белла; нелокальность; квантовые вычисления; квантовая криптография; квантовая телепортация; квантовые сети

QUANTUM ENTANGLEMENT: PHYSICAL FOUNDATIONS, MATHEMATICAL DESCRIPTION, AND MODERN INTERPRETATIONS

Abstract. This paper provides a comprehensive analysis of quantum entanglement as a fundamental phenomenon of quantum physics and a key resource for emerging quantum technologies. The physical foundations of entanglement are examined, including the principles of superposition and nonseparability of composite systems, along with its rigorous mathematical formulation within the framework of Hilbert spaces, density operators, and entropy-based measures. Particular attention is given to quantitative criteria of entanglement, such as the von Neumann entropy, as well as to Bell inequalities as a tool for detecting nonlocal correlations. Contemporary interpretations of quantum mechanics are discussed, including the Copenhagen and many-worlds interpretations, together with the problem of local realism. An overview of major experimental confirmations of entanglement is presented, including recent loophole-free tests. It is shown that quantum entanglement plays a central role in the development of quantum computing, quantum cryptography, and quantum teleportation, forming the foundation of future quantum communication networks. It is concluded that entanglement is not only a fundamental feature of quantum reality but also a critical resource for next-generation technologies.

Keywords: quantum entanglement; quantum mechanics; superposition; Hilbert space; density operator; von Neumann entropy; Bell inequalities; nonlocality; quantum computing; quantum cryptography; quantum teleportation; quantum networks

KVANT CHALKASHLIK: FIZIK ASOSLAR, MATEMATIK TAVSIF VA ZAMONAVIY TALQINLAR

Annotatsiya. Ushbu maqolada kvant chalkashlik zamonaviy kvant fizikasi doirasidagi fundamental hodisa hamda yangi avlod kvant texnologiyalarining muhim resursi sifatida kompleks tahlil qilinadi. Chalkashlikning fizik asoslari, jumladan superpozitsiya prinsipi va murakkab tizimlarning ajralmasligi (nonseparability), shuningdek uning Gilbert fazolari, zichlik operatorlari va entropiya asosidagi o'lovlar orqali qat'iy matematik tavsifi ko'rib chiqiladi. Xususan, chalkashlikning miqdoriy mezonlari, jumladan fon Neyman entropiyasi, hamda nolokal korrelyatsiyalarni aniqlash vositasi sifatida Bell tengsizliklari tahlil

qilinadi. Kvant mexanikasining zamonaviy interpretatsiyalari, jumladan Kopengagen va ko'p olamli interpretatsiyalar, shuningdek lokal realizm muammosi muhokama etiladi. Chalkashlikning asosiy eksperimental tasdiqlari, jumladan so'nggi "loophole-free" tajribalar haqida umumiy sharh beriladi. Kvant chalkashlik kvant hisoblash, kvant kriptografiyasi va kvant teleportatsiyasi rivojida markaziy rol o'ynashi hamda kelajakdagi kvant kommunikatsiya tarmoqlari uchun asos bo'lib xizmat qilishi ko'rsatiladi. Xulosa sifatida, kvant chalkashlik nafaqat kvant realligining fundamental xususiyati, balki kelajak texnologiyalari uchun muhim resurs ekanligi ta'kidlanadi.

Kalit so'zlar: kvant chalkashlik, kvant mexanikasi, superpozitsiya, Gilbert fazosi, zichlik operatori, fon Neyman entropiyasi, Bell tengsizliklari, nolokallik, kvant hisoblash, kvant kriptografiyasi, kvant teleportatsiyasi, kvant tarmoqlari.

Введение. Квантовая запутанность является одним из ключевых феноменов современной физики и основой квантовой теории информации [1,2]. В отличие от классических корреляций, она описывает ситуацию, при которой состояние составной системы не может быть представлено как совокупность состояний её отдельных частей, что приводит к возникновению нелокальных эффектов.

Актуальность темы определяется стремительным развитием квантовых технологий, включая квантовые вычисления и квантовую криптографию [3]. Исторически проблема была впервые сформулирована Альберт Эйнштейн, Борис Подольский и Натан Розен в работе 1935 года [4], где была поставлена под сомнение полнота квантовой механики. Позднее Джон Белл сформулировал неравенства, позволяющие экспериментально проверить различие между квантовыми и классическими теориями [5].

Цель работы — комплексное исследование квантовой запутанности как физического и математического феномена.

Физические основы квантовой запутанности. Квантовое состояние и суперпозиция.

Теоретическая часть. Состояние квантовой системы описывается вектором в гильбертовом пространстве, а принцип суперпозиции утверждает возможность существования линейных комбинаций состояний [6]. Это означает, что физические величины не имеют определённых значений до измерения, а задаются вероятностным распределением.

Суперпозиция является фундаментом для возникновения запутанных состояний, поскольку именно она делает возможным существование нелокальных корреляций.

Определение запутанности

Составная система описывается тензорным произведением пространств:

1. Гильбертово пространство и тензорное произведение

Составная система из двух подсистем A и B описывается в гильбертовом пространстве, которое является тензорным произведением пространств подсистем:

$$\mathcal{H} = \mathcal{H}_A \otimes \mathcal{H}_B$$

Если $|\psi_A\rangle \in \mathcal{H}_A$ и $|\phi_B\rangle \in \mathcal{H}_B$, то их совместное состояние:

$$|\psi_A\rangle \otimes |\phi_B\rangle \in \mathcal{H}$$

Состояние $|\Psi\rangle \in \mathcal{H}$ называется раздельным (сепарабельным), если его можно представить в виде:

$$|\Psi\rangle = |\psi_A\rangle \otimes |\phi_B\rangle$$

Если такое представление невозможно — состояние запутанное.

Состояние считается запутанным, если оно не может быть представлено в виде произведения состояний подсистем [7,8]. Это означает, что невозможно описать каждую часть системы независимо от другой.

Пример: состояние Белла

$$|\phi^\pm\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|00\rangle \pm |11\rangle)$$

$$|\psi^\pm\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|01\rangle \pm |10\rangle)$$

Данное состояние является максимально запутанным и демонстрирует идеальные корреляции между частицами [9]. Подобные состояния играют ключевую роль в квантовых коммуникациях.

Оператор плотности

Оператор плотности позволяет описывать как чистые, так и смешанные состояния:

Для чистого состояния $|\Psi\rangle$ оператор плотности:

$$\rho = |\Psi\rangle \langle\Psi|$$

Для смешанного состояния:

$$\rho = \sum_i p_i |\Psi_i\rangle \langle\Psi_i|, \quad \sum_i p_i = 1$$

Если система AB описывается ρ_{AB} , то состояние подсистемы A находится через частичный след:

$$\rho_A = \text{Tr}_B(\rho_{AB})$$

Если ρ_A — смешанное состояние, значит система AB находится в запутанном состоянии.

Если редуцированное состояние смешанное, система является запутанной [10].

Энтропия фон Неймана

Мера смешанности (неопределённости) состояния ρ :

$$S(\rho) = -\text{Tr}(\rho \log \rho)$$

Для чистого состояния: $S(\rho) = 0$.

Для смешанного состояния: $S(\rho) > 0$.

В запутанной системе энтропии подсистем равны:

$$S(\rho_A) = S(\rho_B) > 0$$

Энтропия фон Неймана используется как количественная мера запутанности и отражает степень квантовой корреляции [11].

Неравенства Белла.

$$E(\mathbf{a}, \mathbf{b}) = \langle A_{\mathbf{a}} \otimes B_{\mathbf{b}} \rangle$$

Параметр CHSH:

$$S = E(\mathbf{a}, \mathbf{b}) + E(\mathbf{a}, \mathbf{b}') + E(\mathbf{a}', \mathbf{b}) - E(\mathbf{a}', \mathbf{b}')$$

Локальные реалистичные теории удовлетворяют неравенству:

$$|S| \leq 2$$

Квантовая механика предсказывает нарушение этого предела:

$$|S| \leq 2\sqrt{2} \text{ (для оптимальных измерений)}$$

Измеренное $|S| > 2$ — свидетельство запутанности и нелокальности.

Нарушение данного неравенства подтверждает нелокальность квантовой механики [5,12].

Рассмотрение системы из двух кубитов является базовым случаем для анализа квантовой запутанности, поскольку такие системы лежат в основе большинства квантовых вычислительных и коммуникационных протоколов. Двухкубитная система представляет собой составную квантовую систему, состоящую из двух двухуровневых подсистем, каждая из которых может находиться в одном из двух базисных состояний. Совокупность всех возможных состояний системы описывается линейной комбинацией базисных состояний, характеризуемой комплексными коэффициентами, удовлетворяющими условию нормировки.

Состояния двух кубитов и критерии запутанности. Состояние двух кубитов называется сепарабельным, если оно может быть представлено как произведение состояний каждой из подсистем. В этом случае свойства всей системы полностью определяются свойствами её частей, и между подсистемами отсутствуют квантовые корреляции. В противоположность этому, запутанное состояние не допускает такого разложения, что означает невозможность независимого описания каждой подсистемы. Именно эта несепарабельность и является ключевым признаком квантовой запутанности.

Базисные состояния:

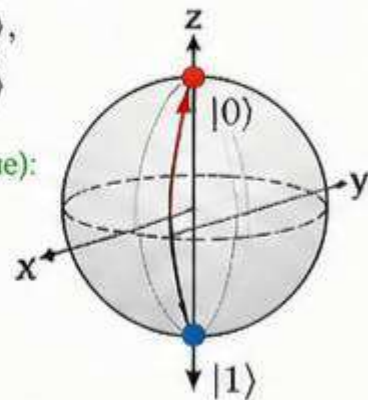
$$|0\rangle = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix}, \quad |1\rangle = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix}$$

Тензорные произведения базисных состояний:

$$|00\rangle = |0\rangle \otimes |0\rangle, \quad |01\rangle = |0\rangle \otimes |1\rangle, \\ |10\rangle = |1\rangle \otimes |0\rangle, \quad |11\rangle = |1\rangle \otimes |1\rangle$$

Состояния Белла (максимально запутанные):

$$|\Phi^+\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} (|00\rangle + |11\rangle) \\ |\Phi^-\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} (|00\rangle - |11\rangle) \\ |\Psi^+\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} (|01\rangle + |10\rangle) \\ |\Psi^-\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} (|01\rangle - |10\rangle)$$



Разложение Шмидта. Любое чистое состояние двухкубитной системы может быть приведено к специальному каноническому виду, в котором оно представляется как сумма двух взаимно ортогональных компонент с неотрицательными коэффициентами. Данное представление известно как разложение Шмидта и играет важную роль в анализе запутанности.

Количество ненулевых коэффициентов в разложении Шмидта служит критерием запутанности: если присутствует только один коэффициент, состояние является незапутанным, тогда как наличие более одного ненулевого коэффициента указывает на запутанность. В частности, равенство коэффициентов соответствует максимально запутанному состоянию, обладающему максимальной степенью квантовых корреляций.

Любое чистое состояние двухчастичной системы можно разложить в виде (разложение Шмидта):

$$|\Psi\rangle = \sum_i \lambda_i |\alpha_i\rangle_A \otimes |\beta_i\rangle_B, \quad \lambda_i \geq 0, \quad \sum_i \lambda_i^2 = 1$$

Если более одного коэффициента $\lambda_i \neq 0$, то состояние запутанное.

Интерпретации и экспериментальные проверки. Копенгагенская интерпретация, связанная с Нильсом Бором, трактует запутанность как проявление целостности системы [13]. В противоположность этому, интерпретация Хью Эверетт рассматривает её как следствие разветвления состояний Вселенной [14].

Экспериментальные проверки, начиная с работ Аспе и заканчивая современными экспериментами без лазеек (loophole-free), подтверждают нарушение неравенств Белла [15,16].

Практические применения. Квантовая запутанность является ключевым ресурсом квантовой теории информации и лежит в основе современных квантовых технологий. В квантовых вычислениях она обеспечивает квантовый параллелизм и позволяет реализовывать алгоритмы, демонстрирующие преимущество над классическими методами [2]. В квантовой криптографии запутанность используется для создания защищённых каналов связи, где любая попытка перехвата приводит к изменению квантового состояния и может быть обнаружена [17]. В квантовой телепортации она позволяет передавать квантовое состояние между удалёнными системами с использованием запутанных пар и классического канала связи [9]. Развитие этих направлений приводит к формированию квантовых сетей, способных обеспечить высокую степень защиты информации и новые возможности обработки данных [18].

Заключение. Квантовая запутанность представляет собой фундаментальное свойство квантовых систем, отражающее их нелокальную природу и отличающееся от классических корреляций. Её математическое описание и экспериментальные подтверждения свидетельствуют о необходимости пересмотра классических представлений о физической реальности. В современных исследованиях запутанность рассматривается не только как теоретическое явление, но и как практический ресурс, лежащий в основе квантовых вычислений, коммуникаций и криптографии. Перспективы дальнейшего развития связаны с созданием устойчивых квантовых систем и масштабированием технологий, основанных на запутанных состояниях.

ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Nielsen M, Chuang I. *Quantum Computation and Quantum Information*. Cambridge; 2010.
2. Horodecki R, Horodecki P, Horodecki M, Horodecki K. *Quantum entanglement*. *Rev Mod Phys*. 2009;81: 865–942.
3. Preskill J. *Quantum Computing in the NISQ era*. 2018.
4. Einstein A, Podolsky B, Rosen N. *Can quantum-mechanical description be complete?* *Phys Rev*. 1935;47: 777–780.
5. Bell JS. *On the Einstein-Podolsky-Rosen paradox*. *Physics*. 1964;1: 195–200.
6. Dirac PAM. *Principles of Quantum Mechanics*. Oxford; 1981.
7. Werner RF. *Quantum states with EPR correlations*. *Phys Rev A*. 1989.
8. Peres A. *Separability criterion for density matrices*. *Phys Rev Lett*. 1996.
9. Bennett CH et al. *Teleporting an unknown quantum state*. *Phys Rev Lett*. 1993.
10. Nielsen M. *Conditions for entanglement transformations*. *Phys Rev Lett*. 1999.

PHYSICS

11. von Neumann J. *Mathematical Foundations of Quantum Mechanics*. 1955.
12. Clauser JF et al. *Proposed experiment to test Bell inequalities*. *Phys Rev Lett*. 1969.
13. Bohr N. *Atomic Physics and Human Knowledge*. 1958.
14. Everett H. *Relative state formulation*. *Rev Mod Phys*. 1957.
15. Aspect A et al. *Experimental tests of Bell inequalities*. *Phys Rev Lett*. 1981.
16. Storz S et al. *Loophole-free Bell inequality violation*. *Nature*. 2023.
17. Ekert AK. *Quantum cryptography based on Bell theorem*. *Phys Rev Lett*. 1991.
18. Kimble HJ. *Quantum internet*. *Nature*. 2008.
19. Wootters WK. *Entanglement of formation*. *Phys Rev Lett*. 1998.
20. Zurek WH. *Decoherence and environment*. *Rev Mod Phys*. 2003.
21. Vedral V. *The role of entanglement in quantum info*. *Rev Mod Phys*. 2002.
22. Friis N et al. *Entanglement certification*. *Quantum*. 2018.
23. Mintert F et al. *Measures of entanglement*. *Phys Rep*. 2005.
24. Yukalov VI. *Entanglement production*. *Quantum Inf Process*. 2025.
25. Bennett CH, Wiesner SJ. *Quantum dense coding*. *Phys Rev Lett*. 1992.

К ТЕОРИИ ОДНОФОТОННЫХ ОПТИЧЕСКИХ ПЕРЕХОДОВ В ПОЛУПРОВОДНИКАХ КУБИЧЕСКОЙ И ТЕТРАЭДРИЧЕСКОЙ СИММЕТРИИ. 2-ЧАСТЬ

Расулов Рустам Явкачович,

Профессор кафедры Физика Ферганского государственного университета, д.ф.-м.н..

Муминов Ислом Араббоевич,

Доцент кафедры Физика Ферганского государственного университета, PhD.

Фармонов Исломжон,

Докторант кафедры Физика Ферганского государственного университета.

Мухаммадаминов Сохибжон Хабибулло оғли,

Докторант кафедры Физика Ферганского государственного университета.

r_rasulov51@mail.ru

Аннотация. В работе проведён расчёт спектральной, температурной и поляризационной зависимостей коэффициента однофотонного поглощения света в полупроводниках. При анализе учтены три типа оптических переходов: первый — между ветвями лёгких и тяжёлых дырок валентной зоны, второй и третий — между подзонами валентной зоны и зоной проводимости в кристаллах с кубической и тетрагональной симметрией.

Показано, что поляризационная зависимость коэффициента однофотонного поглощения, как для внутризонных, так и для межзонных переходов, при фиксированных значениях частоты и температуры носит осциллирующий характер. Температурная зависимость характеризуется наличием максимума при заданной частоте излучения. Учет эффекта когерентного насыщения приводит к снижению зависимости коэффициента поглощения от интенсивности света, что проявляется в замедлении роста поглощения при увеличении интенсивности излучения.

Ключевые слова: Оптические переходы, поглощение и дихроизм в многозонной энергетической структуре полупроводников.

KUBIK VA TETRAEDRIK SIMMETRIYALI YARIMO‘TKAZGICHLARDA BIR FOTONLI OPTIK O‘TISHLAR NAZARIYASI HAQIDA. 2-QISM.

Annotatsiya. Ushbu maqolada qutblangan nurlanishning yarimo‘tkazgichli materiallar bilan o‘zaro ta’siriga doir dolzarb masalalar, xususan, bir fotonli yutilish koeffitsiyentining spektral, harorat va qutblanish darajasiga bog‘liqligi batafsil tadqiq etilgan. Tadqiqot doirasida uch xil turdagi optik o‘tish mexanizmlari kompleks tahlil qilindi: birinchi navbatda valent zonasining energetik strukturasiidagi yengil va og‘ir kovaklar tarmoqlari o‘rtasidagi o‘tishlar, shuningdek, kubik va tetraedrik simmetriyaga ega bo‘lgan yarimo‘tkazgichli kristallarda valent zonasi tarmoqlari bilan o‘tkazuvchanlik zonasi orasidagi zonalararo o‘tishlar ko‘rib chiqildi.

Nazariy hisoblar natijasida aniqlanishicha, tanlangan nurlanish chastotasi va haroratning statsionar qiymatlarida ham zona ichidagi, ham zonalararo o‘tishlar uchun yutilish koeffitsiyentining qutblanish darajasiga bog‘liqligi yaqqol ifodalangan ossillyatsiyaviy xarakterga ega. Haroratga bog‘liqlik funksiyasi esa ma’lum bir nurlanish chastotasida ekstremum (maksimum) nuqtasiga ega bo‘lishi isbotlandi. Tadqiqotning yana bir muhim jihati kogerent to‘yinish effektining inobatga olinishidir, ushbu effekt yorug‘lik intensivligi ortishi bilan yutilish koeffitsiyenti o‘sishining sekinlashishiga va uning nurlanish quvvatiga bog‘liqligining kamayishiga sabab bo‘ladi. Bu ilmiy xulosalar qattiq jismlar fizikasi va yarimo‘tkazgichli optoelektronika qurilmalarining ishlash prinsiplarini o‘rganishda fundamental ahamiyat kasb etadi.

Kalit so‘zlar: yarimo‘tkazgichlarning ko‘p zonali energetik strukturasiida optik o‘tishlar, yutilish va dioxroizm.

ON THE THEORY OF ONE-PHOTON OPTICAL TRANSITIONS IN SEMICONDUCTORS OF CUBIC AND TETRAHEDRAL SYMMETRY. PART 2.

Abstract. This paper presents the calculation of the spectral, temperature, and polarization dependencies of the one-photon light absorption coefficient in semiconductors. The analysis accounts for three types of optical transitions: first — between the light and heavy hole branches of the valence band;

second and third — between the subbands of the valence band and the conduction band in crystals with cubic and tetragonal symmetry.

It is shown that the polarization dependence of the one-photon absorption coefficient for both intraband and interband transitions exhibits an oscillatory behavior at fixed frequency and temperature values. The temperature dependence is characterized by the presence of a maximum at a given radiation frequency. Accounting for the effect of coherent saturation leads to a decrease in the dependence of the absorption coefficient on light intensity, which is manifested by a slowdown in the growth of absorption as the radiation intensity increases.

Keywords: Optical transitions, absorption and dichroism in the multiband energy structure of semiconductors.

Введение. Внутризонное поглощение света, обусловленное вертикальными межподзонами оптическими переходами в алмазоподобных полупроводниках исследуется довольно давно [1-3].

В работах [4-9], теоретически исследованы одно- и многофотонное поглощения, связанные межзонами, так и межподзонами оптическими переходами. В частности [4, 6-9], исследованы спектрально-температурные зависимости коэффициента многофотонного поглощения и его линейно-циркулярный дихроизм в полупроводниках кубической симметрии. В [10, 11] обнаружено насыщение фототока в топологических изоляторах, индуцированного при прямых оптических переходах в области большей интенсивности. В [12] создана кванто – механическая теория нелинейного по интенсивности света краевого фототока в графене; в [13] рассчитаны поляризационные зависимости одно-и многофотонных межзонных переходов в двумерных мономолекулярных диалкогенных переходных металлов.

Анализ теоретических, проведенных ниже, расчетов коэффициента однофотонного поглощения поляризованного света свидетельствует о том, что учет эффекта когерентного насыщения приведет к своеобразной частотно-температурной зависимости, в связи с чем интересно теоретическое исследование поглощения света, обусловленного однофотонными переходами из ветви тяжелых и легких дырок в подзону спин-орбитального расщепления с учетом эффекта когерентного насыщения [5-9].

Однофотонное поглощение света за счет оптических переходов из подзон валентной зоны в зону проводимости

Известно [2], что коэффициент поглощения N -фотонного света $K^{(N)}$ определяется в следующем виде

$$K^{(N)} = N\hbar\omega \frac{W^{(N)}}{I}, \quad (1)$$

где $W^{(N)}$ - вероятность N - фотонного поглощения на единицу объема света, определяемая как [2, 5-9]

$$W^{(N)} = \frac{2\pi}{\hbar} \sum_{n,n',\vec{k}} \left\langle \sum_{m,m'} \left| M_{n,m;n',m'}^{(N)}(\vec{k}) \right|^2 \right\rangle (f_{n\vec{k}} - f_{n'\vec{k}}) \delta(E_{n'\vec{k}} - E_{n\vec{k}} - N\hbar\omega), \quad (2)$$

где $m, m' = \pm 1/2$ -для состояний в подзонах легких дырок и спин-орбитального расщепления, $m, m' = \pm 3/2$ -для состояний в подзоне тяжелых дырок [18, 19], $\left\langle \sum_{m,m'} \left| M_{n,m;n',m'}^{(N)}(\vec{k}) \right|^2 \right\rangle$ - усредненное по телесным углам волнового вектора дырок (\vec{k}) значение квадрата модуля составного матричного элемента оптического перехода из состояния $|n\vec{k}\rangle$ в $|n'\vec{k}\rangle$ ($|n\vec{k}\rangle \rightarrow |n'\vec{k}\rangle$), $E_{n'\vec{k}}$ ($E_{n\vec{k}}$) и $f_{n'\vec{k}}$ ($f_{n\vec{k}}$) -энергия и функция распределения носителей тока в начальном (в конечном) состоянии, \vec{A} -потенциал вектора электромагнитной волны:

$$\vec{A}(\vec{x}, t) = A_0 \vec{e} e^{-i\omega t + i\vec{q}\vec{x}} + A_0 \vec{e}^* e^{i\omega t - i\vec{q}\vec{x}}, \quad (3)$$

$\hbar\omega$ ($\hbar\vec{q}$)-энергия (импульс) фотона, \vec{e} и A_0 - вектор поляризации и амплитуда векторного потенциала:

$$\left(\frac{eA_0}{m_0 c} \right)^2 = \frac{2\pi e^2 I}{c\omega^2 m_0^2 n_\omega}, \quad (4)$$

I -интенсивность света, $n_\omega = cq/\omega$ -коэффициент преломления полупроводника, остальные общеизвестные величины.

Отметим, что при вычислении, например, частотной или температурной зависимости $W^{(N)}$ как для внутрizonных, так и для межзонных N фотонных оптических переходов существенным является выбор вида оператора электрон-фотонного взаимодействия, который входит в составной матричный элемент перехода [5-9]. В зависимости от выбранного оператора может увеличиваться или уменьшаться относительный вклад в $W^{(N)}$ различных каналов оптических переходов, отличающихся друг от друга виртуальными состояниями.

Таким образом, коэффициент поглощения поляризованного света при однофотонных межзонных оптических переходах определяется следующим образом:

$$K_{c,m_c;V,m_V}^{(N=1)} = \frac{\hbar\omega}{I} W_{c,m_c;V,m_V}^{(N=1)} = \frac{\hbar\omega}{I} \left(W_{c,hh}^{(N=1)} + W_{c,lh}^{(N=1)} \right). \quad (5)$$

Здесь $W_{c,m_c;V,m_V}^{(N=1)}$ — результирующая вероятность оптических переходов из подзон тяжелых и легких дырок валентной зоны в зону проводимости, $W_{c,hh}^{(N=1)}$ [$W_{c,lh}^{(N=1)}$] — вероятности оптических переходов из подзоны тяжелых (легких) дырок в зону проводимости, и они определяются следующим образом:

$$W_{c,m_c;V,m_V}^{(1)} = W_{c,hh}^{(1)} + W_{c,lh}^{(1)} \quad (6)$$

$$W_{c,hh}^{(1)} = \frac{2\pi}{\hbar} \iiint \left(\left| M_{c,m\pm 1/2;hh,\pm 3/2}^{(1)}(\mathbf{k}) \right|^2 + \left| M_{c,m\mp 1/2;hh,\pm 3/2}^{(1)}(\mathbf{k}) \right|^2 \right) \times \\ \times \left[f_c(\mathbf{k}) - f_{hh}(\mathbf{k}) \right] \left(E_c(\mathbf{k}) - E_{hh}(\mathbf{k}) - \hbar\omega \right), \\ W_{c,lh}^{(1)} = \frac{2\pi}{\hbar} \iiint \left(\left| M_{c,m\pm 1/2;lh,\pm 1/2}^{(1)}(\mathbf{k}) \right|^2 + \left| M_{c,m\mp 1/2;lh,\pm 1/2}^{(1)}(\mathbf{k}) \right|^2 \right) \times \\ \times \left[f_c(\mathbf{k}) - f_{lh}(\mathbf{k}) \right] \cdot \delta \left(E_c(\mathbf{k}) - E_{lh}(\mathbf{k}) - \hbar\omega \right).$$

Здесь $M_{c,m;hh,m'}^{(1)}(\mathbf{k})$ [$M_{c,m;lh,m'}^{(1)}(\mathbf{k})$] — составной матричный элемент перехода из подзоны тяжелых (легких) дырок в зону проводимости, $f_c(\mathbf{k})$ [$f_{lh,hh}(\mathbf{k})$] — функции распределения электронов в зоне проводимости (дырок в подзонах валентной зоны), $E_c(\mathbf{k})$ [$E_{lh,hh}(\mathbf{k})$] — их энергетические спектры.

Если энергетические спектры электронов с эффективной массой m_c и тяжелых и легких дырок с эффективной массой m_{hh} в зоне проводимости записаны в сферической форме $E_c(\mathbf{k}) = E_g + \hbar^2 k^2 / (2m_c)$, $E_{lh}(\mathbf{k}) = \hbar^2 k^2 / (2m_{lh})$, $E_{hh}(\mathbf{k}) = \hbar^2 k^2 / (2m_{hh})$, то вероятности оптических переходов можно переписать следующим образом:

$$W_{c,hh}^{(N=1)} = \frac{1}{\pi\hbar} \cdot \frac{2m_{hh}m_c}{\hbar^2(m_c + m_{hh})} \left[f_{hh}(k_{c,hh}) - f_c(k_{c,hh}) \right] k_{c,hh} \times \\ \times \left\langle \left(\left| M_{c,m\pm 1/2;hh,\pm 3/2}^{(N=1)}(k_{c,hh}) \right|^2 + \left| M_{c,m\mp 1/2;hh,\pm 3/2}^{(N=1)}(k_{c,hh}) \right|^2 \right) \right\rangle, \quad (7)$$

$$W_{c,lh}^{(N=1)} = \frac{1}{\pi\hbar} \cdot \frac{2m_{lh}m_c}{\hbar^2(m_c + m_{lh})} \left[f_{lh}(k_{c,lh}) - f_c(k_{c,lh}) \right] k_{c,lh} \times \\ \times \left\langle \left(\left| M_{c,m\pm 1/2;lh,\pm 1/2}^{(N=1)}(k_{c,lh}) \right|^2 + \left| M_{c,m\mp 1/2;lh,\pm 1/2}^{(N=1)}(k_{c,lh}) \right|^2 \right) \right\rangle, \quad (8)$$

здесь

$$\left\langle \left(\left| M_{c,m\pm 1/2;hh,\pm 3/2}^{(N=1)}(k_{c,hh}) \right|^2 + \left| M_{c,m\mp 1/2;hh,\pm 3/2}^{(N=1)}(k_{c,hh}) \right|^2 \right) \right\rangle = \\ = \frac{1}{2} \int_0^\pi \left(\left| M_{c,m\pm 1/2;hh,\pm 3/2}^{(N=1)}(k_{c,hh}) \right|^2 + \left| M_{c,m\mp 1/2;hh,\pm 3/2}^{(N=1)}(k_{c,hh}) \right|^2 \right) \sin\theta \cdot d\theta, \quad (9)$$

$$\left\langle \left(\left| M_{c,m\pm 1/2;lh,\pm 1/2}^{(N=1)}(k_{c,lh}) \right|^2 + \left| M_{c,m\mp 1/2;lh,\pm 1/2}^{(N=1)}(k_{c,hh}) \right|^2 \right) \right\rangle = \quad (10)$$

$$= \frac{1}{2} \int_0^\pi \left(\left| M_{c,m\pm 1/2;lh,\pm 1/2}^{(N=1)}(k_{c,lh}) \right|^2 + \left| M_{c,m\mp 1/2;lh,\pm 1/2}^{(N=1)}(k_{c,hh}) \right|^2 \right) \sin \theta \cdot d\theta,$$

$$k_{c,lh} = \left[\frac{2m_{lh}m_c}{\hbar^2(m_c + m_l)} (\hbar\omega - E_g) \right]^{1/2}. \quad (11)$$

Таким образом, результирующий коэффициент однофотонного поглощения света выражается следующим образом:

$$K_{c,m;lh,hh,m'}^{(1)} = K_{c,\pm 1/2;lh,\pm 1/2}^{(1)} + K_{c,\pm 1/2;hh,\pm 3/2}^{(1)}, \quad K_{c,\pm 1/2;lh,\pm 1/2}^{(1)} = \frac{\hbar\omega}{I} W_{c,\pm 1/2;lh,\pm 1/2}^{(1)}, \quad K_{c,\pm 1/2;hh,\pm 3/2}^{(1)} = \frac{\hbar\omega}{I} W_{c,\pm 1/2;hh,\pm 3/2}^{(1)}. \quad (12)$$

Однофотонное поглощение света за счет межподзонных оптических переходов в валентной зоне

Вероятность оптических переходов такого типа определяется следующим образом:

$$W_{lh,m_{lh};hh,m_{hh}}^{(1)} = \frac{1}{2\pi B\hbar} k_\omega [f_{lh}(k_\omega) - f_{hh}(k_\omega)] \left\langle \left| M_{lh,m_{lh};hh,m_{hh}}^{(1)}(k_\omega, \theta, \varphi) \right|^2 \right\rangle. \quad (13)$$

После ряда промежуточных вычислений приходим к следующему результату для вероятности четырехфотонного перехода света:

$$W^{(1)} = \frac{1}{2\pi B\hbar} k_\omega [f_{lh}(k_\omega) - f_{hh}(k_\omega)] \left\langle \left| M_{lh,m_{lh};hh,m_{hh}}^{(N)}(k_\omega, \theta, \varphi) \right|^2 \right\rangle. \quad (14)$$

Если учитывать вклад явления когерентного насыщения, то коэффициент однофотонного поглощения света выражается следующим образом:

$$K^{(1)} = \frac{\hbar\omega}{I} W^{(1)} = \frac{\hbar\omega}{I} \frac{1}{2\pi B\hbar} k_\omega [f_{lh}(k_\omega) - f_{hh}(k_\omega)] \times \quad (15)$$

$$\left(\left\langle \frac{\left| M_{lh,\pm 1/2;hh,\pm 3/2}^{(1)}(k_\omega) \right|^2}{\sqrt{1 + 4 \frac{\alpha_\omega}{\hbar^2 \omega^2} \left| M_{lh,\pm 1/2;hh,\pm 3/2}^{(1)}(k_\omega) \right|^2}} \right\rangle + \left\langle \frac{\left| M_{lh,\pm 1/2;hh,\mp 3/2}^{(1)}(k_\omega) \right|^2}{\sqrt{1 + 4 \frac{\alpha_\omega}{\hbar^2 \omega^2} \left| M_{lh,\pm 1/2;hh,\mp 3/2}^{(1)}(k_\omega) \right|^2}} \right\rangle \right).$$

Здесь введены следующие обозначения: $k_\omega = \sqrt{\hbar\omega/(2B)}$,

$$f_{lh,k_{lh}^{(1\omega)}} = \exp\left[\frac{E_F}{k_B T}\right] \cdot \exp\left(-\frac{1}{k_B T} \frac{\mu_-^{(lh,hh)}}{m_{lh}} \hbar\omega\right) \left[1 - \exp\left(-\frac{\hbar\omega}{k_B T}\right)\right],$$

$$f_{hh,k_{hh}^{(1\omega)}} = \exp\left[\frac{E_F}{k_B T}\right] \cdot \exp\left(-\frac{1}{k_B T} \frac{\mu_-^{(lh,hh)}}{m_{hh}} \hbar\omega\right) \left[1 - \exp\left(-\frac{\hbar\omega}{k_B T}\right)\right],$$

$$\left\langle \left| M_{lh,m_{lh};hh,m_{hh}}^{(N)}(k_\omega, \theta, \varphi) \right|^2 \right\rangle = \iint \left| M_{lh,m_{lh};hh,m_{hh}}^{(N)}(k_\omega, \theta, \varphi) \right|^2 \frac{1}{4\pi} \sin \theta \cdot d\theta \cdot d\varphi,$$

$B = \hbar^2(m_{hh} - m_{lh})/(m_{hh}m_{lh}), \mu_{-}^{(lh, hh)} = \frac{m_{hh} \cdot m_{lh}}{m_{hh} - m_{lh}}$ — приведенная эффективная масса дырок, $m_{hh}(m_{lh})$ — эффективная масса тяжелых (легких) дырок, $E_{lh}^* = \hbar\omega m_{hh}/(m_{hh} - m_{lh})$ и $E_{hh}^* = \hbar\omega m_{lh}/(m_{hh} - m_{lh})$ — энергии фотовозбужденных легких и тяжелых дырок, E_F — энергия

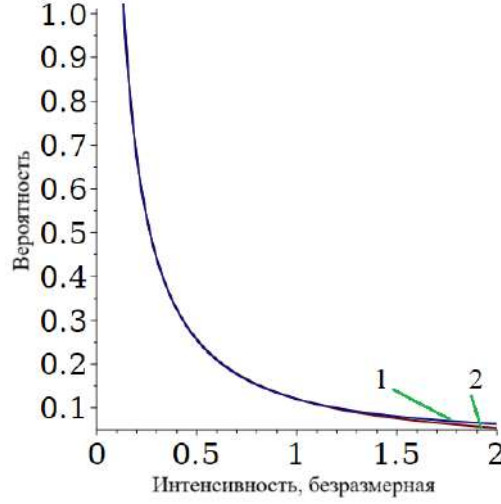


Рис. 1. Зависимость вероятности однофотонного оптического перехода из ветви тяжелых дырок в ветвь легких дырок валентной зоны полупроводника р-типа от интенсивности света Ферми дырок.

На рис. 1 представлена зависимость вероятности однофотонного оптического перехода из ветви тяжелых дырок в ветвь легких дырок валентной зоны полупроводника п-типа от интенсивности света. 1 — соответствует линейно поляризованному, 2 — циркулярно поляризованному свету.

Если учесть степень поляризации света, то можно отметить следующие выражения, полезные для количественных расчетов:

$$\begin{aligned} K_{lin}^{(1)} &= \frac{\hbar\omega}{I} \frac{1}{2\pi B\hbar} k_{\omega} [f_{lh}(k_{\omega}) - f_{hh}(k_{\omega})] \mathfrak{F}_{lin} R_I^{(lin)}, \\ K_{circ}^{(1)} &= \frac{\hbar\omega}{I} \frac{1}{2\pi B\hbar} k_{\omega} [f_{lh}(k_{\omega}) - f_{hh}(k_{\omega})] \mathfrak{F}_{circ} R_I^{(circ)}, \end{aligned} \quad (16)$$

Здесь

$$\begin{aligned} \mathfrak{F}_{lin} &= \frac{1}{2} \left[\int_{-1}^1 \frac{dx}{(1+a-ax^2)^{1/2}} - \int_{-1}^1 \frac{x^2 dx}{(1+a-ax^2)^{1/2}} \right] = \\ &= \frac{1}{2} (\mathfrak{F}_{-}^{(0)} + \mathfrak{F}_{-}^{(2)}), \quad \mathfrak{F}_{-}^{(0)} = \frac{1}{\sqrt{a}} \arcsin \left(x \sqrt{\frac{a}{1+a}} \right), \quad c = 1+a, \quad a = \alpha_{\omega} R_I^{(lin)} / (\hbar^2 \omega^2), \\ \mathfrak{F}_{-}^{(2)} &= \frac{1}{2a} \left[(1+a) \mathfrak{F}_{-}^{(0)} - x(1+a-ax^2)^{1/2} \right], \\ \mathfrak{F}_{circ} &= \left\langle \frac{1 + \cos^2(\vec{e} \cdot \vec{k})}{\sqrt{1 + 4 \frac{\alpha_{\omega}}{\hbar^2 \omega^2} R_I^{(circ)} (1 + \cos^2(\vec{e} \cdot \vec{k}))}} \right\rangle = \frac{1}{2} (\mathfrak{F}_{+}^{(0)} + \mathfrak{F}_{+}^{(2)}), \end{aligned}$$

$$\mathfrak{Z}_+^{(0)} = \frac{1}{\sqrt{a}} \ln \left| x\sqrt{a} + (1+a+ax^2)^{1/2} \right|, \quad \mathfrak{Z}_+^{(2)} = \frac{1}{2a} \left[x(1+a+ax^2)^{1/2} - (1+a)\mathfrak{Z}_+^{(0)} \right].$$

Следует отметить, что, например, если $\mathfrak{Z}_{\text{circ}} = \langle (1 + \cos^2(\vec{e} \cdot \vec{k})) \times \left[1 + 4 \frac{\alpha_e}{\hbar^2 \omega^2} R_I^{(\text{circ})} (1 + \cos^2(\vec{e} \cdot \vec{k})) \right] \rangle$ принять за $R_I^{(\text{circ})} = nI/I_0$, то есть если отдельно выделить $R_I^{(\text{circ})}$, то анализируются коэффициент однофотонного поглощения света и вероятность оптических переходов n (в этом случае коэффициент однофотонного поглощения света и вероятность оптических переходов n (далее именуемый параметром Раби) и I/I_0 (безразмерная интенсивность), поскольку величины n и I_0 (величина в единицах интенсивности) зависят от зонных параметров образца.

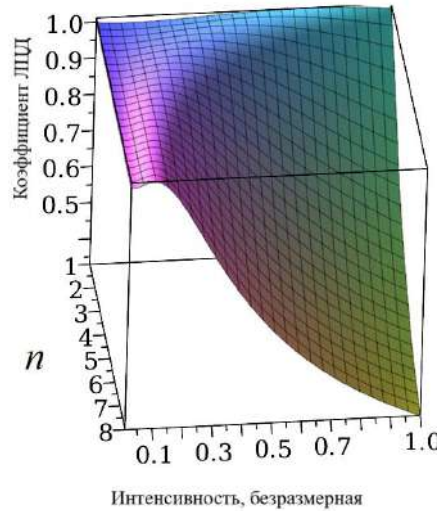


Рис. 2. Зависимость коэффициента линейно-циркулярного дихроизма ($\eta = W_{\text{lin}}^{(1)}/W_{\text{circ}}^{(1)}$),

соответствующего однофотонному оптическому переходу в полупроводнике p -типа из ветви тяжёлых дырок валентной зоны в ветвь лёгких дырок, от интенсивности и параметра Раби (n)

В этом случае $I_0 = \frac{cn\omega\hbar^3\omega^3}{2\pi|B|}$. Такие соотношения проиллюстрированы на рисунке 2. Из этого рисунка видно, что при количественном увеличении параметра Раби n соотношение коэффициента линейного кругового дихроизма к интенсивности I/I_0 имеет вид:

а) минимальное значение уменьшается; б) и максимальное значение смещается в область низкой интенсивности.

Расчеты, проведенные в многозонном приближении, показывают, что подобная зависимость наблюдается при увеличении ширины запрещенной зоны полупроводника. Данный результат свидетельствует о том, что физическая природа коэффициента линейно-циркулярного дихроизма связана с параметром Раби n , то есть зависит от физико-химических свойств выбранного кристалла.

Это, в свою очередь, указывает на то, что эффект линейно-циркулярного дихроизма проявляется по-разному в узкозонных, широкозонных и среднезонных полупроводниках.

Выводы. В заключении отметим, что учет температурной зависимости ширины запрещенной зоны и эффективных масс носителей тока приводит к уменьшению температурной зависимости коэффициента однофотонного поглощения, обусловленного между подзонами валентной зоны и зоны проводимости. В частности, с ростом температуры максимальное значение спектральной зависимости вышеуказанного однофотонного межзонного поглощения уменьшается.

Показано, что каждый тип как межзонных, так и внутризонных оптических переходов дает неодинаковый вклад в спектральную, поляризационную и температурную зависимости коэффициента однофотонного поглощения света, который связан в золотом правиле одноквантовых переходов.

ЛИТЕРАТУРА:

1. □ Ivchenko, E. L. (1972). Two-photon absorption of light and optical orientation of free carriers. *Physics. St. Petersburg*, 14(12), 3489-3496.
2. □ Rasulov, R. Ya. (1993). Polarization optical photovoltaic effects in semiconductors with linear and nonlinear absorption of light (Doctoral dissertation). Ioffe Institute, St. Petersburg. (168 p).
3. □ Rasulov, R. Ya. (1993). Linear-circular dichroism in multiphoton intersubband absorption in semiconductors. *Semiconductors*, 35(6), 1674-1678. URL: <https://journals.ioffe.ru/articles/viewPDF/14966>
4. □ Ganichev, S. D., Ivchenko, E. L., Rasulov, R. Ya., Yaroshetsky, I. D., & Averbukh, B. Ya. (1993). Linear-circular dichroism of the drag current during nonlinear intersubband absorption of light in Sp-Ge . *FTT*, 35(1), 198-207. (In Russian). URL: <https://journals.ioffe.ru/articles/viewPDF/14762>
5. □ Rasulov, R. Ya., Khoshimov, G. Kh., & Kholitdinov, Kh. (1996). Linear-circular dichroism of nonlinear light absorption in In-GaP . *Semiconductors*, 30(2), 274-277. URL: <https://journals.ioffe.ru/articles/viewPDF/18345>
6. □ Rasulov, V. R., Rasulov, R. Ya., & Eshboltaev, I. (2017). Linearly and Circular Dichroism in a Semiconductor with a Complex Valence Band with Allowance for Four-Photon Absorption of Light. *Physics of the Solid State*, 59, 463. DOI: 10.1134/S1063783417030283
7. □ Rasulov, R. Y., Rasulov, V. R., Eshboltaev, I., & Sultonov, R. R. (2021). Two- and Three-Photon Linear Circular Dichroism in Semiconductors of Cubic Symmetry. *Russian Physics Journal*, 63(11), 2025–2030.
8. □ Rasulov, R. Ya., Rasulov, V. R., Kuchkarov, M. Kh., & Eshboltaev, I. M. (2023). Interband multiphoton absorption of polarized radiation and its linear circular dichroism in semiconductors in the Kane approximation. *Russian Physics Journal*, 65(10). DOI: 10.1007/s11182-023-02825-3
9. □ Rasulov, R. Ya., Rasulov, V. R., Kodirov, N. U., & Isomaddinova, U. M. (2023). Interband one photon absorption of light and its linear-circular dichroism in crystals with coherent saturation effect included. *Physics of the Solid State*, 65(7), 1173-1179. DOI: 10.61011/PSS.2023.07.56410.77
10. □ Leppen, N. V., Ivchenko, E. L., & Golub, L. E. (2022). Nonlinear optical absorption and photocurrents in topological insulators. *Phys. Rev. B*, 105, 115306. DOI: 10.1103/PhysRevB.105.115306
11. □ Danilov, S. N., Golub, L. E., Mayer, T., Beer, A., Binder, S., Mönch, E., Minár, J., Kronseder, M., Back, C. H., Bougeard, D., & Ganichev, S. D. (2021). Superlinear Photogalvanic Effects in $(\text{Bi}_{0.3}\text{Sb}_{0.7})_2(\text{Te}_{0.1}\text{Se}_{0.9})_3$: Probing Three-Dimensional Topological Insulator Surface States at Room Temperature. *Phys. Rev. Applied*, 15, 064030. DOI: 10.1103/PhysRevApplied.15.064030
12. □ Candussio, S., Golub, L. E., Bernreuter, S., Jötten, T., Rockinger, T., Watanabe, K., Taniguchi, T., Eroms, J., Weiss, D., & Ganichev, S. D. (2021). Nonlinear intensity dependence of terahertz edge photocurrents in graphene. *Phys. Rev. B*, 104, 155404. DOI: 10.1103/PhysRevB.104.155404
13. □ Rasulov, R. Y., Rasulov, V. R., Urinova, K. K., Mamatova, M. A., & Akhmedov, B. B. (2024). One and multiphoton optical transitions in atomically thin layers of transition metal dichalcogenides. *East European Journal of Physics*, 2024(1), 393–397. DOI: 10.26565/2312-4334-2024-1-40
14. □ Parshin, D. A., & Shabaev, A. R. (1987). Theory of linear IR absorption by semiconductors with degenerate bands. *Zh. Exp. Teor. Fiz.*, 92(4), 1471-1484. URL: http://jetp.ras.ru/cgi-bin/dn/e.065_04_0827.pdf
15. Bir, G. L., & Pikus, G. E. (1972). *Symmetry and Strain-induced Effects in Semiconductors*. Wiley - New York. (584 p).
16. Ivchenko, E. L., & Rasulov, R. Ya. (1989). *Symmetry and real band structure of semiconductors*. Tashkent: Fan. (126 p). URL: <https://koha.lib.tsu.ru/cgi-bin/koha/opac-detail.pl?biblionumber=125752>
17. Vurgaftman, I., Meyer, J. R., & Ram-Mohan, L. R. (2001). Band parameters for III–V compound semiconductors and their alloys. *Journal of Applied Physics*, 89(11), 5815-5875. DOI: 10.1063/1.1368156
18. Pässler, R. (1999). Parameter Sets Due to Fittings of the Temperature Dependencies of Fundamental Bandgaps in Semiconductors. *Phys. Stat. Sol. (b)*, 216, 975-1007. DOI: 10.1002/(SICI)1521-3951(199912)216:23.3.CO;2-E

ПЛОТНОСТИ ПОТОКОВ РАДОНЕ В ПОЧВАХ НУРАТИНСКОГО И ОТРОГАХ ЗАРАФШАНСКОГО ХРЕБТОВ

*Нурмуродов Лочин Туркашевич,
УНИВЕРСИТЕТ ЗАРМЕД*

Аннотация. В данной работе исследована плотность потока радона в почвах отдельных районов Нуратинских гор и Зеравшанского хребта методом пассивной воздушной сорбции. В ходе исследования проанализированы пространственное распределение радона и его средние значения. Также на основе гамма-спектрометрических измерений оценены уровни активности. Полученные результаты выявили различия между исследуемыми территориями и установили их связь с геологическими факторами. Рассмотрены флуктуации концентрации радона. Данная работа формирует научную основу для оценки радиационно-экологического состояния региона и имеет важное значение для развития систем мониторинга. Отмечено, что состав почв и степень их трещиноватости влияют на распространение радона. Полученные результаты могут служить базой для будущих исследований и представляют собой значимые научные выводы.

Ключевые слова: радионуклид, гамма-спектр, радон, спектрометр, активность.

NURATA TOG'LARI VA ZARAFSHON TIZMASI TUPROQLARIDAGI RADON OQIMINING ZICHLIGI

Annotatsiya. Nurota tog'lari va Zarafshon tizmasidagi ayrim hududlar tuproqlaridagi radon oqimlarining zichligi passiv havo sorbsiyasi usuli bilan o'rganildi. Tadqiqotda radon oqimlarining fazoviy taqsimoti va o'rtacha qiymatlari tahlil qilindi. Shuningdek, gamma spektrometrik o'lchovlar asosida aktivlik darajalari baholandi. Natijalar hududlar o'rtasidagi farqlarni ko'rsatdi hamda geologik omillar bilan bog'liqligini aniqladi. Radon miqdorlarining fluktuatsiyasi muhokama qilindi. Ushbu ish radiatsion ekologik holatni baholash uchun ilmiy asos yaratadi hamda monitoring tizimlarini rivojlantirish uchun muhim ahamiyatga ega ekanligi ta'kidlanadi. Shu bilan birga, tuproq tarkibi va yoriqlanish darajasi radon tarqalishiga ta'sir qilishi qayd etiladi, natijalar kelajak tadqiqotlar uchun asos bo'lib xizmat qiladi, ilmiy jihatdan muhim natijalar hisoblanadi.

Kalit so'zlar: radionuklid, gamma-spektr, radon, spektrometr, aktivlik.

RADON FLUX DENSITIES IN THE SOILS OF NURATA AND SPURS OF ZARAFSHAN RIDGES

Abstract. This study investigates the density of radon flux in soils of selected areas of the Nurata Mountains and the Zarafshan Range using the passive air sorption method. The spatial distribution and average values of radon flux were analyzed. In addition, gamma spectrometric measurements were used to assess activity levels. The results revealed differences between the studied areas and demonstrated their correlation with geological factors. Fluctuations in radon concentrations were also discussed. This work provides a scientific basis for assessing the radiological and environmental conditions of the region and is important for the development of monitoring systems. It was noted that soil composition and the degree of fracturing influence radon distribution. The findings serve as a foundation for future research and represent significant scientific results.

Keywords: radionuclide, gamma-spectrum, radon, spectrometer, activity.

Исследование плотности потока радона (ППР) с поверхности почв местности является актуальной радиозэкологической задачей.

В общей дозе облучения населения Земли ионизирующими излучениями, по данным ВОЗ [1], 43 % обусловлено ингаляцией радона. Изотопы радона ^{222}Rn ($T_{1/2} \approx 3,82$ дн), ^{220}Rn ($T_{1/2} \approx 56$ с) и ^{219}Rn ($T_{1/2} \approx 4$ с) образуются в горных породах подстилающих почвенный покров Земли. Через поры и трещины, пород слои почв или природных вод они эмануруют в приземные слои воздуха, проникают в помещение и ингалируются человеком. Согласно международным и национальным законодательствам, концентрации радона в помещениях и на местностях, в зависимости от их

назначения не должны превышать соответствующие уровни, установленные нормами радиационной безопасности.

В настоящей работе приведены результаты исследования плотности потока радона (ППР) с поверхностей почв в урочище ПАНГАТ, на южном склоне центральной части Северо-Нуратийского хребта, урочище САРЫКУЛЬ в Каратепинских горах и СЕДЛОВИНЕ Каратепинских и Чакиркалянских гор Заравшанского хребта.

1. Пробные площадки

Исследование ППР проведено с поверхности почв 21 площадки в ПАНГАТЕ, 15 – в САРИКУЛЕ 15 и 9 – в СЕДЛОВИНЕ. Площадки, в первом приближении равноудалены друг от друга и расположены на азимутальных линиях, проходящих через первые №1 и последние №f площадки (таблица 1).

Таблица 1.

Координаты (N и E) и высоты над уровнем моря (H) первых (№1) и последних (№f) площадок местностей

Местность	№1	№f
ПАНГАТ	N ₁ 40°24'08", E ₁ 66°39'09", H ₁ 1196 м	N ₂₁ 40°24'39", E ₂₁ 66°32'11", H ₂₁ 1050 м
САРЫКУЛЬ	N ₁₅ 39°29'55", E ₁₅ 66°31'4", H ₁₅ 1077 м	N ₁₅ 39°25'55", E ₁₅ 39°29'55", H ₁₅ 874 м
СЕДЛОВИНА	N ₉ 39°17'45", E ₉ 66°54'29", H ₉ 1690 м	N ₉ 39°17'17", E ₉ 66°39'09", H ₉ 1179 м

Над каждой площадкой, на высоте 1 м, поисковым радиометром СРП-68-01 измерялась мощность эквивалентной дозы (МЭД) фонового γ -излучения.

Отбор проб на площадках ПАНГАТА и САРЫКУЛЯ осуществлен 9 и 11 апреля, а с площадок СЕДЛОВИНЫ 14 июля 2018 г. Отметим, что одновременно с этих площадок отбирались образцы почв, для установления в них вертикальных распределений первичных естественных радионуклидов ^{226}Ra , ^{232}Th , ^{40}K , космогенного ^7Be и техногенного ^{137}Cs (результаты этих исследований опубликованы в работе [2]).

2. Методика исследований ППР

Исследования ППР проведены квази-интегральным методом, путем пассивной сорбции воздуха на сорбционных детекторах ДРСИ, представляющих собой полые дюралюминиевые цилиндры, размерами $\varnothing 70 \times 18$ мм, заполненные активированным углём, марки СКТ-3, с торцов закрытые сетками из нержавеющей стали. Детекторы предварительно дегазировались в сушильном шкафу при температуре 110°C, после чего помещались в защитный герметический футляр.

Процедуры получения измерительных проб заключались в следующем:

- площадки почвы $\varnothing 40$ см очищались от корневых систем растений на глубину 5-10 см,
- в их центрах устанавливалось стойки с сорбционными детекторами и накрывались камерами объемом 3,3 л,
- после 3-х часовой экспозиции детекторы снимались со стойки, помещались в маркированные защитные футляры и транспортировались в лабораторию.

Гамма спектры проб измерялись на сцинтиляционном спектрометре (NaI(Tl), $\varnothing 80 \times 80$ мм, энергетическое разрешение 8,5% на линии 662 кэВ ^{137}Cs). Калибровка спектрометра осуществлялась с помощью эталонного источника ^{226}Ra , активностью 680 Бк, осажденного на активированном угле сорбционного детектора.

Набор и обработка спектрометрической информации проб осуществлялось на РС с помощью программного обеспечения ASW, НТЦ RADEK. Погрешности в значениях ППР варьировались в пределах от 15 до 40 %. Минимально определяемые уровни ППР – 9 мкБк/м²с. Спектрометр эталонный источник и методика обработки спектров сертифицированы в ВНИИМ им. Д.И.Менделеева.

На рис.1, в качестве примера, приведены гамма-спектры активированного и дезактивированного сорбционного детектора, их разность и спектр эталонного источника ^{226}Ra .

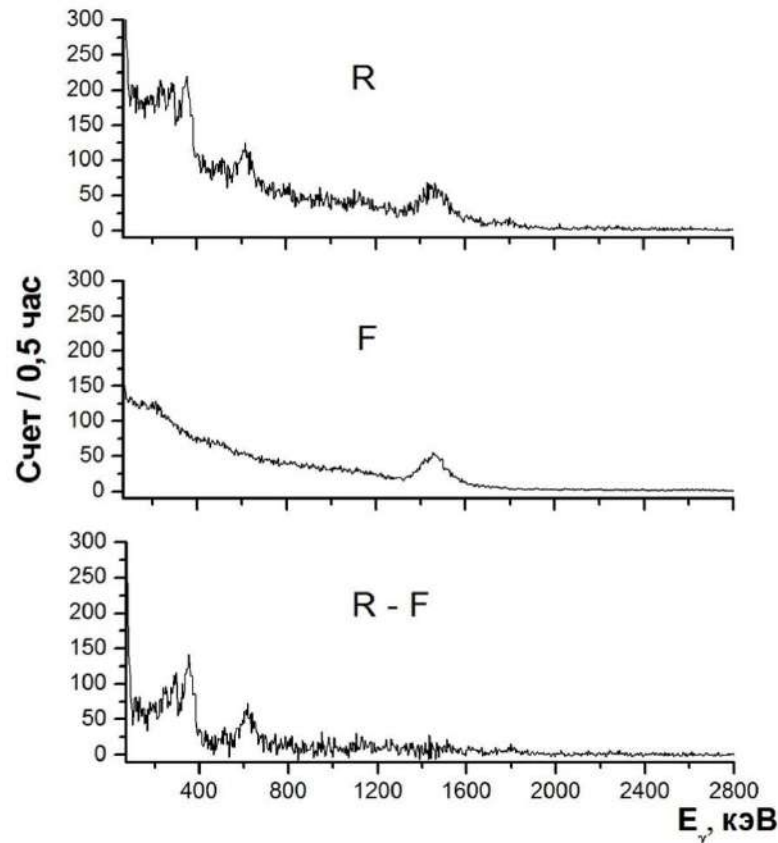


Рис.1. Спектры активированного (R) и дезактивированного (F) сорбционного детектора, их разность и спектр эталонного источника (R-F)

3. Экспериментальные результаты

Полученные значения ППР сильно флуктуируют, при этом их средние арифметические значения на площадках САРЫКУЛЯ и СЕДЛОВИНЫ близки между собой и заметно ниже чем на площадках ПАНГАТА (таблица 2).

Таблица 2.

Значения ППР – R (мкБк/м²с) в почвах площадок местностей ПАНГАТ ($R_{\text{ср}} = 92, R_{\text{мин}} = 12, R_{\text{макс}} = 265$)

№	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
R	93	79	92	192	208	153	101	50	119	110	114
№	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	
R	173	56	30	58	86	265	112	38	80	12	

САРЫКУЛЬ ($R_{\text{ср}} = 48, R_{\text{мин}} < 9, R_{\text{макс}} = 10$)

№	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
R	21	<9	<9	76	45	44	53	20	101	38	<9	23	<9	56	57

СЕДЛОВИНА ($R_{\text{ср}} = 51, R_{\text{мин}} = 30, R_{\text{макс}} = 82$)

№	1	2	3	4	5	6	7	8	9
R	42	60	47	40	46	30	82	55	57

В отличие от ППР, флуктуации МЭД и удельных активностей ²²⁶Ra в 30 сантиметровых слоях почв [2] исследованных площадок не превышает погрешностей в их значениях. При этом, так же, как и для ППР их среднеарифметические значения на площадках Сарыкуля и Седловины близки между собой и ниже, чем на площадках Пангата (таблица 3).

Таблица 3.

Средние и предельные значения ППР – R, МЭД – D и удельных активностей ²²⁶Ra – A в почвах площадок местностей.

Местность	$R(R_{\text{мин}} - R_{\text{макс}})$ мкБк/м ² с	$D(D_{\text{мин}} - D_{\text{макс}})$ мЗв/час	$A(A_{\text{мин}} - A_{\text{макс}})$ Бк/кг
ПАНГАТ	92 (12-265)	0,27 (020-034)	29 (26-37)
САРИКУЛЬ	48 (<9-101)	0,21 (018-025)	24 (19-32)
СЕДЛОВИНА	51 (30-82)	0,21 (019-026)	26 (20-35)

4. Обсуждение результатов

Отмеченные факты можно объяснить следующими обстоятельствами:

- сильные флуктуации значений ППР в почвах соседних площадок местности обусловлены различиями в структуре (размеры, количество трещин и т.д.) подстилающих горных пород,
- слабые отличия значений МЭД и удельных активностей ²²⁶Ra в почвах площадок связаны со слабыми различиями состава веществ на ограниченных участках местности,
- практически равные усредненные значения ППР, МЭД и удельных активностей радия в почвах площадок **САРЫКУЛЯ** и **СЕДЛОВИНЫ** можно понять учитывая, что они входят в состав одного и того же Заравшанского хребта и, по-видимому, имеют близкое геологическое строение, а заметно большие их значения в почвах **ПАНГАТА** – наличием в горах Нуратау богатых урано-содержащих горных пород, например доломитов-рудовмещающих и свинцово-цинковых руд с активностями ²²⁶Ra свыше 650 Бк/кг [3].

Заключение. Проведенное исследование позволило выявить

- сильные флуктуации значений ППР в почвах площадок местностей, при этом флуктуации соответствующих значений МЭД и удельных активностей Ra-226 незначительны,
- средние значения ППР, МЭД и удельных активностей Ra-226 в почвах **ПАНГАТА** (Нуратинские горы) выше, чем в **САРЫКУЛЕ** и **СЕДЛОВИНЕ** (отроги Заравшанского хребта).

ЛИТЕРАТУРА:

1. *UNSCEAR-2000 report to the General Assembly source effects and risks of ionizing radiation, NY, United Nation Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation.*
2. *Базарбаев Н.Н., Иванов А.К., Мавланов Т.Т., Муминов И.Т., Муминов Т.М., Маматкулов О.Б., Нурмуродов Л.Т., Сафаров А.А., Синдаров Б.А., Худайбердиев А.Т., Чиндалиев М.Х. Первичные, техногенные и космогенные радионуклиды в почвах Нуратинского и отрогах Заравшанского хребтов // Журнал "Научный вестник СамГУ" (в печати)*
3. *Inoyatov A.Kh., Muminov I.T., Mukhamedov A.K., Rashidova D.Sh., Osmanov B.S., Safarov A., Safarov A.N., Khushmurodov Sh.Kh. Radionuclides in the environment of Nuratau. // Journal of Radioanalytical and Nuclear Chemistry, 2007, Vol.273, No.2, pp.497-506.*

К ТЕОРИИ ОДНОФОТОННЫХ ОПТИЧЕСКИХ ПЕРЕХОДОВ В ПОЛУПРОВОДНИКАХ КУБИЧЕСКОЙ И ТЕТРАЭДРИЧЕСКОЙ СИММЕТРИИ 1-ЧАСТЬ

Расулов Вохоб Рустамович,

Профессор кафедры Физика Ферганского государственного университета, д.ф.-м.н..

r_rasulov51@mail.ru

Маматова Махлиё Адхамовна,

Доцент кафедры Физика Ферганского государственного университета, PhD.

Фармонов Исломжон,

Докторант кафедры Физика Ферганского государственного университета.

Толипов Жасурбек

Докторант кафедры Физика Ферганского государственного университета.

Аннотация. В данной работе проведен глубокий теоретический анализ трех типов однофотонных оптических переходов в полупроводниках с кубической и тетраэдрической симметрией. Детально исследованы внутризонные переходы между ветвями легких и тяжелых дырок сложной валентной зоны, а также фундаментальные межзонные переходы между подзонами валентной зоны и зоной проводимости. В рамках теоретической модели получены точные аналитические выражения, описывающие поляризационную и спектральную зависимости коэффициента однофотонного внутризонного линейно-циркулярного дихроизма (ЛЦД). Важным достижением является строгий учет нелинейного эффекта когерентного насыщения при высоких интенсивностях излучения. В результате расчетов обнаружен и описан ярко выраженный осцилляционный характер поляризационной зависимости коэффициента однофотонного ЛЦД для всех рассмотренных квантовых переходов. Доказано, что эти физические осцилляции напрямую обусловлены специфическим вкладом эффекта когерентного насыщения в матричные элементы. Данные новые теоретические результаты углубляют понимание нелинейной оптики полупроводников.

Ключевые слова. Оптические переходы, поглощение и дихроизм в многозонной энергетической структуре полупроводников.

KUBIK VA TETRAEDRIK SIMMETRIYALI YARIMO‘TKAZGICHLARDA BIR FOTONLI OPTIK O‘TISHLAR NAZARIYASI HAQIDA. 1-QISM

Annotatsiya. Kub va tetraedr simmetriyaga ega yarimo‘tkazgichlarda valentlik zonasining yengil va og‘ir kovak tarmoqlari o‘rtasida, shuningdek valentlik zonasi bilan o‘tkazuvchanlik zonasi orasida yuz beradigan uchta bitta fotonli optik o‘tish nazariy jihatdan batafsil tahlil qilindi. Tadqiqot davomida kogerent to‘yinganlik effekti alohida hisobga olinib, bir fotonli zona ichki va zonalararo chiziqli-sirkulyar dioxroizm koeffitsiyentining qutblanish darajasi hamda spektral bog‘liqliklarini ifodalovchi analitik tenglamalar olindi. Natijalar shuni ko‘rsatdiki, mazkur optik o‘tishlarda kogerent to‘yinganlik effekti matritsaviy elementlar qiymatiga sezilarli ta‘sir ko‘rsatadi va bu holat dioxroizm koeffitsiyentining xatti-harakatida yaqqol namoyon bo‘ladi. Xususan, o‘rganilgan barcha optik o‘tishlar uchun bir fotonli chiziqli-sirkulyar dioxroizm koeffitsiyentining yorug‘lik qutblanish darajasiga bog‘liqligi ossilyatsiyalanuvchi xarakterga ega ekani aniqlandi. Ushbu natijalar yarimo‘tkazgichlarda qutblangan nurning yutilish mexanizmlarini chuqurroq tushuntirishga, optik xossalarning nazariy tavsifini boyitishga va kelgusida fotoelektron hamda optoelektron qurilmalarni modellashtirishda foydalanishga xizmat qiladi.

Kalit so‘zlar: optik o‘tishlar, yarimo‘tkazgichlarning ko‘p zonali energetik strukturasi yutilish va dioxroizm.

ON THE THEORY OF ONE-PHOTON OPTICAL TRANSITIONS IN SEMICONDUCTORS OF CUBIC AND TETRAHEDRAL SYMMETRY. PART 1

Abstract. This paper presents an in-depth theoretical analysis of three types of one-photon optical transitions in semiconductors with cubic and tetrahedral symmetry. Intraband transitions between the light and heavy hole branches of the complex valence band, as well as fundamental interband transitions between

the valence band subbands and the conduction band, are investigated in detail. Within the framework of the theoretical model, exact analytical expressions describing the polarization and spectral dependencies of the one-photon intraband linear-circular dichroism (LCD) coefficient have been derived. A significant achievement of this work is the rigorous consideration of the nonlinear effect of coherent saturation at high radiation intensities.

As a result of the calculations, a pronounced oscillatory behavior of the polarization dependence of the one-photon LCD coefficient was discovered and described for all considered quantum transitions. It is proven that these physical oscillations are directly caused by the specific contribution of the coherent saturation effect to the matrix elements. These new theoretical findings enhance the understanding of nonlinear optics in multi-band semiconductors.

Keywords: Optical transitions, absorption and dichroism in the multiband energy structure of semiconductors.

Введение. Поглощение света, связанное с оптическими переходами между подзонами тяжелых и легких дырок валентной зоны кубической симметрии давно изучается как теоретически, так и экспериментально (см., например, [1-3] и ссылки, приведенные в них).

В работах [4-9] теоретически исследованы одно- и многофотонное поглощение, обусловленное как межзонными, так и внутризонными оптическими переходами: в [8] исследован многофотонный внутризонный линейно-циркулярный дихроизм (ЛЦД) в *p-Ge* в режиме развитой нелинейности, когда в поглощение вносят сопоставимый вклад многофотонные процессы, а в [4, 6-9] исследованы спектральные и температурные зависимости коэффициента многофотонного поглощения света и ЛЦД в полупроводниках со сложной зонной структурой. В [10, 11] обнаружено насыщение скорости вертикального оптического перехода в области большей интенсивности и нелинейные по интенсивности света фототоки, индуцируемые прямыми оптическими переходами между топологическими поверхностными и объемными состояниями в трехмерных топологических изоляторах. В [12] развита микроскопическая теория нелинейного краевого фототока в графене, возникающего при освещении терагерцовым излучением, а в [13] проанализированы одно-и многофотонные межзонные оптические переходы в моноатомных слоях дихалькогенидов переходных металлов. В [14-17] экспериментально исследовано двухфотонное поглощение неполяризованного света в *GaAs*, *InP*, *GaInAs*, *InSb*, *InAsP*.

Анализ проведенных нами расчетов коэффициента ЛЦД $\eta = W_{lin}/W_{circ}$ (W_{lin} и W_{circ} вероятности поглощения света линейной и циркулярной поляризации) свидетельствует о том, что учет эффекта когерентного насыщения приведет к своеобразной поляризационной зависимости. Поэтому представляет интерес теоретическое исследование коэффициента η в зависимости от угла между волновыми векторами носителей тока и фотона при поглощении поляризованного света, связанного с оптическими переходами из подзон легких и тяжелых дырок в подзону спин-орбитального расщепления и вклад явления когерентного насыщения [5-9] в η , исследованию которых посвящена данная работа.

Однофотонное поглощение в полупроводниках, основанное на межзонных оптических переходах и переходах между ветвями валентной зоны

Общие соотношения. Для определения коэффициента однофотонного поглощения света требуется вычисление матричных элементов оператора импульса (или скорости). В подобных расчетах выбирается используемый базис блоховских состояний. В частности, в ряде работ [1-5] выбираются базисные функции гамильтониана Латтинжера-Кона. Мы же в дальнейших расчетах

$$\begin{aligned} |\Gamma_6, +1/2\rangle &= \alpha S, \quad |\Gamma_6, -1/2\rangle = \beta S, \quad |\Gamma_8, +3/2\rangle = -\alpha \frac{X+iY}{\sqrt{2}}, \quad |\Gamma_8, +1/2\rangle = \sqrt{\frac{2}{3}} \alpha Z - \beta \frac{X+iY}{\sqrt{6}}, \\ |\Gamma_8, -1/2\rangle &= \sqrt{\frac{2}{3}} \beta Z + \alpha \frac{X-iY}{\sqrt{6}}, \quad |\Gamma_8, -3/2\rangle = \beta \frac{X-iY}{\sqrt{2}}, \quad |\Gamma_7, +1/2\rangle = \frac{1}{\sqrt{3}} [\alpha Z + \beta(X+iY)], \\ |\Gamma_7, -1/2\rangle &= \frac{1}{\sqrt{3}} [\beta Z - \alpha(X-iY)] \end{aligned}$$

используем базисные функции.

Матричные элементы оператора скорости для однофотонных переходов в данном базисе приведены в следующих таблицах $\hat{\mathbf{v}}$ — оператор скорости, $\mathbf{e}\hat{\mathbf{v}}$ — вектор поляризации света):

- а) переходы из ветвей тяжелых и легких дырок валентной зоны в зону проводимости

PHYSICS

$$\left| hh, \pm \frac{3}{2} \right\rangle \rightarrow \left| lh, \pm \frac{1}{2} \right\rangle, \left| hh, \pm \frac{3}{2} \right\rangle \rightarrow \left| lh, \mp \frac{1}{2} \right\rangle$$

относительно оптических переходов в таблицах 3 и 4; б) из ветвей тяжелых (hh) и легких (lh) дырок валентной зоны в зону проводимости (с)

$$\left| hh, \pm \frac{3}{2} \right\rangle \rightarrow \left| c, \pm \frac{1}{2} \right\rangle, \left| hh, \pm \frac{3}{2} \right\rangle \rightarrow \left| c, \mp \frac{1}{2} \right\rangle, \left| lh, \mp \frac{1}{2} \right\rangle \rightarrow \left| c, \pm \frac{1}{2} \right\rangle, \left| lh, \mp \frac{1}{2} \right\rangle \rightarrow \left| c, \mp \frac{1}{2} \right\rangle$$

относительно оптических переходов в таблицах 1 и 2; с) из ветви спин-орбитального взаимодействия (SO) валентной зоны в зону проводимости

$$\left| SO, \pm \frac{1}{2} \right\rangle \rightarrow \left| c, \pm \frac{1}{2} \right\rangle, \left| SO, \pm \frac{1}{2} \right\rangle \rightarrow \left| c, \mp \frac{1}{2} \right\rangle$$

относительно оптических переходов в таблице 5; d) внутри ветви спин-орбитального взаимодействия валентной зоны, протекающих во внутренних

$$\left| so, \pm \frac{1}{2} \right\rangle \rightarrow \left| so, \pm \frac{1}{2} \right\rangle, \left| so, \pm \frac{1}{2} \right\rangle \rightarrow \left| so, \mp \frac{1}{2} \right\rangle$$

относительно оптических переходов зафиксированы в таблице 6.

В таблицах приведены зонные параметры A , B , параметр Кейна p_{cv}^* , масса свободного электрона m_0 , волновой вектор фотовозбужденных носителей заряда k (определяемый из закона сохранения энергии для рассматриваемых оптических переходов), остальные величины являются общеизвестными.

Таблица 1.

hh/hh	$hh, 3/2$	$hh, -3/2$
$hh, 3/2$	$\frac{2(A-B)k}{\hbar} e_z$	0
$hh, -3/2$	0	$\frac{2(A-B)k}{\hbar} e_z$

Таблица 2.

lh/lh	$lh, 1/2$	$lh, -1/2$
$lh, 1/2$	$\frac{2(A+B)k}{\hbar} e_z$	0
$lh, -1/2$	0	$\frac{2(A+B)k}{\hbar} e_z$

Таблица 3.

c/hh	$hh, 3/2$	$hh, -3/2$
$c, 1/2$	$\frac{p_{cv}^* e_+}{m_0 \sqrt{2}}$	0
$c, -1/2$	0	$\frac{p_{cv}^* e_-}{m_0 \sqrt{2}}$

Таблица 4.

c/lh	$lh, 1/2$	$lh, -1/2$
$c, 1/2$	$\frac{p_{cv}^*}{m_0} \sqrt{\frac{2}{3}} e_z$	$\frac{p_{cv}^* e_-}{m_0 \sqrt{6}}$
$c, -1/2$	$-\frac{p_{cv}^* e_+}{m_0 \sqrt{6}}$	$\frac{p_{cv}^*}{m_0} \sqrt{\frac{2}{3}} e_z$

Таблица 5.

so/c	$c, 1/2$	$c, -1/2$
$so, 1/2$	$\frac{p_{cv}^* e_z}{m_0 \sqrt{3}}$	$\frac{e_- p_{cv}^*}{m_0 \sqrt{3}}$
$so, -1/2$	$-\frac{p_{cv}^* e_+}{m_0 \sqrt{3}}$	$\frac{p_{cv}^* e_z}{m_0 \sqrt{3}}$

Таблица 6.

so/so	$so, 1/2$	$so, -1/2$
$so, 1/2$	$\frac{\hbar k}{m_{so}} e_z$	0
$so, -1/2$	0	$\frac{\hbar k}{m_{so}} e_z$

Здесь компоненты вектора поляризации света e_x, e_y, e_z относятся к системе координат, образованной осями e'_x, e'_y, e'_z , где $z \parallel k$. В дальнейшем эти составляющие вектора поляризации обозначены как e .

Следует отметить, что для оптических переходов $hh, lh \rightarrow so$ необходимо использовать следующие выражения, полученные с помощью теории возмущений и пропорциональные волновому вектору k :

$$\| \mathbf{ev}_{so,s;lh,s'} \| = \frac{\hbar k}{2m_0^2} \sum_{s''} \left[p_{so,s;c,s''}^z (\mathbf{ep}_{c,s'';lh,s'}) + (\mathbf{ep}_{so,s;c,s''}) p_{c,s'';lh,s'}^z \right] \left(\frac{1}{E_{v,\Gamma_7}^0 - E_c^0} + \frac{1}{E_{v,\Gamma_8}^0 - E_c^0} \right), \quad (1)$$

$$\| \mathbf{ev}_{so,s;hh,s'} \| = \frac{\hbar k}{2m_0^2} \sum_{s''} p_{so,s;c,s''}^z (\mathbf{ep}_{c,s'';hh,s'}) \left(\frac{1}{E_{v,\Gamma_7}^0 - E_c^0} + \frac{1}{E_{v,\Gamma_8}^0 - E_c^0} \right), \quad (2)$$

\mathbf{p} — оператор импульса, \hbar — постоянная Дирака; нижние индексы энергии Γ_7 и Γ_8 означают принадлежность к ветви спин-орбитального взаимодействия и валентной зоне соответственно. Как видно, коэффициенты, получаемые после суммирования по s'' , отличаются от аналогичных коэффициентов в гамильтониане Латтинжера: при этом $1/E_g$ заменяется следующим выражением:

$$\frac{1}{2} \left(\frac{1}{E_g + \Delta_{so}} + \frac{1}{E_g} \right). \quad (3)$$

Для оптических переходов $hh \leftrightarrow ll$ можно использовать гамильтониан Латтинжера. Таким образом, в последующих главах мы рассчитаем представленные в вышеупомянутых таблицах составляющие матричные элементы однофотонных оптических переходов, а также зависимость вычисленного с их помощью коэффициента однофотонного поглощения света от интенсивности, частоты света и температуры образца; кроме того, будет проведен теоретический анализ полученных результатов.

Оптические переходы из ветви тяжелых дырок валентной зоны в зону проводимости. Квадрат модуля матричного элемента оптических переходов выражается следующим образом:

$$\left| M_{lh,+1/2;hh,+3/2}^{(1)} \right|^2 = \frac{1}{2} \left(\frac{eA_0}{c\hbar} p_{c,v} \right)^2 |e'_+|^2, \quad \left| M_{lh,-1/2;hh,-3/2}^{(1)} \right|^2 = \frac{1}{2} \left(\frac{eA_0}{c\hbar} p_{c,v} \right)^2 |e'_-|^2. \quad (4)$$

Проведем отдельные анализы для поляризованного света. В частности, для линейно поляризованного света:

$$\left\langle \left| M_{V,+1/2;V,+3/2}^{(1,lin)} \right|^2 + \left| M_{V,-1/2;V,-3/2}^{(1,lin)} \right|^2 \right\rangle = \frac{\pi I E_g p_{c,v}^2}{I_g 2B} \left(\frac{E_g}{\hbar\omega} \right)^2 \mathfrak{S}_1^{lin}, \quad (5)$$

а для циркулярно-поляризованного света:

$$\left\langle \left| M_{V,+1/2;V,+3/2}^{(1,circ)} \right|^2 + \left| M_{V,-1/2;V,-3/2}^{(1,circ)} \right|^2 \right\rangle = \frac{\pi I E_g p_{c,v}^2}{I_g 2B} \left(\frac{E_g}{\hbar\omega} \right)^2 \mathfrak{S}_1^{circ}, \quad (6)$$

здесь:

$$\mathfrak{S}_1^{lin} = \frac{1}{2} \left(\frac{eA_0}{c\hbar} p_{c,v} \right)^2 \int (1 - \cos^2(\vec{e} \cdot \vec{k})) \sin \theta d\theta, \quad \mathfrak{S}_1^{circ} = \frac{1}{4} \left(\frac{eA_0}{c\hbar} p_{c,v} \right)^2 \int (1 + \cos^2(\vec{q} \cdot \vec{k})) \sin \theta d\theta. \quad (7)$$

Оптические переходы из зоны легких дырок валентной зоны в зону. Оптические переходы такого типа имеют четырехкратную природу, и для квадрата абсолютного значения соответствующего структурного матричного элемента можно записать следующее выражение:

$$\left| M_{c,+1/2;lh,+1/2}^{(1)} \right|^2 = \left(\frac{eA_0}{c\hbar} p_{c,v} \right)^2 \frac{2}{3} |e'_z|^2, \quad \left| M_{c,-1/2;lh,+1/2}^{(1)} \right|^2 = \left(\frac{eA_0}{c\hbar} p_{c,v} \right)^2 \frac{1}{6} |e'_+|^2, \\ \left| M_{c,+1/2;lh,-1/2}^{(1)} \right|^2 = \left(\frac{eA_0}{c\hbar} p_{c,v} \right)^2 \frac{1}{6} |e'_-|^2, \quad \left| M_{c,-1/2;lh,-1/2}^{(1)} \right|^2 = \left(\frac{eA_0}{c\hbar} p_{c,v} \right)^2 \frac{2}{3} |e'_z|^2. \quad (8)$$

Основываясь на вышеприведенных выражениях, теперь

$$\left| M_{c,+1/2;lh,+1/2}^{(1)} \right|^2 + \left| M_{c,-1/2;lh,+1/2}^{(1)} \right|^2 + \left| M_{c,-1/2;lh,-1/2}^{(1)} \right|^2 + \left| M_{c,+1/2;lh,-1/2}^{(1)} \right|^2$$

запишем выражения величины для линейно и циркулярно поляризованного света: если учитывать вклад явления когерентного насыщения в оптические переходы, то для линейно поляризованного света:

$$\left| M_{c,+1/2;lh,+1/2}^{(1,lin)} \right|^2 + \left| M_{c,-1/2;lh,+1/2}^{(1,lin)} \right|^2 + \left| M_{c,-1/2;lh,-1/2}^{(1,lin)} \right|^2 + \left| M_{c,+1/2;lh,-1/2}^{(1,lin)} \right|^2 = \frac{1}{6} \left(\frac{eA_0}{c\hbar} p_{c,v} \right)^2 \left(\mathfrak{R}_0^{(lin)} + 3 \cdot \mathfrak{R}_2^{(lin)} \right); \quad (9)$$

для циркулярно поляризованного света:

$$\left| M_{c,+1/2;lin,+1/2}^{(1,circ)} \right|^2 + \left| M_{c,-1/2;lin,+1/2}^{(1,circ)} \right|^2 + \left| M_{c,-1/2;lin,-1/2}^{(1,circ)} \right|^2 + \left| M_{c,+1/2;lin,-1/2}^{(1,circ)} \right|^2 = \frac{1}{6} \left(\frac{eA_0}{c\hbar} p_{c,v} \right)^2 \left(5 \cdot \mathfrak{R}_0^{(circ)} - 3 \cdot \mathfrak{R}_2^{(circ)} \right), \quad (10)$$

здесь

$$\mathfrak{R}_0^{(lin)} = \int_{-1}^{+1} dx \times \left(a_0 + b_0 x^2 \right)^{-1/2},$$

$$\mathfrak{R}_2^{(lin)} = \int_{-1}^{+1} dx \times x^2 \left(a_0 + b_0 x^2 \right)^{-1/2}, \quad \mathfrak{R}_2^{(circ)} = \int_{-1}^{+1} dx \times x^2 \left(a_0 - b_0 x^2 \right)^{-1/2}, \quad \mathfrak{R}_2^{(circ)} = \int_{-1}^{+1} dx \times x^2 \left(a_2 - b_2 x^2 \right)^{-1/2},$$

можно записать соотношения. В данных выражениях Ω — параметр Раби,

$$a_0 = 1 + \frac{\Omega}{3} \left(\frac{eA_0}{c\hbar} p_{c,v} \right)^2, \quad b_0 = \Omega \left(\frac{eA_0}{c\hbar} p_{c,v} \right)^2, \quad a_2 = 1 + \Omega \frac{+}{6} \left(\frac{eA_0}{c\hbar} p_{c,v} \right)^2, \quad b_2 = \frac{\Omega}{2} \left(\frac{eA_0}{c\hbar} p_{c,v} \right)^2.$$

Оптические переходы из спин-орбитально отщепленной ветви валентной зоны в зону проводимости.

Данные типы оптических переходов разнообразны, и квадрат модуля их структурных матричных элементов выражается следующим образом:

$$\left| M_{c,+1/2;SO,+1/2}^{(1,lin)} \right|^2 + \left| M_{c,-1/2;SO,+1/2}^{(1,lin)} \right|^2 + \left| M_{c,+1/2;SO,-1/2}^{(1,lin)} \right|^2 + \left| M_{c,-1/2;SO,-1/2}^{(1,lin)} \right|^2 = \frac{1}{3} \left(\frac{eA_0}{c\hbar} p_{c,v} \right)^2 \left(2|e'_z|^2 + |e'_+|^2 + |e'_-|^2 \right). \quad (11)$$

здесь

$$p_{c,v} = \left(3m_0^2 \frac{m_{hh} - m_{lh}}{4m_{hh}m_{lh}} E_g \right)^{1/2} \text{ — параметр Кейна.}$$

Проведем отдельные анализы для поляризованного света. В частности, для линейно поляризованного света получим следующий результат:

$$\left| M_{c,+1/2;SO,+1/2}^{(1,lin)} \right|^2 + \left| M_{c,-1/2;SO,+1/2}^{(1,lin)} \right|^2 + \left| M_{c,+1/2;SO,-1/2}^{(1,lin)} \right|^2 + \left| M_{c,-1/2;SO,-1/2}^{(1,lin)} \right|^2 = \frac{2\pi I}{3I_g} \frac{E_g p_{c,v}^2}{B} \left(\frac{E_g}{\hbar\omega} \right)^2. \quad (12)$$

и не зависит от угла. Для циркулярно поляризованного света:

$$\left| M_{V,+1/2;V,+3/2}^{(1,circ)} \right|^2 + \left| M_{c,-1/2;SO,+1/2}^{(1,circ)} \right|^2 + \left| M_{c,+1/2;SO,-1/2}^{(1,circ)} \right|^2 + \left| M_{c,-1/2;SO,-1/2}^{(1,circ)} \right|^2 = \frac{1}{6} \frac{2\pi I}{I_g} \frac{E_g p_{c,v}^2}{2B} \left(\frac{E_g}{\hbar\omega} \right)^2 \left[3 + \cos^2(\vec{q} \cdot \vec{k}) \right]. \quad (13)$$

Если учитывать вклад явления когерентного насыщения в оптические переходы, то последние два выражения переписываются в следующем виде:

$$\begin{aligned} & \left| M_{c,+1/2;SO,+1/2}^{(1,lin)} \right|^2 + \left| M_{c,-1/2;SO,+1/2}^{(1,lin)} \right|^2 + \left| M_{c,+1/2;SO,-1/2}^{(1,lin)} \right|^2 + \left| M_{c,-1/2;SO,-1/2}^{(1,lin)} \right|^2 = \\ & = \frac{\pi I}{12I_g} \frac{E_g p_{c,v}^2}{B} \left(\frac{E_g}{\hbar\omega} \right)^2, \end{aligned} \quad (14)$$

$$\left\langle \left| M_{V,+1/2;V,+3/2}^{(1,circ)} \right|^2 + \left| M_{c,-1/2;SO,+1/2}^{(1,circ)} \right|^2 + \left| M_{c,+1/2;SO,-1/2}^{(1,circ)} \right|^2 + \left| M_{c,-1/2;SO,-1/2}^{(1,circ)} \right|^2 \right\rangle = \frac{\pi I}{12I_g} \frac{E_g p_{c,v}^2}{B} \left(\frac{E_g}{\hbar\omega} \right)^2 \left(3\wp_0^{(circ)} + \wp_2^{(circ)} \right), \quad (15)$$

здесь

$$a_3 = 1 + \Omega \frac{\pi I}{I_g} \frac{E_g p_{c,v}^2}{2B} \left(\frac{E_g}{\hbar \omega} \right)^2, \quad b_3 = \Omega \frac{\pi I}{3I_g} \frac{E_g p_{c,v}^2}{2B} \left(\frac{E_g}{\hbar \omega} \right)^2,$$

$$\wp_0^{(circ)} = \int_{-1}^1 dx \times \{a_3 + b_3 x^2\}^{-1/2}, \quad \wp_2^{(circ)} = \int_{-1}^1 dx \times x^2 \{a_3 + b_3 x^2\}^{1/2},$$

$$\wp_0^{(lin)} = \int_{-1}^1 dx \times \{a_3 - b_3 x^2\}^{-1/2}, \quad \wp_2^{(lin)} = \int_{-1}^1 dx \times x^2 \{a_3 - b_3 x^2\}^{-1/2}.$$

($r = b_0$) на рис. 1: а) переходы из ветви легких дырок валентной зоны в зону проводимости; б)

переход из спин-орбитально отщепленной ветви валентной зоны в зону проводимости ($r = b_2$); в)

переходы из ветви тяжелых дырок валентной зоны в зону проводимости приведены графики зависимости коэффициента однофотонного линейно-циркулярного дихроизма соответствующего света от параметра Раби, а также от угла.

Из данных рисунков видно, что коэффициент линейно-циркулярного дихроизма: а) является осциллирующим в зависимости от угла, при этом величины экстремумов зависимостей и их расположение относительно угловой оси зависят от природы оптических переходов; б) уменьшается с ростом интенсивности при всех типах оптических переходов.

Оптические переходы из ветви тяжелых дырок валентной зоны в ветвь легких дырок.

Квадрат модуля структурного матричного элемента таких оптических переходов выражается следующим образом:

$$\left| M_{V,\pm 1/2;V,\pm 3/2}^{(1)} \right|^2 = \left(\frac{eA_0}{c\hbar} Bk \right)^2 |e'_{\pm}|^2, \tag{16}$$

$$\left| M_{V,+1/2;V,+3/2}^{(1)} \right|^2 + \left| M_{V,-1/2;V,-3/2}^{(1)} \right|^2 = 3 \left(\frac{eA_0}{c\hbar} Bk \right)^2 (|e'_+|^2 + |e'_-|^2).$$

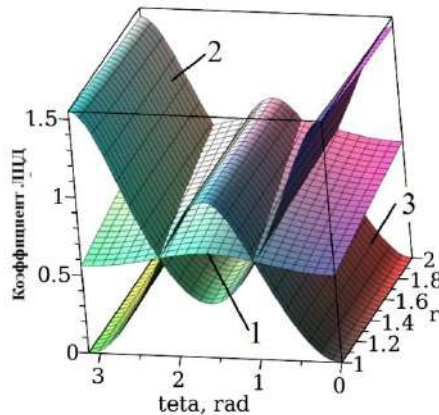


Рис. 1. Зависимость коэффициента линейно-циркулярного дихроизма от параметра Раби и угла: 1 - переходы из подзоны легких дырок валентной зоны в зону проводимости и $r = b_0$; 2 - переходы из спин-орбитально отщепленной подзоны валентной зоны в зону проводимости и $r = b_2$; 3 - относится к переходам из подзоны тяжелых дырок валентной зоны в зону проводимости и $r = b_3$.

Конечные выражения результирующих матричных элементов в зависимости от степени поляризации света приведены в таблице 1.

Таблица 1. Матричные элементы однофотонных оптических переходов

$$\left| M_{lh,+1/2;hh,+3/2}^{(1)} \right|^2 + \left| M_{lh,-1/2;hh,-3/2}^{(1)} \right|^2$$

	С учетом перекрытия состояний зоны проводимости и валентной зоны	Смешивание состояний зоны проводимости и валентной зоны не учитывается.
--	--	---

Для линейно поляризованного света	$\frac{4\pi e^2 I}{3cn_\omega} \frac{1}{(\hbar\omega)^2} \left(\frac{\hbar^2}{m_0} k\zeta_g \right)^2 \times$ $\times \left(1 - \cos^2(\vec{e} \cdot \vec{k}) \right).$	$\frac{12\pi e^2 I}{cn_\omega} \frac{1}{(\hbar\omega)^2} B^2 k^2 \times$ $\times \left(1 - \cos^2(\vec{e} \cdot \vec{k}) \right).$
Для циркулярно поляризованного света	$\frac{2\pi e^2 I}{3cn_\omega} \frac{1}{(\hbar\omega)^2} \left(\frac{\hbar^2}{m_0} k\zeta_g \right)^2 \times$ $\times \left(1 + \cos^2(\vec{q} \cdot \vec{k}) \right).$	$\frac{6\pi e^2 I}{cn_\omega} \frac{1}{(\hbar\omega)^2} B^2 k^2 \times$ $\times \left(1 + \cos^2(\vec{q} \cdot \vec{k}) \right).$

Здесь учтено соотношение $\left(\frac{eA_0}{\hbar c} \right)^2 = \frac{2\pi e^2 I}{cn_\omega} (\hbar\omega)^{-2}$. Здесь

$$R_I^{(lin)} = \frac{4\pi e^2 I}{3cn_\omega} \frac{1}{(\hbar\omega)^2} \left(\frac{\hbar^2}{m_0} k\zeta_g \right)^2, \quad R_I^{(circ)} = \frac{2\pi e^2 I}{3cn_\omega} \frac{1}{(\hbar\omega)^2} \left(\frac{\hbar^2}{m_0} k\zeta_g \right)^2, \quad R_{L-K}^{(lin)} = \frac{12\pi e^2 I}{cn_\omega} \frac{1}{(\hbar\omega)^2} B^2 k^2,$$

$$R_{L-K}^{(circ)} = \frac{6\pi e^2 I}{cn_\omega} \frac{1}{(\hbar\omega)^2} B^2 k^2$$

используются обозначения.

Выводы. Показано, что при учете вклада эффекта когерентного насыщения угловые зависимости вероятностей однофотонных оптических переходов из ветви тяжелых и легких дырок в подзону спин-орбитального расщепления валентной зоны для света как линейной, так циркулярной поляризации имеют осцилляционный характер независимо от значений параметра Раби.

Максимальные значения угловой зависимости коэффициентов однофотонных линейно-циркулярных дихроизмов как для оптических переходов уменьшаются с ростом параметра Раби независимо от угла между волновыми векторами носителей тока и фотона, а их минимальное значение для переходов первого типа отлично от нуля в области низких значений.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Ivchenko, E. L. (1972). Two-photon absorption of light and optical orientation of free carriers. *Physics. St. Petersburg*, 14(12), 3489-3496.
2. Rasulov, R. Ya. (1993). Polarization optical photovoltaic effects in semiconductors with linear and nonlinear absorption of light (Doctoral dissertation). Ioffe Institute, St. Petersburg. (168 p).
3. Ganichev, S. D., Ivchenko, E. L., Rasulov, R. Ya., Yaroshetsky, I. D., & Averbukh, B. Ya. (1993). Linear-circular dichroism of the drag current during nonlinear intersubband absorption of light in p-Ge . *FTT*, 35(1), 198-207. (In Russian). URL: <https://journals.ioffe.ru/articles/viewPDF/14762>
4. Rasulov, R. Ya. (1993). Linear-circular dichroism in multiphoton intersubband absorption in semiconductors. *Semiconductors*, 35(6), 1674-1678. URL: <https://journals.ioffe.ru/articles/viewPDF/14966>
5. Rasulov, R. Ya., Khoshimov, G. Kh., & Kholitdinov, Kh. (1996). Linear-circular dichroism of nonlinear light absorption in n-GaP . *Semiconductors*, 30(2), 274-272. URL: <https://journals.ioffe.ru/articles/viewPDF/18345>
6. Rasulov, V. R., Rasulov, R. Ya., & Eshboltaev, I. (2017). Linearly and Circular Dichroism in a Semiconductor with a Complex Valence Band with Allowance for Four-Photon Absorption of Light. *Physics of the Solid State*, 59, 463. DOI: 10.1134/S1063783417030283
7. Rasulov, R. Y., Rasulov, V. R., Eshboltaev, I., & Sultonov, R. R. (2021). Two- and Three-Photon Linear Circular Dichroism in Semiconductors of Cubic Symmetry. *Russian Physics Journal*, 63(11), 2025–2030.
8. Rasulov, R. Ya., Rasulov, V. R., Kodirov, N. U., & Isomaddinova, U. M. (2023). Interband one photon absorption of light and its linear-circular dichroism in crystals with coherent saturation effect included. *Physics of the Solid State*, 65(7), 1173-1179. DOI: 10.61011/PSS.2023.07.56410.77
9. Rasulov, R. Ya., Rasulov, V. R., Kuchkarov, M. Kh., & Eshboltaev, I. M. (2023). Interband multiphoton absorption of polarized radiation and its linear circular dichroism in semiconductors in the Kane approximation. *Russian Physics Journal*, 65(10). DOI: 10.1007/s11182-023-02825-3
10. Leppenen, N. V., Ivchenko, E. L., & Golub, L. E. (2022). Nonlinear optical absorption and photocurrents in topological insulators. *Phys. Rev. B*, 105, 115306. DOI: 10.1103/PhysRevB.105.115306

11. Danilov, S. N., Golub, L. E., Mayer, T., Beer, A., Binder, S., Mönch, E., Minár, J., Kronseder, M., Back, C. H., Bougeard, D., & Ganichev, S. D. (2021). Superlinear Photogalvanic Effects in $(\text{Bi}_{0.3}\text{Sb}_{0.7})_2(\text{Te}_{0.1}\text{Se}_{0.9})_3$: Probing Three-Dimensional Topological Insulator Surface States at Room Temperature. *Phys. Rev. Applied*, 15, 064030. DOI: 10.1103/PhysRevApplied.16.064030
12. Candussio, S., Golub, L. E., Bernreuter, S., Jötten, T., Rockinger, T., Watanabe, K., Taniguchi, T., Eroms, J., Weiss, D., & Ganichev, S. D. (2021). Nonlinear intensity dependence of terahertz edge photocurrents in graphene. *Phys. Rev. B*, 104, 155404. DOI: 10.1103/PhysRevB.104.155404
13. Rasulov, R. Y., Rasulov, V. R., Urinova, K. K., Mamatova, M. A., & Akhmedov, B. B. (2024). One and multiphoton optical transitions in atomically thin layers of transition metal dichalcogenides. *East European Journal of Physics*, 2024(1), 393–397. DOI: 10.26565/2312-4334-2024-1-40
14. Krishnamurthy, S., Yu, Z. G., Gonzalez, L. P., & Guha, S. (2011). Temperature-and wavelength-dependent two-photon and free-carrier absorption in GaAs, InP, GaInAs, and InAsP. *Journal of Applied Physics*, 109(3), 033102. DOI: 10.1063/1.3533775
15. Cirloganu, C. M., Padilha, L. A., Fishman, D. A., Webster, S., Hagan, D. J., & Van Stryland, E. W. (2011). Extremely nondegenerate two-photon absorption in direct-gap semiconductors. *Optics Express*, 19(23), 22951-22960. DOI: 10.1364/OE.19.022951
16. Cirloganu, C. M., Fishman, D. A., Webster, S., Padilha, L. A., Monroe, M., Hagan, D. J., & Van Stryland, E. W. (2011). Extremely Nondegenerate Two-Photon Detection of Sub-Bandgap Pulses. In *Proceedings of the International Quantum Electronics Conference and Conference on Lasers and Electro-Optics Pacific Rim 2011*. Optica Publishing Group, paper I1004. URL: <https://opg.optica.org/abstract.cfm?URI=IQEC-2011-I1004>
17. Olszak, P. D., Cirloganu, C. M., Webster, S., Padilha, L. A., Guha, S., Gonzalez, L. P., Krishnamurthy, S., Hagan, D. J., & Van Stryland, E. W. (2010). Spectral and temperature dependence of two-photon and free-carrier absorption in InSb. *Phys. Rev. B*, 82, 235207. DOI: 10.1103/PhysRevB.82.235207
18. Bir, G. L., & Pikus, G. E. (1972). *Symmetry and Strain-induced Effects in Semiconductors*. Wiley - New York. (584 p).
19. Ivchenko, E. L., & Rasulov, R. Ya. (1989). *Symmetry and real band structure of semiconductors*. Tashkent: Fan. (126 p). URL: <https://koha.lib.tsu.ru/cgi-bin/koha/opac-detail.pl?biblionumber=125752>
20. Vurgaftman, I., Meyer, J. R., & Ram-Mohan, L. R. (2001). Band parameters for III–V compound semiconductors and their alloys. *Journal of Applied Physics*, 89(11), 5815-5875. DOI: 10.1063/1.1368156
21. Parshin, D. A., & Shabaev, A. R. (1987). Theory of linear IR absorption by semiconductors with degenerate bands. *Zh. Exp. Teor. Fiz.*, 92(4), 1471-1484. URL: http://jetp.ras.ru/cgi-bin/dn/e_065_04_0827.pdf

**ОСОБЕННОСТИ СПЕКТРОВ ЛЮМИНЕСЦЕНЦИИ И МАГНИТНОЙ
ЦИРКУЛЯРНОЙ ПОЛЯРИЗАЦИИ ЛЮМИНЕСЦЕНЦИИ РЕДКОЗЕМЕЛЬНОГО ИОНА Tb³⁺
в Tb₃Ga₅O₁₂**

Рахимов Шароф Амонович,

Бухарский государственный педагогический институт.

r.sharof@mail.ru

Малышева Мария Евгениевна,

Национальный университет Узбекистана им.М.Улугбека,

mariyaevg@mail.ru

Аннотация. Исследованы спектры магнитной циркулярной поляризации люминесценции на полосе люминесценции ${}^5D_4 \rightarrow {}^7F_5$ в тербий-галлиевом гранате Tb₃Ga₅O₁₂ при температуре 80 К. Показано, что найденные симметрия волновых функций и энергии иттарковских подуровней мультиплетов 7F_5 и 5D_4 в TbGG из сопоставления спектров степени МЦПЛ и спектров люминесценции подтверждают результаты численных вычислений энергетического спектра редкоземельного иона Tb³⁺ в тербиевом галлате-гранате.

Ключевые слова: иттарковские подуровни, магнитная циркулярная поляризация люминесценции, излучательные переходы, квазидублеты.

**Tb³⁺ NODIR YER IONINING Tb₃Ga₅O₁₂ KRISTALIDAGI LYUMINESENSIYA
SPEKTRLARI VA LYUMINESENSIYANING MAGNIT AYLANMA QUTBLANISH
XUSUSIYATLARI**

Annotatsiya. Tb₃Ga₅O₁₂ terbiy-galliy granatida 80 K haroratda ${}^5D_4 \rightarrow {}^7F_5$ lyuminessensiya chizig'ida lyuminessensiyaning magnit aylana qutblanishi spektrlari o'rganildi. Ko'rsatildiki, TbGG dagi 7F_5 va 5D_4 multipletlarining Shtark ostsathlari energiyalari hamda to'liq funksiyalarining simmetriyasi MChPL darajasi spektrlari va lyuminessensiya spektrlari taqqoslanishi asosida aniqlanib, Tb³⁺ noyob yer ionining terbiy gallat-granatdagi energetik spektri bo'yicha sonli hisoblash natijalarini tasdiqlaydi.

Kalit so'zlar: shtark pastki sathlari, lyuminessensiyaning magnit aylana qutblanishi, nurlanish o'tishlari, kvazidubletlar.

**FEATURES OF THE LUMINESCENCE SPECTRA AND MAGNETIC CIRCULAR
POLARIZATION OF LUMINESCENCE OF THE RARE-EARTH ION Tb³⁺ IN Tb₃Ga₅O₁₂**

Abstract. The spectra of magnetic circular polarization of luminescence (MCPL) were studied in the ${}^5D_4 \rightarrow {}^7F_5$ luminescence band of terbium gallium garnet Tb₃Ga₅O₁₂ at a temperature of 80 K. It is shown that the determined symmetry of the wave functions and the energies of the Stark sublevels of the 7F_5 and 5D_4 multiplets in TbGG, obtained by comparing the MCPL spectra and the luminescence spectra, confirm the results of numerical calculations of the energy spectrum of the rare-earth Tb³⁺ ion in terbium gallium garnet.

Key words: Stark sublevels, magnetic circular polarization of luminescence, radiative transitions, quasi-doublets.

Введение. В настоящее время предполагается, что химически устойчивые, механически прочные и оптически однородные монокристаллы тербиевых галлатов-гранатов Tb₃Ga₅O₁₂ (TbGaG) могут быть применены для создания функциональных оптоэлектронных устройств (оптических изоляторов и модуляторов [1], высокоэффективных лазерных матриц [2], рабочих элементов устройств интегральной оптики, акустооптики и т.д.) в силу больших величин магнитооптических эффектов и малого оптического поглощения [3]. Однако их широкому практическому использованию препятствует недостаточный объем информации об особенностях основных механизмов процессов излучения в TbGaG для той или иной области оптического диапазона. Особенно это касается того, что сведения о спектроскопических свойствах и характеристиках люминесценции редкоземельных (РЗ) иона Tb³⁺ в кристаллической матрице граната, определяемых особенностями

штарковского расщепления энергетического спектра и характером симметрии волновых функций возбужденных электронных состояний данного иона в галлате-гранате, в настоящее время имеют весьма ограниченный характер. В принципе подобную информацию возможно получить из чисто оптических исследований [4], но ее интерпретация сопряжена с определенными трудностями. Одной из них является несоответствие количества линий, наблюдаемых обычно в спектрах поглощения и люминесценции некрамерсовского (с четным числом электронов в незаполненной 4f-оболочке) РЗ иона Tb^{3+} в структуре граната, а также распределения интенсивностей между линиями с теоретическими предсказаниями [5]. Это обусловлено, с одной стороны, особенностями штарковского расщепления энергетических состояний иона Tb^{3+} , при котором низкосимметричное кристаллическое поле (КП) окружения РЗ иона формирует так называемые "квазидублеты" (энергетическая "щель" $\sim 1 \text{ см}^{-1}$ [6, 7]), непосредственно неразрешаемые в оптических экспериментах. С другой - сложное поведение наблюдаемых оптических спектров может быть вызвано эффектом наложения оптических переходов, происходящих в РЗ ионах, занимающих различные кристаллографические неэквивалентные позиции (симметрии D_2), различающиеся ориентацией локальных осей симметрии [5-7] в кубической структуре граната.

В этой связи изучение магнитооптических спектров TbGaG методами магнитооптической дифференциальной спектроскопии [9], позволяющими определять симметрию и характер штарковского расщепления возбужденных электронных 4f-состояний магнитоактивных ионов, находящихся в различных кристаллографически неэквивалентных позициях структуры граната, представляет значительный интерес как с фундаментальной, так и с практической точек зрения. Поэтому целью данной работы является изучение спектров люминесценции и магнитной циркулярной поляризации люминесценции (МЦПЛ) РЗ иона Tb^{3+} в монокристаллах тербий-галлиевого граната полученных спектров.

Методика исследования. В работе исследовались монокристаллы тербий-галлиевого граната TbGaG, выращенные из раствора-расплава и рентгенографически ориентированные в кристаллографических плоскостях типа [011] и [111]. Спектры люминесценции и степени МЦПЛ TbGaG измерялись на излучательном переходе $^5D_4 \rightarrow ^7F_5$ в спектральном интервале 540-549 нм ($18220-18550 \text{ см}^{-1}$) с разрешением $\sim 2.0 \text{ см}^{-1}$ в области $\sim 18400 \text{ см}^{-1}$ при $T=80$ и 300К. Дифференциальные магнитооптические спектры исследовались при ориентации внешнего магнитного поля $H=5-7 \text{ кЭ}$ параллельно осям [011] и [111] кристалла граната. Регистрация спектров степени МЦПЛ осуществлялась методом модуляции поляризации света с помощью фотоупругого модулятора [9,10]. Относительные погрешности измеряемых величин (коэффициентов поглощения α , интенсивностей люминесценции и степеней циркулярной поляризации света) во всех экспериментах не превышали $\sim 2-3\%$.

Результаты и их обсуждение. В исследованном нами монокристалле тербий-галлиевого граната люминесценция, наблюдаемая практически на всех излучательных переходах $^5D_4 \rightarrow ^1F_J$ (где $J=6, 5, \dots, 1, 0$), оказывается наиболее интенсивной в полосе излучения, обусловленной излучательным переходом $^5D_4 \rightarrow ^7F_5$. При понижении температуры образца от 300 до 80К яркость люминесценции в данной полосе возрастает в несколько раз при одновременном сужении линий излучения. Спектр люминесценции, обусловленный излучательным переходом $^5D_4 \rightarrow ^7F_5$ в TbGaG и записанный в отсутствие внешнего поля при $T=80\text{К}$, приведен в нижней части рисунка. Сопоставление интенсивностей наблюдаемых, хорошо разрешенных линий в полосе люминесценции $^5D_4 \rightarrow ^7F_5$ при $T=80\text{К}$ с аналогичными данными, полученными при $T=300\text{К}$, показывает, что наиболее интенсивные линии люминесценции 7,8,10 и 11, по-видимому, происходят из основного состояния мультиплета 5D_4 . В то же время более слабые линии излучения 1-3 и т.д. обусловлены излучательными переходами с возбужденных подуровней мультиплета 5D_4 на штарковские подуровни мультиплета 7F_5 . При понижении температуры образца от 300 до 80К яркость люминесценции в данной полосе возрастает в несколько раз при одновременном сужении линий излучения. Спектр люминесценции, обусловленный излучательным переходом $^5D_4 \rightarrow ^7F_5$ в TbGaG и записанный в отсутствие внешнего поля при $T=80\text{К}$, приведен в нижней части рисунка. Сопоставление интенсивностей наблюдаемых, хорошо разрешенных линий в полосе люминесценции $^5D_4 \rightarrow ^7F_5$ при $T=80\text{К}$ с аналогичными данными, полученными при $T=300\text{К}$, показывает, что наиболее интенсивные линии люминесценции 7,8,10 и 11, по-видимому, происходят из основного состояния мультиплета 5D_4 . В то же время более слабые линии излучения 1-3 и т.д. обусловлены излучательными переходами с возбужденных подуровней мультиплета 5D_4 на штарковские подуровни мультиплета 7F_5 . Спектр степени МЦПЛ тербий-галлиевого граната, записанный при

$T=80\text{K}$ на излучательном переходе ${}^5\text{D}_4 \rightarrow {}^7\text{F}_5$, показан в верхней части рисунка. Сопоставление спектров степени МЦПЛ и люминесценции (флуоресценции) показывает, что несмотря на сложную структуру наблюдаемого спектра степени МЦПЛ, на некоторых линиях вторичного свечения дисперсия степени МЦПЛ может быть объяснена достаточно простым образом. Например, на линиях люминесценции 9,13-16 спектральные зависимости степени МЦПЛ могут быть аппроксимированы наклонными линейными зависимостями в пределах линии излучения (со сменой знака эффекта в ее центре). В отличие от них на близкорасположенных линиях излучения 7,8 экстремумы спектральной зависимости МЦПЛ совпадают с максимумами данных линий, причем при понижении температуры до $T=80\text{K}$ степень МЦПЛ достигает значения $\sim 20\%$ на линии 8 во внешнем поле $H=7\text{кЭ}$. При этом величина степени МЦПЛ, измеренная на других линиях люминесценции, либо оказывается существенно меньшей (линии 2,3,5, 9 и 75), либо наблюдаемый эффект имеет сложный спектральный ход (линии 13,14,17,18).

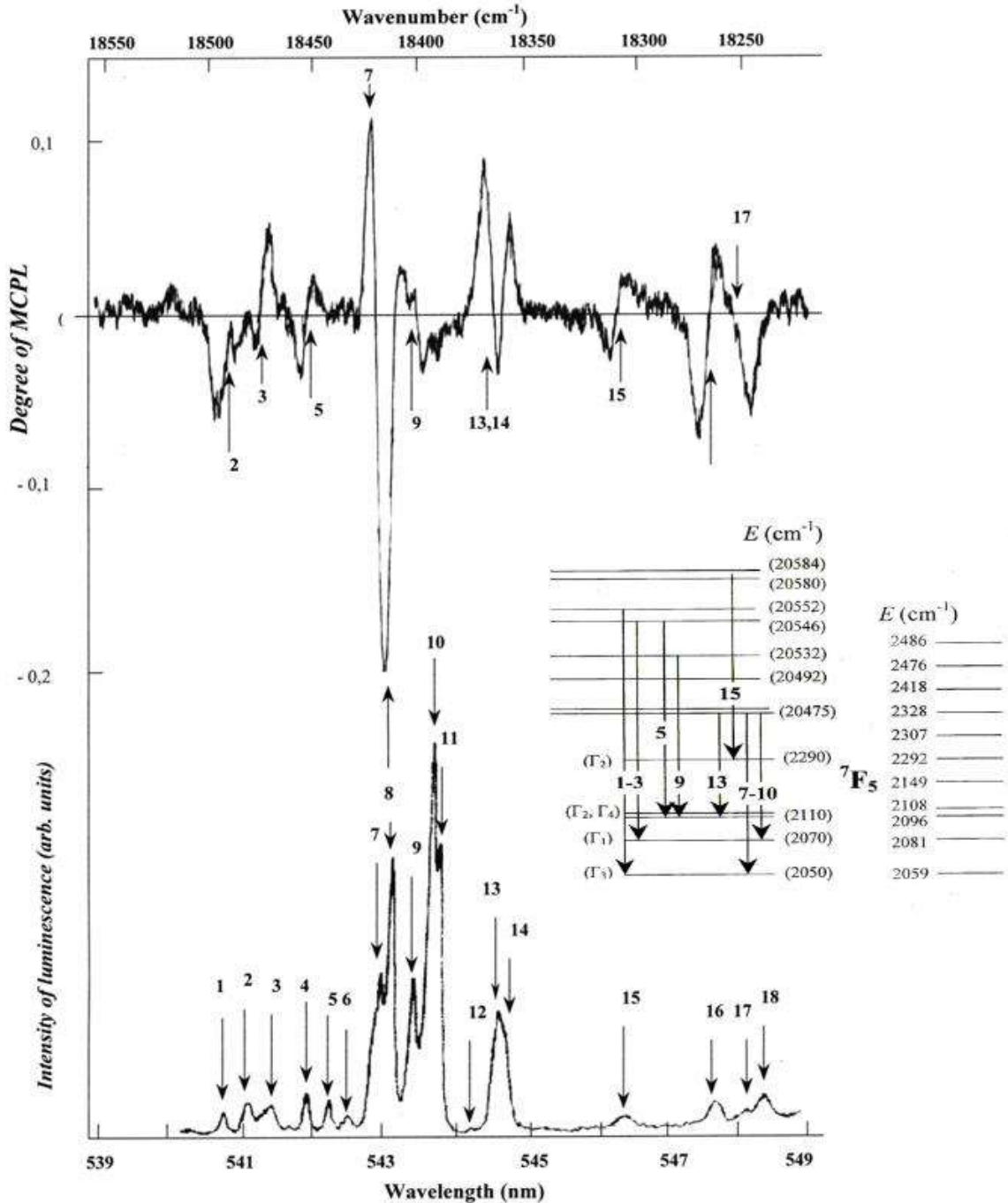


Рис. В верхней части рисунка приводится спектр степени МЦПЛ, записанный в полосе излучения ${}^5\text{D}_4 \rightarrow {}^7\text{F}_5$ в TbGaG при $T=80\text{K}$ во внешнем магнитном поле $H=7\text{кЭ}$, параллельном

кристаллографическому направлению [111] кристалла. Схемы оптических переходов между компонентами штарковского расщепления энергетических спектров 5D_4 и 7F_5 мультиплетов РЗ-иона Tb^{3+} в TbGG. На правой стороне рисунка приведены данные численных расчетов энергетического спектра и волновых функций штарковских подуровней мультиплета 7F_5 ; энергии и индексы неприводимых представлений Γ_i некоторых штарковских подуровней 7F_5 , найденные экспериментально, даны в круглых скобках.

В выполненном исследовании проведено детальное сопоставление экспериментальных данных о поведении в магнитных полях циркулярно-поляризованных спектров люминесценции (МЦПЛ) с оптическими спектрами при температуре $T=80K$. На рис. приведена также схема излучательных $4f \rightarrow 4f$ переходов между штарковскими подуровнями мультиплетов 5D_4 и 7F_5 , из которой видно, что линии излучения 1 – 3, обусловлены переходами с возбужденных штарковских подуровней мультиплета 5D_4 - подуровней квазидублета (Γ_2, Γ_1) с энергиями $\sim 2050 \text{ см}^{-1}$ и $\sim 2070 \text{ см}^{-1}$, соответственно. Кроме того, излучательными переходами с подуровней основного квазидублета (Γ_2, Γ_4) мультиплета 5D_4 на эти же синглеты, можно объяснить возникновение интенсивных линий люминесценции 7, 8, 10 и 11. В то же время, излучательные переходы со штарковских подуровней квазидублета (Γ_2, Γ_1) и синглета Γ_3 (при энергии $\approx 20530 \text{ см}^{-1}$) мультиплета 5D_4 на вышележащие подуровни мультиплета 7F_5 с энергией $\sim 2110 \text{ см}^{-1}$ формируют линии излучения 5 и 9. Анализ спектра МЦПЛ позволяет также в принципе получить дополнительную информацию о симметрии штарковских подуровней мультиплетов 5D_4 и 7F_5 , комбинирующих в излучательных $4f \rightarrow 4f$ переходах, в случае, если симметрия одного из состояний предполагается известной [8]. Действительно, возникновение A' -членов(диамагнитных членов) степени МЦПЛ на линиях излучения 9, 13 и 14, обусловлено наличием квазидублета (Γ_2, Γ_4) в спектре мультиплета 7F_5 при энергии $\sim 2110 \text{ см}^{-1}$. Согласно правилам отбора, симметрия состояний квазидублета (Γ_2, Γ_4) в мультиплете 7F_5 , задается симметрией комбинирующих в излучательных переходах типа «изолированный синглет \rightarrow квазидублет» штарковских подуровней Γ_1 и Γ_3 мультиплета 5D_4 , найденных из численных вычислений энергетического спектра иона Tb^{3+} в галлате-гранате тербия. Правилам отбора также удовлетворяет наблюдаемая на линии излучения 15 небольшая «диамагнитная» особенность спектра степени МЦПЛ, которая в согласии с ними идентифицируется на рис.1 с излучательным переходом «квазидублет \rightarrow изолированный синглет» из квазидублетных состояний (Γ_3, Γ_4) мультиплета 5D_4 при энергии $\sim 20580 \text{ см}^{-1}$ на штарковский синглет Γ_2 с энергией $\sim 2290 \text{ см}^{-1}$. Обращает на себя внимание малая величина A' -члена(диамагнитного члена) на этой линии излучения, свидетельствующая о незначительном вкладе в магнитную оптическую активность тербий-галлиевого граната зеемановского расщепления подуровней возбужденного квазидублета (Γ_3, Γ_4) мультиплета 5D_4 .

Выводы. Таким образом, детальное рассмотрение магнитооптических спектров МЦПЛ и сопоставление экспериментальных данных о поведении в магнитных полях циркулярно-поляризованных спектров люминесценции – МЦПЛ с оптическими спектрами при низких температурах выполненное в тербий-галлиевом гранате TbGG, а также, проведенное с использованием правил отбора и данных численных расчетов энергетического спектра мультиплетов 5D_4 и 7F_5 $4f^{81}$ -конфигурации РЗ-иона Tb^{3+} в структуре галлата-граната отождествление оптических переходов, позволило найти симметрию состояний ряда штарковских подуровней данных мультиплетов, причем, в большинстве случаев, симметрия комбинирующих в оптических переходах состояний была установлена однозначно.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Zvezdin A.K., Kotov A.V. *Modern Magneto-optics and Magneto-optical Materials. Bristol and Philadelphia: IOP Publishing, 1997. 386 p.*
2. Kaminskii A.A., Eichler H.J., Reiche P., Uecker R. // *Las. Phys. Lett.* 2005. V. 2. № 10. P. 489-492.
3. Mukimov K.M., Sokolov B.Yu., Valiev U.V. // *Phys. Stat. Sol. (a)*. 1990. V. 119. P. 307-315.
4. Joshi B.D, Page A.G. // *J. Luminesc.* 1977. V. 15. P. 2934.
5. Kambara T., Haas W.J., Spedding F.H., Good R.H. // *J. Chem. Phys.* 1973. V. 58. № 2. P. 672-686.
6. Плусе В.Н., Понов АМ. // *ФТТ.* 2004. Т. 46. № 12. С. 2155-2157.

PHYSICS

7. Колмакова Н.П., Копчик С.В., Кринчик Г.С, Орлов В.Н., Саранцев А.Я. // ФТТ. 1990. Т. 332. В. 5. С. 1406-1411
8. Валиев У.В., Gruber J.B., Sardar D.K.: Мухаммадиев А.К., Рахимов Ш.А., В.Ю.Соколов. Особенности магнитооптических спектров в $Tb_3Ga_5O_{12}$ // *Опт. и Спектр.* - 2007. - Т.102. - № 6. - с. 988-995.
9. Richardson F.S., Riehl J.P. // *Chem. Rev.* 1977. V. 77. № 6. P. 773-792.
10. Badoz J., Billardon M., Canit J.C., Russel J. // *J. Opt. (Paris)*. 1977. V. 8. № 6. P. 373-384.

МЕЖЗОННОЕ ДВУХФОТОННОЕ ПОГЛОЩЕНИЕ ПОЛЯРИЗОВАННОГО СВЕТА В ШИРКО- И УЗКОЗОННЫХ ПОЛУПРОВОДНИКАХ

Расулов Рустам Явкачович,

Профессор кафедры Физика Ферганского государственного университета, д.ф.-м.н.

Муминов Ислом Араббоевич,

Доцент кафедры Физика Ферганского государственного университета, PhD.

Толипов Жасурбек Рашианжон угли,

Докторант кафедры Физика Ферганского государственного университета.

Мухаммадаминов Сохибжон Хабибулло огли,

Докторант кафедры Физика Ферганского государственного университета.

r_rasulov51@mail.ru

Аннотация. Показано, что основной вклад в коэффициент двухфотонного поглощения в узкозонных полупроводниках вносят оптические переходы, протекающие из подзоны легких дырок в зону проводимости.

Анализируются зависимости парциальных коэффициентов межзонного двухфотонного поглощения света, отличающиеся друг от друга виртуальными состояниями оптических переходов, в зависимости от степени поляризации света. Проведен количественный анализ спектральной зависимости коэффициента двухфотонного поглощения света, обусловленного оптическими переходами между валентной зоной и зоны проводимости. Получены выражения для спектральной зависимости коэффициента межзонного двухфотонного поглощения света в широко- и узкозонного полупроводника в многозонном приближении.

Ключевые слова: носители тока, виртуальное состояния, двухфотонное поглощения света, подзоны валентной зоны, зона проводимости, многозонное приближение, оптический переход, широко- и узкозонный полупроводник.

KENG VA TOR ZONALI YARIMO‘TKAZGICHLARDA QUTBLANGAN YORUG‘LIKNING MINTAQALARARO IKKI FOTONLI YUTILISHI

Annotatsiya. Tor zonal yarim o‘tkazgichlarda yorug‘likning ikki fotonli yutilish koeffitsiyentiga, asosan hissa yorug‘likning yengil kavaklar tarmog‘ida o‘tkazuvchanlik zonasiga optik o‘tishlardan berishi. Bir-biridan optik o‘tishlarning virtual holatlari bilan ajralib turadigan yorug‘likning ikki fotonli zonalarda qismiy yutilishini koeffitsientlarining spektral va temperaturaviy bog‘liqligi yorug‘lik qutblanish darajasiga qarab tahlil qilinadi. Valent va o‘tkazuvchanlik zonalari orasidagi optik o‘tishlar tufayli ikki fotonli yutilish koeffitsienti spektral bog‘liqligining miqdoriy tahlili amalga oshirildi. Ko‘p zonal yuqinlashuvda keng va tor zonal yarimo‘tkazgichda zonalarda ikki fotonli yutilish koeffitsientining spektral bog‘lanishi hisoblan.

Kalit so‘zlar: tok tashuvchilar, virtual holatlar, yorug‘likning ikki fotonli yutilishi, valent zonasining tarmoqlari, o‘tkazuvchanlik zonalari, ko‘p zonal yuqinlashuv, optik o‘tish, keng va tor zonal yarimo‘tkazgich.

INTERBAND TWO-PHOTON ABSORPTION OF POLARIZED LIGHT IN WIDE- AND NARROW-BANDGAP SEMICONDUCTORS

Abstract. It is shown that the main contribution to two-photon linear-circular dichroism in narrow-gap semiconductors comes from optical transitions from the light-hole subband to the conduction band.

The dependences of the partial coefficients of interband two-photon absorption of light, distinguished from each other by the virtual states of optical transitions, are analyzed as functions of the degree of light polarization. A quantitative analysis of the spectral dependence of the two-photon absorption coefficient due to optical transitions between the valence and conduction bands is performed. Expressions are derived for the spectral dependence of the interband two-photon absorption coefficient in wide-gap and narrow-gap semiconductors in the multiband approximation.

Keywords: current carriers, virtual states, two-photon absorption of light, valence band subbands, conduction band, multiband approximation, optical transition, wide-band and narrow-band semiconductor.

Введение. Нелинейное поглощение поляризованного света, обусловленное оптическими переходами (ОП) между подзонами легких и тяжелых дырок валентной зоной полупроводника, и его линейно-циркулярный дихроизм рассмотрено в работах [1-11].

Нелинейное многофотонное поглощение света в полупроводнике со сложной валентной зоной, обусловленное прямыми оптическими переходами между подзонами тяжелых и легких дырок и зависящее от степени поляризации света исследовано в [1-6]. В этих работах считается, что нелинейность в зависимости коэффициента однофотонного поглощения от интенсивности возникает за счет резонансного насыщения поглощения. Это насыщение обусловлено фотоиндуцированным изменением функций распределения легких и тяжелых дырок в области импульсного пространства вблизи поверхности $E_{hh}(\mathbf{k}) - E_{hl}(\mathbf{k}) - \hbar\omega = 0$, соответствующей условию резонанса. Здесь $E_{hh}(\mathbf{k}) (E_{hl}(\mathbf{k}))$ - энергетический спектр тяжелых (легких) дырок, ω - частота света. В [7, 8] исследован многофотонный линейно-циркулярный дихроизм (ЛЦД) в p-Ge в режиме развитой нелинейности, когда в поглощение вносят сопоставимый вклад n -фотонные процессы с $n = (1 \text{ ÷ } 5)$. В [6] исследован четырехфотонный процесс в полупроводниках, обусловленные оптическими переходами между подзонами валентной зоны.

Однако вопрос о ЛЦД межзонного двухфотонного поглощения света (ДФПС), а также о спектральной и температурной зависимостях коэффициента ДФПС в узкозонных полупроводниках в модели Кейна остается открытым, к чему посвящена данная работа.

Коэффициент межзонного двухфотонного поглощения света и его линейно-циркулярный дихроизм

В этом разделе получим выражение для спектральной зависимости коэффициента межзонного ДФПС света в узкозонных полупроводниках в модели Кейна. В дальнейших расчетах используем метод расчета, предложенного в [5-11].

Отметим, что коэффициент многофотонного поглощения света состоит из парциальных составляющих, которые по своей природе зависят от того, в какой зоне находятся носители тока как в исходном, так и в виртуальном состоянии.

В дальнейших (промежуточных) расчетах вместо $\sum_k (f_L - f_{cond}) \delta(E_{cond} - E_L - 2\hbar\omega) F(k)$ используем выражение $\frac{1}{(2\pi)^3} F(k_{c,L}) k_{c,L}^2$, где $k_{c,L}$ - волновой вектор, определяемый из закона сохранения энергии: $E_c - E_L - 2\hbar\omega = 0$. В частности, в сферическом приближении в энергетическом спектре носителей тока, т.е. в случае $E_L = E_L^{(0)} + \frac{\hbar^2 k^2}{2m_L}$, волновой вектор носителей тока, участвующих в межзонных ОП, определяется как $k_{c,L}^2 = \frac{2\mu_+^{(c,L)}}{\hbar^2} (2\hbar\omega - E_g)$, где $\mu_+^{(c, lh)} = \frac{m_c m_L}{m_c + m_L}$ - приведенная эффективная масса, m_L - эффективная масса носителей тока в зоне (или подзоне) с номером L . В частности для $L=c$ для зоны проводимости, тогда $E_L^{(0)} = E_g$, $L=lh$ для подзоны легких (тяжелых) дырок валентной зоны, тогда $E_L^{(0)} = 0$.

Отметим, что частотная зависимость знаменателей в матричных элементах определяется законом сохранения энергии, типом рассматриваемых ОП и виртуальных состояний. Например, если виртуальные состояния находятся в валентной зоне, а исходное - в подзоне тяжелых дырок, тогда знаменатель в матричном элементе данного перехода определяется выражением

$$E_{hh} - E_{lh} - \hbar\omega = \frac{m_c}{m_{hh}} \frac{m_{hh} - m_{lh}}{m_c + m_{lh}} (2\hbar\omega - E_g) + \hbar\omega$$
, если этот переход происходит из подзоны легких дырок, тогда знаменатель в матричном элементе данного перехода определяется

как $E_{lh} - E_{hh} - \hbar\omega = \frac{m_c}{m_{lh}} \frac{m_{hh} - m_{lh}}{m_{hh} + m_c} (2\hbar\omega - E_g)$, где учтены соотношения:

$$A - B = \frac{\hbar^2}{2m_{hh}}, \quad A + B = \frac{\hbar^2}{2m_{lh}}.$$

В дальнейшем рассчитаем парциальные коэффициенты двухфотонного поглощения, отличающие друг от друга от типов ОП, т.е. от начального, промежуточного и виртуального состояний:

а) исходное состояние находится в подзоне тяжелых дырок валентной зоны. В этом случае коэффициент между зонного двухфотонного поглощения света определяется выражением

$$K_{C,\pm 1/2;V,\pm 3/2}^{(2)} = \frac{2\pi}{\hbar} 2\hbar\omega \frac{1}{I} \Xi_{C,hh}^{(2)} \left(\frac{eA_0}{c\hbar} \right)^2 P_{cv}^2 k^2 \times$$

$$\times \left\langle \left\langle \frac{\left| \frac{2(A-B)e'_+ e'_{z'}}{(-\hbar\omega)} + \frac{e'_- B}{(E_{lh} - E_{hh} - \hbar\omega)} \right|^2}{\sqrt{1 + 4 \frac{\alpha_\omega}{\hbar^2 \omega^2} \left[\left(\frac{eA_0}{c\hbar} \right)^2 P_{cv} k \right]^2} \left| \frac{2(A-B)e'_+ e'_{z'}}{(-\hbar\omega)} + \frac{e'_- B}{(E_{lh} - E_{hh} - \hbar\omega)} \right|^2}} \right\rangle \right\rangle +$$

$$+ \left\langle \left\langle \frac{\left| \sqrt{2}B \frac{e'_z e'_-}{(E_{lh} - E_{hh} - \hbar\omega)} \right|^2}{\sqrt{1 + 4 \frac{\alpha_\omega}{\hbar^2 \omega^2} \left[\left(\frac{eA_0}{c\hbar} \right)^2 P_{cv} k \right]^2} \left| \sqrt{2}B \frac{e'_z e'_-}{(E_{lh} - E_{hh} - \hbar\omega)} \right|^2}} \right\rangle \right\rangle, \quad (1)$$

или

$$K_{C,\pm 1/2;V,\pm 3/2}^{(2)} = \frac{8\pi^2}{\hbar} \hbar\omega \frac{1}{I} \left(\mu_+^{(c,hh)} \right)^{3/2} \sqrt{2} \sqrt{2\hbar\omega - E_g} f_{hh} \left[\frac{m_c}{m_c + m_{hh}} (2\hbar\omega - E_g) \right] \left[\left(\frac{eA_0}{c\hbar} \right)^2 P_{cv} k \right]^2 \mathfrak{R}_{C,\pm 1/2;V,\pm 3/2}^{(2)}, \quad (2)$$

здесь $\Xi_{C,L}^{(2)} = \sum_{\vec{k}} (f_L - f_{cond}) \delta(E_{cond} - E_L - 2\hbar\omega)$, P_{cv} - параметр Кейна [12, 13], $e'_\pm = e'_x \pm ie'_y$ и

здесь (и в дальнейшем) считали, что $Oz \parallel \vec{k}$, символ $\langle \dots \rangle$ означает усреднение по телесным углам волнового вектора носителей тока,

$$\mathfrak{R}_{C,\pm 1/2;V,\pm 3/2}^{(2)} = \frac{1}{4\pi} \left\langle \left\langle \frac{\left| \frac{2(A-B)e'_+ e'_{z'}}{(-\hbar\omega)} + \frac{e'_- B}{(E_{lh} - E_{hh} - \hbar\omega)} \right|^2}{\left| \sqrt{2}B \frac{e'_z e'_-}{(E_{lh} - E_{hh} - \hbar\omega)} \right|^2} \right\rangle \right\rangle =$$

$$= \frac{B^2}{15(\hbar\omega)^2} \left[\left(2 \frac{A-B}{B} \right)^2 a_{C,\pm 1/2;V,\pm 3/2}^{(2)} + \left(\frac{\hbar\omega}{E_{lh} - E_{hh} - \hbar\omega} \right)^2 b_{C,\pm 1/2;V,\pm 3/2}^{(2)} \right], \quad (3)$$

которое в сферическом приближении в энергетическом спектре носителей тока принимает вид

$$\mathfrak{R}_{C,\pm 1/2;V,\pm 3/2}^{(2, sfer)} = \frac{B^2}{15(\hbar\omega)^2} \left[\frac{16m_{lh}^2}{(m_{hh} - m_{lh})^2} a_{C,\pm 1/2;V,\pm 3/2}^{(2)} + \left(\frac{\hbar\omega(m_{hh} + m_c)m_{lh}}{m_c(m_{hh} - m_{lh})(2\hbar\omega - E_g) - \hbar\omega} \right)^2 b_{C,\pm 1/2;V,\pm 3/2}^{(2)} \right] \quad (4)$$

где для линейно(циркулярно) - поляризованного света $a_{C,\pm 1/2;V,\pm 3/2}^{(2)} = 2$ ($a_{C,\pm 1/2;V,\pm 3/2}^{(2)} = 9$), $b_{C,\pm 1/2;V,\pm 3/2}^{(2)} = 3$ ($b_{C,\pm 1/2;V,\pm 3/2}^{(2)} = 13$), $b_{C,\pm 1/2;V,\pm 3/2}^{(2)} = 3$ ($b_{C,\pm 1/2;V,\pm 3/2}^{(2)} = 13$). В этом случае коэффициент ЛЦД для этих ОП зависит от частоты света и зонных параметров;

б) если исходное состояние находится в подзоне легких дырок, тогда получим

$$K_{C,\pm 1/2;V,\pm 1/2}^{(2)} = \frac{2\pi}{\hbar} 2\hbar\omega \frac{1}{I} \Xi_{c,lh}^{(2)} \left(\frac{eA_0}{c\hbar} \right)^4 \frac{P_{cV}^2 k^2}{3} \times \left(\left\langle \frac{\left| \frac{3Be_+'^2}{(E_{hh} - E_{lh} - \hbar\omega)} + 2 \frac{(A+B)e'_z e'_z}{(-\hbar\omega)} \right|^2}{\sqrt{1 + 4 \frac{\alpha_\omega}{\hbar^2 \omega^2} \left[\left(\frac{eA_0}{c\hbar} \right)^2 \frac{P_{cV} k}{\sqrt{3}} \right]^2} \left| \frac{3Be_+'^2}{(E_{hh} - E_{lh} - \hbar\omega)} + 2 \frac{(A+B)e'_z e'_z}{(-\hbar\omega)} \right|^2} \right\rangle + \left\langle \frac{\left| 2\sqrt{2}(A+B) \frac{e_z'^2}{(-\hbar\omega)} \right|^2}{\sqrt{1 + 4 \frac{\alpha_\omega}{\hbar^2 \omega^2} \left[\left(\frac{eA_0}{c\hbar} \right)^2 \frac{pk}{\sqrt{3}} \right]^2} \left| 2\sqrt{2}(A+B) \frac{e_z'^2}{(-\hbar\omega)} \right|^2} \right\rangle \right), \quad (5)$$

или

$$K_{C,\pm 1/2;V,\pm 1/2}^{(2)} = \frac{32\pi^2}{\hbar} \hbar\omega \frac{1}{I} \Xi_{c,lh} \left(\frac{eA_0}{c\hbar} \right)^2 \frac{P_{cV}^2 k^2}{3} \mathfrak{R}_{C,\pm 1/2;V,\pm 1/2}^{(2)}, \quad (6)$$

здесь

$$\mathfrak{R}_{C,\pm 1/2;V,\pm 1/2}^{(2)} = \frac{1}{4\pi} \left(\left\langle \left| \frac{3Be_+'^2}{(E_{hh} - E_{lh} - \hbar\omega)} + 2 \frac{(A+B)e'_z e'_z}{(-\hbar\omega)} \right|^2 \right\rangle + \left\langle \left| 2\sqrt{2}(A+B) \frac{e_z'^2}{(-\hbar\omega)} \right|^2 \right\rangle \right) = \frac{B^2}{15(\hbar\omega)^2} \left[4 \left(\frac{A+B}{B} \right)^2 + \left(\frac{3\hbar\omega}{E_{hh} - E_{lh} - \hbar\omega} \right)^2 \right] a_{C,\pm 1/2;V,\pm 1/2}^{(2)}, \quad (7)$$

которое в сферическом приближении в энергетическом спектре носителей тока принимает вид

$$\mathfrak{R}_{C,\pm 1/2;V,\pm 1/2}^{(2,sfer)} = \frac{\hbar^4 (m_{hh} - m_{lh})^2}{15(4\hbar\omega m_{hh} m_{lh})^2} \left[4 \left(\frac{2m_{hh}}{m_{hh} - m_{lh}} \right)^2 + \left(\frac{3\hbar\omega}{\frac{m_c}{m_{hh}} \frac{m_{hh} - m_{lh}}{m_c + m_{lh}} (2\hbar\omega - E_g) + \hbar\omega} \right)^2 \right] a_{C,\pm 1/2;V,\pm 1/2}^{(2)}, \quad (8)$$

где для линейно(циркулярно) - поляризованного света $a_{C,\pm 1/2;V,\pm 1/2}^{(2)} = 8$ ($a_{C,\pm 1/2;V,\pm 1/2}^{(2)} = 7$), коэффициент ЛЦД для этих ОП не зависит от частоты света и равен 8/7.

Пусть теперь виртуальные состояния носителей тока находятся в зоне проводимости. Тогда:

а) если исходное состояние находится в подзоне тяжелых дырок валентной зоны, тогда:

$$K_{C,\pm 1/2;V,\pm 3/2}^{(2)} = \frac{2\pi}{\hbar} 2\hbar\omega \frac{1}{I} \Xi_{c,hh} \left(\frac{eA_0}{c\hbar} \right)^4 \left(\frac{P_{cV} k \hbar^2}{\hbar\omega m_c} \right)^2 \left\langle \frac{|e'_z e'_z|^2}{\sqrt{1 + 4 \frac{\alpha_\omega}{\hbar^2 \omega^2} \left[\left(\frac{eA_0}{c\hbar} \right)^2 \frac{P_{cV} k \hbar^2}{\hbar\omega m_c} \right]^2} |e'_z e'_z|^2} \right\rangle, \quad (9)$$

из которого без учета вклада эффекта когерентного насыщения в $K_{C,\pm 1/2;V,\pm 3/2}^{(2)}$ имеем

$$K_{C,\pm 1/2;V,\pm 3/2}^{(2)} = \frac{2\pi}{\hbar} 2\hbar\omega \frac{1}{I} \Xi_{c,hh} \left(\frac{eA_0}{c\hbar} \right)^4 \left(\frac{P_{cV} k \hbar^2}{\hbar\omega m_c} \right)^2 \frac{1}{15} a_{C,\pm 1/2;V,\pm 3/2}^{(2)}, \quad (10)$$

где для линейно(циркулярно) - поляризованного света $a_{C,\pm 1/2;V,\pm 3/2}^{(2)} = 2$ ($a_{C,\pm 1/2;V,\pm 3/2}^{(2)} = 3$), коэффициент ЛЦД для этих ОП постоянен и равен 2/3;

б) если исходное состояние находится в подзоне легких дырок валентной зоны, тогда

$$K_{C,\pm 1/2;V,\pm 1/2}^{(2)} = \frac{2\pi}{\hbar} 2\hbar\omega \frac{1}{I} \Xi_{c,1h} \left(\frac{eA_0}{c\hbar} \right)^4 \left(\frac{P_{cv}k}{\hbar\omega} \frac{\hbar^2}{m_c} \right)^2 \mathfrak{S}_{C,\pm 1/2;V,\pm 1/2}^{(2)}, \quad (11)$$

$$\mathfrak{S}_{C,\pm 1/2;V,\pm 1/2}^{(2)} = \left\langle \frac{|e'_z e'_+|^2}{\sqrt{1 + 4 \frac{\alpha_\omega}{\hbar^2 \omega^2} \left[\frac{1}{\sqrt{3}} \left(\frac{eA_0}{c\hbar} \right)^2 \frac{1}{\hbar\omega} \frac{\hbar^2}{m_c} P_{cv}k \right]^2 |e'_z e'_+|^2}} \right\rangle + \left\langle \frac{|\sqrt{2}e'_z|^2}{\sqrt{1 + 4 \frac{\alpha_\omega}{\hbar^2 \omega^2} \left[\frac{1}{\sqrt{3}} \left(\frac{eA_0}{c\hbar} \right)^2 \frac{1}{\hbar\omega} \frac{\hbar^2}{m_c} P_{cv}k \right]^2 |\sqrt{2}e'_z|^2}} \right\rangle, \quad (12)$$

из которого без учета вклада эффекта когерентного насыщения в $K_{C,\pm 1/2;V,\pm 1/2}^{(2)}$ получим, что для света с линейной (циркулярный) поляризацией $\mathfrak{S}_{C,\pm 1/2;V,\pm 1/2}^{(2)} = 8/15$ ($\mathfrak{S}_{C,\pm 1/2;V,\pm 1/2}^{(2)} = 7/15$), а коэффициент ЛЦД равен 7/8.

Пусть теперь виртуальные состояния носителей тока находятся в спин-орбитальной протяженной зоне:

а) если исходное состояние находится в подзоне тяжелых дырок валентной зоны, тогда получим, что

$$K_{C,\pm 1/2;V,\pm 3/2}^{(2)} = \frac{2\pi}{\hbar} 2\hbar\omega \frac{1}{I} \Xi_{c,hh} \left[\left(\frac{eA_0}{c\hbar} \right)^2 \frac{1}{\sqrt{2}} \frac{BkP_{cv}}{(E_\Delta - E_{hh} - \hbar\omega)} \right]^2 \Phi_{C,\pm 1/2;V,\pm 3/2}^{(2)}, \quad (13)$$

здесь

$$\Phi_{C,\pm 1/2;V,\pm 3/2}^{(2)} = \left\langle \frac{|e'_z e'_-|^2}{\sqrt{1 + 4 \frac{\alpha_\omega}{\hbar^2 \omega^2} \left[\left(\frac{eA_0}{c\hbar} \right)^2 \frac{1}{\sqrt{2}} \frac{BkP_{cv}}{(E_\Delta - E_{hh} - \hbar\omega)} \right]^2 |e'_z e'_-|^2}} \right\rangle + \left\langle \frac{|e'_\perp|^2}{\sqrt{1 + 4 \frac{\alpha_\omega}{\hbar^2 \omega^2} \left[\left(\frac{eA_0}{c\hbar} \right)^2 \frac{1}{\sqrt{2}} \frac{BkP_{cv}}{(E_\Delta - E_{hh} - \hbar\omega)} \right]^2 |e'_\perp|^2}} \right\rangle, \quad (14)$$

из которого без учета вклада эффекта когерентного насыщения в $K_{C,\pm 1/2;V,\pm 3/2}^{(2)}$ получим, что для света с линейной (циркулярный) поляризацией коэффициент ЛЦД равен 2/3;

б) если исходное состояние находится в подзоне легких дырок валентной зоны, тогда коэффициент двухфотонного поглощения поляризованного света определяется как

$$K_{C,\pm 1/2;V,\pm 1/2}^{(2)} = \frac{2\pi}{\hbar} 2\hbar\omega \frac{1}{I} \Xi_{c,1h} \times \left[\left(\frac{eA_0}{c\hbar} \right)^2 \frac{1}{\sqrt{6}} \frac{BkP_{cv}}{(E_\Delta - E_{hh} - \hbar\omega)} \right]^2 \Phi_{C,\pm 1/2;V,\pm 1/2}^{(2)}, \quad (15)$$

$$\Phi_{C,\pm 1/2;V,\pm 1/2}^{(2)} = \left\langle \frac{|3e_{\pm}'^2 + 4e_z'^2|^2}{\sqrt{1 + 4 \frac{\alpha_{\omega}}{\hbar^2 \omega^2} \left[\left(\frac{eA_0}{c\hbar} \right)^2 \frac{1}{\sqrt{6}} \frac{BkP_{cV}}{(E_{\Delta} - E_{hh} - \hbar\omega)} \right]^2}} |3e_{\pm}'^2 + 4e_z'^2|^2} \right\rangle + \left\langle \frac{|e_z'e_+'|^2}{\sqrt{1 + 4 \frac{\alpha_{\omega}}{\hbar^2 \omega^2} \left[\frac{1}{\sqrt{3}} \left(\frac{eA_0}{c\hbar} \right)^2 \frac{1}{\hbar\omega} \frac{\hbar^2}{m_c} P_{cV}k \right]^2}} |e_z'e_+'|^2} \right\rangle, \quad (16)$$

из которого без учета вклада эффекта когерентного насыщения в $K_{C,\pm 1/2;V,\pm 1/2}^{(2)}$ получим, что для света с линейной (циркулярной) поляризацией коэффициент ЛЦД равен 3/2.

Отметим, что суммарный коэффициент ДФПС ($K_{c,V}^{(2)}$) определяется суммой вышеперечисленных парциальных коэффициентов ДФПС.

Таким образом, основной вклад в ЛЦД ДФПС вносят ОП, протекающие из подзоны легких дырок в зону проводимости.

Далее вычислим спектральную зависимость суммарного коэффициента ДФПС в модели Кейна и будем использовать следующие выражения для энергетических спектров носителей тока в параболическом приближении

$$E_c(\vec{k}) = E_g + \frac{\hbar^2 k^2}{2m_0} + \frac{k^2 P_{cV}^2 \left(E_g + \frac{2}{3} \Delta \right)}{E_g (E_g + \Delta)}, \quad E_{hh}(\vec{k}) = \frac{\hbar^2 k^2}{2m_0}, \quad E_{lh}(\vec{k}) = \frac{\hbar^2 k^2}{2m_0} - \frac{2k^2 P_{cV}^2}{3E_g},$$

$$E_{so}(\vec{k}) = -\Delta + \frac{\hbar^2 k^2}{2m_0} - \frac{k^2 P_{cV}^2}{3(\Delta + E_g)}, \quad (17)$$

Здесь, $E_g(\Delta)$ - ширина запрещенной (спин-орбитальной) зоны, P_{cV} - параметр Кейна [12, 13]. Тогда спектральная зависимость коэффициента двухфотонного поглощения линейно поляризованного света в области малых значений волнового вектора носителей тока запишется как

$$K_{c,V}^{(2)}(\omega) = K_{c,V}^{(0)} \mathfrak{F}_{c,V}^{(2,l)} \left(\frac{2\hbar\omega}{E_g} \right), \quad (18)$$

здесь $K_{c,V}^{(0)} = \frac{4\pi e^2 P_{cV}}{\hbar c^2 n_{\omega}^2 E_g^3}$, $E_g \ll E_{so}$ для случая $l=1$, $E_g \gg E_{so}$ для случая $l=2$,

$$\mathfrak{F}_{c,V}^{(2,1)}(\xi) = \frac{4\xi^{3/2}}{15\sqrt{6}(\xi+1)^3} \left[480 \frac{(\xi+1)^{1/2}}{(3\xi+1)^2} + \frac{(\xi+2)^{3/2}}{(\xi+1)^5} (9(\xi+1)^4 + 40(\xi+1)^2 + 96) \right], \quad (19)$$

$$\mathfrak{F}_{c,V}^{(2,2)}(\xi) = \frac{32\xi^{3/2}}{15(\xi+1)^3} \left\{ 36 \frac{(\xi+1)^{1/2}}{(3\xi+1)^2} + \frac{(\xi+2)^{3/2}}{(\xi+1)^5} ((\xi+1)^4 + 2(\xi+1)^2 + 6) \right\}, \quad (20)$$

$\xi = (2 \cdot \hbar\omega - E_g) / E_g$. На рис. 1 и 2 представлена зависимость $K_{c,V}^{(2)}(\omega)$ для InSb в двух случаях: $E_g \ll E_{so}$ и $E_g \gg E_{so}$. В расчетах предполагалось, что начальные состояния носителей тока полностью заняты, а конечные состояния - полностью пустыми. Эти результаты показывают, что при освещении InSb линейно поляризованным светом, как в случае $E_g \gg E_{so}$, так и при $E_g \ll E_{so}$ спектральная зависимость $K_{c,V}^{(2)}(\omega)$ с ростом частоты увеличивается, достигает максимума, а затем уменьшается (рис.1 и 2 (3,4-кривые)). Это объясняется сложностью зонной структуры

полупроводника в модели Кейна, которая отражается в матричных элементах и в энергетических спектрах. За счет этого возникают сложные зависимости плотности состояний и энергий как конечных, так начальных состояний фотовозбужденных носителей тока от частоты света. Если ограничимся сферическим приближением в энергетическом спектре, тогда $K_{c,v}^{(2)}(\omega)$ будет увеличиваться с ростом частоты при условии $E_g \gg E_{SO}$ (рис.2, 1-кривая).

Количественные значения зонных параметров в численных расчетах выбрали из работы [14].

Выводы. Классифицированы матричные элементы межзонных двухфотонных ОП в узкозонном полупроводнике в зависимости от компонент вектора поляризации света. А также в приближении Кейна как с учетом, так и без учета эффекта когерентного насыщения рассчитаны поляризационные и спектральные зависимости парциальных коэффициентов ДФПС и их ДЦД, отличающихся друг от друга типом ОП. На основе золотой правли квантовой механики показано, что при освещении *InSb* линейно поляризованным светом, как в случае $E_g \ll E_{SO}$, так и при $E_g \ll E_{SO}$ спектральная зависимость $K_{c,v}^{(2)}(\omega)$ с ростом частоты увеличивается, достигает максимума, а затем уменьшается и этот случай объясняется со сложностью зависимостей плотности состояний и энергий как конечных, так начальных состояний фотовозбужденных носителей тока от частоты света, которые возникают своеобразностью зонной структуры полупроводника в модели Кейна. За счет этого возникают сложные. Если ограничимся сферическим приближением в энергетическом спектре, тогда $K_{c,v}^{(2)}(\omega)$ будет увеличиваться с ростом частоты при условии $E_g \ll E_{SO}$ (рис. 2, 1-кривая). Развита теория ЛЦД, связанного межзонными одно- и двухфотонными ОП в узкозонных полупроводниках в приближении Кейна.

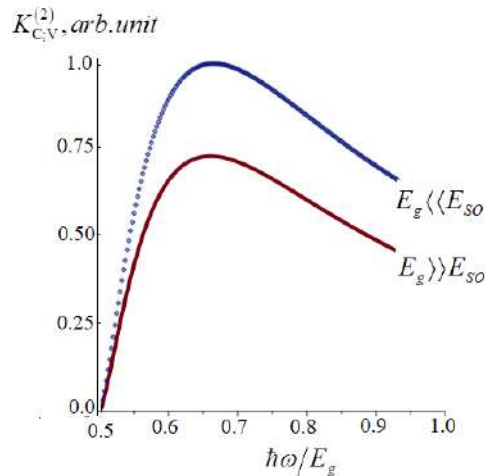


Рис.1. Спектральная зависимость коэффициента межзонного двухфотонного поглощения линейно поляризованного света в кристалле *InSb*, соответствующая случаям $E_g \ll E_{SO}$ и $E_g \gg E_{SO}$.

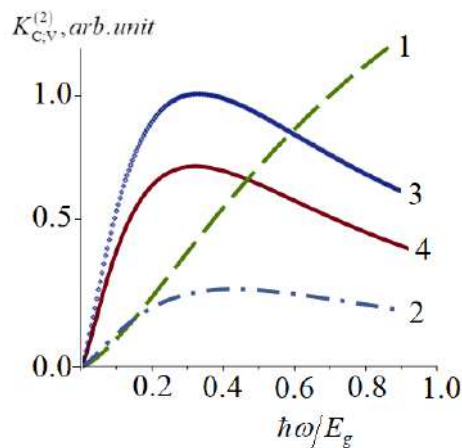


Рис.2. Спектральная зависимость коэффициента межзонного двухфотонного

поглощения линейно поляризованного света в кристалле *InSb*, соответствующая случаям $E_g \square E_{SO}$ (кривые 1 и 3) $E_g \square E_{SO}$ (кривые 2 и 4). Кривые 1 и 2 соответствуют параболическому, а кривые 3 и 4 непараболическому приближению в энергетическом спектре носителей тока.

ЛИТЕРАТУРА:

1. С.Д. Ганичев, Е.Л. Ивченко, Р.Я. Расулов, И.Д. Ярошецкий, Б.Я. Авербух. “Линейно-циркулярный дихроизм тока увлечения при нелинейном межподзонном поглощении света в *p-Ge*”, ФТТ, Т.35, С. 198-207, 1993.
2. Р.Я. Расулов. “Эффект увлечения при трех фотонном поглощении света в полупроводниках типа *Ge*”, ФТП, Т.22, Вып. 11, С. 2077-2080, 1988.
3. R.Ya. Rasulov, G.Kh. Khoshimov, Kh. Kholitdinov. “Linear-circular dichroism of nonlinear light absorption in *n-GaP*”, *Physics and Technology of Semiconductors*, Vol. 30, No. 2, Pp. 274-272, 1996.
4. R.Ya. Rasulov. “Linear circular dichroism in multiphoton interband absorption in semiconductors”, *FTFT*, Т.35, Issue 6, Pp. 1674-1678, 1993.
5. R.Ya. Rasulov. “Linear-circular dichroism in multiphoton interband absorption in semiconductors”, *Solid State Physics*, Vol. 35, No. 6, Pp. 1674-1677, 1993.
6. V.R. Rasulov, R.Ya. Rasulov, I. Eshboltaev. “Linearly and circular dichroism in a semiconductor with a complex valence band with allowance for four-photon absorption of light”, *Physics of the Solid State*, Vol.59, No.3, Pp. 463–468, 2017.
7. Д.А. Паршин, А.Р. Шаббаев. “Теория нелинейного поглощения инфракрасного излучения в полупроводниках с вырожденными зонами”, ЖЭТФ, Т.92, Вып. 4, С. 1471-1484, 1987.
8. Р.Я.Расулов. “Поляризационные оптические ва фотогальванические эффекты в полупроводниках при линейном ва нелинейном поглощении света”. Диссертация на соиск. уч. степени доктора физ.-мат. наук. Ст.-Петербург. -1993. – 206 с.
9. Е.Л. Ивченко. “Двухфотонное поглощение света ва оптическая ориентация свободных носителей” ФТТ. Т.14, Вып.11, С. 3489-3496, 1972.
10. С.Б.Арифжанов, А.М.Данишевский, Е.Л.Ивченко, С.Ф.Кочегаров, В.К.Субашиев. “Роль различных типов переходов при трехфотонном поглощении в *InAs*” ЖЭТФ, Т. 74, № 1, С. 172–177, 1978.
11. N. V.Leppenen, E. L.Ivchenko, L. E.Golub. “Nonlinear Absorption and Photocurrent in Weyl Semimetals” *Physica Status Solidi (b)*. No. 129(1), P.139–146. doi:10.1002/pssb.201900305 (<https://doi.org/10.1002/pssb.201900305>),
12. Г.Л. Бир, Г.Е. Пикус. Симметрия и деформационные эффекты в полупроводниках. Москва: Медиа, 2012, 584 с.
13. Е.Л. Ивченко, Р.Я. Расулов. Симметрия и реальная зонная структура полупроводников. Ташкент: Фан, 1989, 126 с.
14. I.Vurgaftman, J.R.M.Meyer, J.R.Ram-Mohan. “Band parameters for III–V compound semiconductors and their alloys” *J. Appl. Phys.* Vol.89, Pp. 5815-5821, 2001.

**ГАЛЬВАНОМАГНИТНЫЕ, ЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА И ЭЛЕКТРОННЫЕ
ЗОННЫЕ ПАРАМЕТРЫ ДВОЙНЫХ ТВЕРДЫХ РАСТВОРОВ СИСТЕМЫ Mo-Nb**

Кувандиков Облокул Кувандикович,
профессор Самаркандского государственного университета
Хамраев Нурлибой Садиевич,
доцент Самаркандского государственного университета,
hnurliboy@gmail.com
Ражабов Рустам Мустафаевич,
доцент Самаркандского государственного университета,
rajabov_rus@rambler.ru
Хамраева Низора,
ст. лаборант Самаркандского государственного университета
Очилов Мехрож,
магистрант Самаркандского государственного университета

Аннотация. Исследованы температурные и концентрационные зависимости коэффициента Холла и удельного электросопротивления двойных непрерывных твердых растворов системы молибден-ниобий при температурах 77-1000К. По полученным результатам температурной зависимости коэффициента Холла молибдена, ниобия и пять двойных непрерывных твердых растворов системы Mo-Nb в интервале температур 77-1000К. Построены концентрационные зависимости R_H для температур 77К, 300К, 600К и 900К, концентрационные зависимости ρ для температур 200К, 500К, и 1000К, а также используя полученных экспериментальных результатов для комнатных температур вычислены параметры электронной зонной структуры, -концентрация электронов проводимости n , радиус поверхности Ферми k_F , скорость электронов на поверхности Ферми v_F и энергия Ферми E_F .

Ключевые слова: Коэффициент Холла, удельное электросопротивление, твердые растворы, зонные параметры, концентрация электронов проводимости, поверхность Ферми, радиус поверхности Ферми, скорость Ферми, энергия Ферми.

**Mo-Nb TIZIMI BINAR QATTIQ ERITMALARINING GALVANOMAGNIT, ELEKTR
XOSSALARI VA ELEKTRON ZONA PARAMETRLARI**

Annotatsiya. 77–1000 K haroratlar oralig'ida molibden-niobiy tizimi binar uzluksiz qattiq eritmalarining Xoll koeffitsiyenti va solishtirma elektr qarshiligining harorat hamda konsentratsiyaga bog'liqliklari tadqiq etildi. Molibden, niobiy va Mo-Nb tizimining beshta binar uzluksiz qattiq eritmalari uchun 77–1000 K harorat oralig'ida olingan Xoll koeffitsiyentining haroratga bog'liqlik natijalari asosida 77 K, 300 K, 600 K va 900 K haroratlar uchun R_H ning konsentratsiyaga bog'liqliklari, shuningdek, 200 K, 500 K va 1000 K haroratlar uchun ρ ning konsentratsiyaga bog'liqliklari qurildi. Bundan tashqari, xona harorati uchun olingan tajriba natijalaridan foydalangan holda, elektron zonal struktura parametrlari: o'tkazuvchanlik elektronlari konsentratsiyasi n , Fermi sirti radiusi k_F , Fermi sirtidagi elektronlar tezligi v_F va Fermi energiyasi E_F hisoblab chiqildi.

Kalit so'zlar: Xoll koeffitsiyenti, solishtirma elektr qarshiligi, qattiq eritmalar, elektron zona parametrlari, o'tkazuvchan elektronlar konsentratsiyasi, Fermi sirti, Fermi sirti radiusi, Fermi tezligi, Fermi energiyasi.

**GALVANOMAGNETIC, ELECTRICAL PROPERTIES, AND ELECTRONIC BAND
PARAMETERS OF BINARY SOLID SOLUTIONS OF THE MO-NB SYSTEM**

Abstract. The temperature and concentration dependencies of the Hall coefficient and electrical resistivity of binary continuous solid solutions in the molybdenum-niobium system were investigated over the temperature range of 77–1000 K. Based on the obtained temperature dependencies of the Hall coefficient for molybdenum, niobium, and five binary continuous solid solutions of the Mo-Nb system, concentration dependencies of R_H were constructed for temperatures of 77 K, 300 K, 600 K, and 900 K, and concentration

dependencies of ρ were determined for 200 K, 500 K, and 1000 K. Furthermore, using the experimental results obtained at room temperature, electronic band structure parameters were calculated, including the conduction electron concentration n , the Fermi surface radius k_F , the Fermi velocity v_F , and the Fermi energy E_F .

Key words: Hall coefficient, electrical resistivity, solid solutions, electronic band parameters, conduction electron concentration, Fermi surfaces, Fermi surface radius, Fermi velocity, Fermi energy.

Введение. Исследование высокотемпературных свойств металлических материалов таких, как тугоплавкие твердые растворы, является одной из важнейших задач раздела теплофизики высоких температур. Не менее важным в этой серии является исследование электрические, магнитные, гальваномагнитные свойства, что объясняется как их огромным практическим значением, так и значение для научного понимания изменений свойств металла при повышении температуры. Из всех классов металлических материалов, по изученности, с элементарными металлами ситуация сравнительно благоприятная, но что касается более сложные материалы, например, твердые растворы различных типов, интерметаллические соединения и т. д., ни для одного класса не хватает полных экспериментальных данных. Эффект Холла и удельное электросопротивление металлических материалов может считаться одним из основных инструментов, с помощью которого можно получить информацию о фундаментальных характеристиках электронного транспорта, такие как особенности электронного зонного спектра и механизм рассеяния [1,2,3].

В данной работе проведены экспериментальные измерения температурной и концентрационной зависимостям коэффициента Холла и удельного электросопротивления сплавов системы Mo-Nb, очень важного класса металлических материалов, двойные непрерывные неупорядоченные твердые растворы замещения. Термин непрерывные здесь означает, что при любой концентрации компонентов сплава $Mo_x Nb_{1-x}$ не образуется новых соединений со структурой, отличной от структуры исходных компонентов, вероятность того, что данный узел решетки будет занят атомом вида Mo пропорционально только концентрации x атомов этого вида в сплаве. Сплавы этого класса занимают особое место в физике металлов, поскольку многие из них из-за сравнительной простоты служат модельными объектами для проверки современных теоретических представлений об электронном строении и свойствах неупорядоченных металлических систем, играющих все большую возрастающую роль во многих современных технологиях [4].

Молибден в твердом состоянии имеет ОЦК кристаллическую структуру. Температура плавления 2890K [5], температура Дебая 425K [6]. Ниобий также в твердом состоянии имеет ОЦК кристаллическую структуру. Температура плавления ниобия 2742K [5], температура Дебая 252K [6]. Диаграмма состояния системы Mo-Nb исследована многими авторами на сплавах, выплавленных из Mo и Nb высокой чистоты. В системе Mo-Nb существует неограниченная растворимость компонентов друг в друге в жидком и твердом состоянии [7]. Отметим, что атомный радиус ниобия $r_{Nb} = 1,45 \text{ \AA}$ и молибдена $r_{Mo} = 1,64 \text{ \AA}$, непрерывный ряд твердых растворов, образованный Mo и Nb, характеризуется ОЦК кристаллической структурой [7].

Методика исследования. Как известно, эффект Холла заключается в возникновении поперечного электрического поля E_y в проводнике, помещенном в магнитное поле B_z , при прохождении по нему электрического тока с плотностью J_x . Феноменологическая связь этих величин выражается соотношением

$$E_y = R J_x B_z \quad (1)$$

где R - коэффициент Холла

Физической причиной возникновения поля E_y и соответствующей ему ЭДС Холла является действие силы Лоренца на систему движущихся зарядов в проводнике. С учетом толщины d и ширины образца из выражения (1) ЭДС Холла U можно записать в виде

$$U = R \frac{I_x B_z}{d} \quad (2)$$

где I_x — полный ток в поперечном сечении образца.

Типичный уровень измеряемой ЭДС Холла в металлах при типичном значении коэффициента $R \sim 10^{-10} \text{ м}^3/\text{As}$ и $d = 10^{-5} \text{ м}$ составляет 1 – 10 мкВ. При таком уровне измеряемых напряжений на практике дополнительная разность потенциалов всегда оказывается существенной, обусловленная, в частности, такими явлениями, как неэквивипотенциальность зондов при прохождении тока через образец, термо-эдс, обусловленная неизотермичностью образца, и рядом термогальваномагнитных

эффектов. Трудность выделения малого полезного сигнала на фоне сопоставимых и, как правило, плохо контролируемых напряжений составляет сложность измерения коэффициента Холла в металлах. Все основные методы измерения коэффициента Холла можно разделить в основном по характеру используемых магнитного и электрического полей на две группы: первая, в которой ток и магнитное поле являются одновременно постоянными; вторая - либо ток, либо поле, либо и то, и другое переменными. Главным достоинством методов первой группы является их простота и доступность. Однако этот метод трудно применим при высоких температурах. Причиной этого является его низкая помехоустойчивость. Это следует из того, что любое постоянное напряжение, не связанное с эффектом Холла, трудно отличить от исследуемого. При этом в области высоких температур помехи заметно возрастают из-за увеличения коэффициента термо-эдс, сопротивления образца и локальной температурной нестабильности из-за увеличения роли в переносе тепла таких трудноуправляемых явлений, как излучение и конвекция.

Методы измерения эффекта Холла с использованием переменных электрических и магнитных полей выгодно отличаются от методов первой группы более высокой помехозащищенностью [8]. В этом случае открывается возможность селекции полезного сигнала по частоте и фазе. В то же время использование радиотехнических методов обработки сигналов позволяет повысить чувствительность измерительной системы. Существуют три основных варианта этой группы методов. Первый, переменный ток-постоянное магнитное поле, позволяет исключить влияние термо-ЭДС, достигаются высокие поля, но не выделяет неэквипотенциальность зондов на частоте тока. Второй, постоянный ток-переменное магнитное поле, практически не используется, так как трудно выделить измеряемый сигнал Холла на фоне индукционного напряжения, наводимого переменным магнитным полем. В третьих, переменный ток-переменное магнитное поле разной частоты. Третий метод является наиболее надежным для измерения коэффициента Холла в металлах или сильнолегированных полупроводниках при высоких температурах. Суть метода заключается в следующем: если ток I_x и магнитное поле B_z в образце подчиняются гармоническому закону:

$$I_x = I_0 \cos \omega_I t$$

$$B_z = B_0 \cos \omega_B t$$

Тогда ЭДС Холла будет равна

$$U = R \frac{I_0 B_0}{2} [\cos(\omega_I + \omega_B)t + \cos(\omega_I - \omega_B)t] \quad (3)$$

В этом случае коэффициент Холла R может быть определен по значению напряжения Холла на частотах либо $\omega_I + \omega_B$, либо $\omega_I - \omega_B$. При этом частотный спектр возможных помех заметно отличается от частоты сигнала Холла, что радикально облегчает выбор полезного сигнала. Здесь следует отметить, что исходные данные, представленные в настоящей работе, были получены нами с использованием установки, в которой реализован метод переменный ток-переменное магнитное поле разной частоты.

Результаты и их обсуждение. Эффект Холла в чистом молибдене и чистом ниобии ранее изучался в работах [9,10,11] в диапазоне температур 4.2–800К. Нами была измерена температурная зависимость коэффициента Холла чистого Мо и Nb интервале температур 77–1000 К. Результаты наших экспериментов представлены на рис.1. и рис.2. вместе с результатами вышесказанных работ. Как видно из рис.1. в наших экспериментах значение коэффициент Холла молибдена уменьшается от $20 \cdot 10^{-11} \text{ м}^3/\text{As}$ до $18.4 \cdot 10^{-11} \text{ м}^3/\text{As}$ в интервале 77-1000К. Согласно [9], значение R для Мо при комнатной температуре составляет $18.2 \cdot 10^{-11} \text{ м}^3/\text{As}$ и практически не изменяется во всем измеренном ими диапазоне температур. В работе [11] константа Холла Мо была исследована в диапазоне температур 77–200 К и ее значение хорошо согласуется с данными [9] и нашими данными. Согласно [9], значение коэффициента Холла Nb при комнатной температуре составляет $8.8 \cdot 10^{-11} \text{ м}^3/\text{As}$ и, как в случае Мо, практически не изменяется во всем измеренном ими диапазоне температур (Рис.2). В работе [10] константа Холла Nb была исследована в диапазоне температур 4.2–300 К и значение R_N при низких температурах близки к данным [9], но при комнатной температуре значительно отличается. Наши результаты по температурной зависимости находится в хорошем согласии с данными [9], но значение при комнатной температуре составляет $9.15 \cdot 10^{-11} \text{ м}^3/\text{As}$. Исследования эффекта Холла в сплавах системы Мо-Nb нам не известны. На рис.3. представлена температурная зависимость коэффициента Холла двойных непрерывных твердых растворов системы Мо-Nb. Как

видно из рисунка коэффициент Холла чистого ниобия при комнатной температуре имеет значение $9.15 \cdot 10^{-11} \text{ м}^3/\text{Кл}$ и при всех исследованных нами температурах очень слабо зависит от температуры.

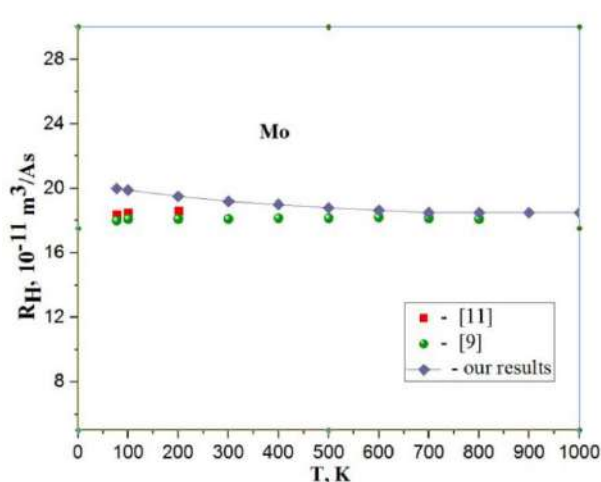


Рис.1. Температурная зависимость коэффициента Холла Mo. Разные значки показывают результаты разных авторов

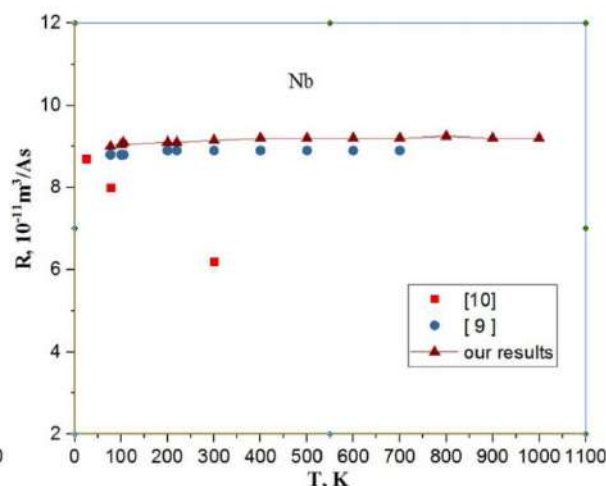


Рис.2. Температурная зависимость коэффициента Холла Nb. Разные значки показывают результаты разных авторов

Как видно из рис.3, в отличие от ниобия, коэффициент Холла чистого молибдена монотонно уменьшается до температуры 630 К и выше этой температуры остается практически не зависящим от температуры до 1000К. Для всех исследованных нами сплавов наблюдается сложная зависимость R_H приблизительно до температуры 600 К, и выше этой температуры $R_H(T)$ стремится остаться практически не зависящим от температуры. Отметим, что температура Дебая для молибдена около 425К и ниобия 252К. Атомный радиус молибдена $r_{\text{Mo}} = 1,64 \text{ \AA}$ и ниобия $r_{\text{Nb}} = 1,45 \text{ \AA}$.

Известно, что в рамках теории свободных электронов концентрацию носителей заряда можно определить по значению коэффициента Холла по формуле

$$n = \frac{1}{R_H e} \quad (4)$$

где R_H - коэффициент Холла, e - заряд электрона.

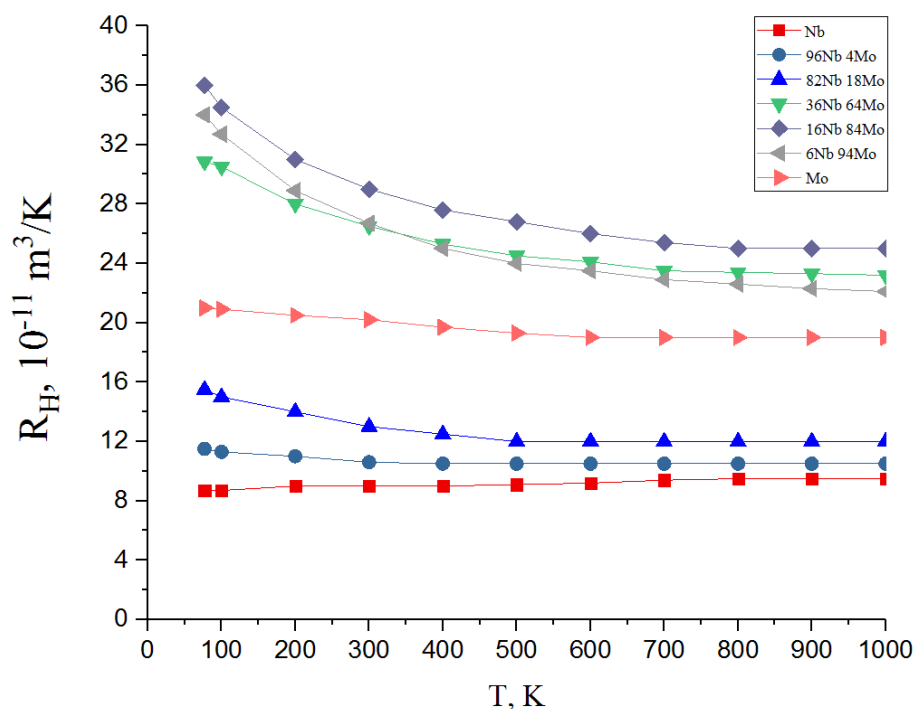


Рис.3. Температурная зависимость коэффициента Холла непрерывных твердых растворов системы Mo – Nb

В свою очередь, параметры электронной зонной структуры, такие как волновой вектор электрона проводимости, соответствующий поверхности Ферми k_F , скорость электрона на поверхности Ферми v_F и энергия Ферми E_F , связаны с концентрацией носителей уравнениями (5), (6), и (7) соответственно

$$k_F = (3\pi^2 n)^{1/3} \quad (5)$$

$$v_F = \frac{\hbar k_F}{m_e} \quad (6)$$

$$E_F = \frac{\hbar^2 k_F^2}{2 m_e} \quad (7)$$

Таблица 1. Результаты расчетов электронных зонных параметров двойных твердых растворов системы Mo-Nb.

Образец	R, 10 ⁻¹¹ м ³ /As	n, 10 ²⁸ м ⁻³	k _F , 10 ¹⁰ м ⁻¹	v _F , 10 ⁶ м*s ⁻¹	E _F , eV
Mo, чистый	20.2	3.1	0.97	1.16	3.58
6Nb-94Mo	26.7	2.34	0.88	1.02	2.95
16Nb-84Mo	29.0	2.16	0.86	0.99	2.81
36Nb-64Mo	26.5	2.35	0.89	1.02	3.03
82Nb-18Mo	13.0	4.8	1.12	1.29	4.78
96Nb-4Mo	10.6	5.9	1.2	1.38	5.45
Nb, чистый	9.0	6.95	1.27	1.47	6.16

С помощью уравнений (1), (2), (3) и (4) были рассчитаны значения упомянутых выше зонных параметров электронов для чистых ванадия и ниобия, а также для бинарных непрерывных твердых растворов системы Mo-Nb по значению их коэффициента Холла при температуре 300К. Результаты расчета приведены в таблице 1.

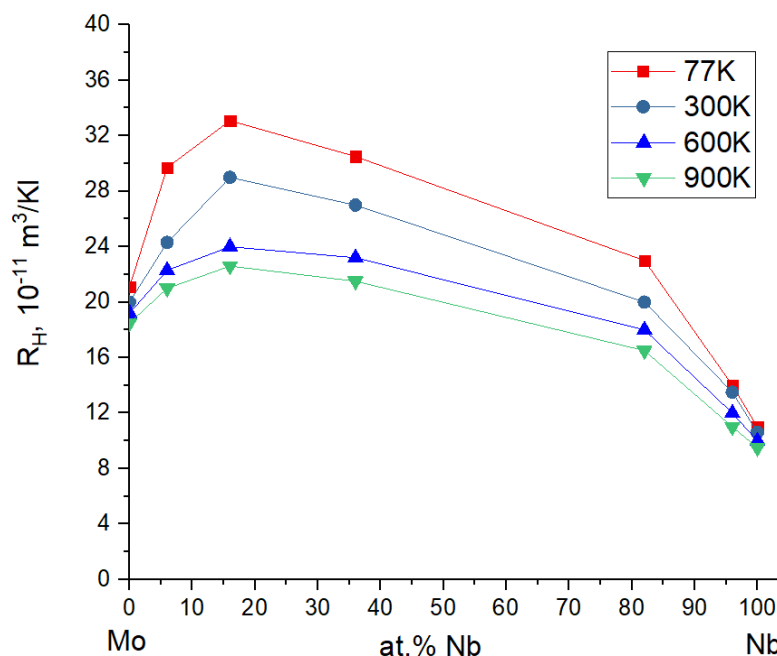


Рис.4. Концентрационная зависимости коэффициента Холла непрерывных твердых растворов системы Mo-Nb

Сплавы Mo-Nb образуют систему двойных непрерывных твердых растворов с О.Ц.К. структурой. Эффект Холла в двойных непрерывных твердых растворах системы Mo-Nb при высоких

температурах ранее не исследовался. На рис.4. представлена концентрационная зависимость коэффициента Холла исследованных двойных непрерывных твердых растворов системы Mo-Nb при температурах 77К, 300К, 600К и 900К. Как видно из рисунка концентрационная зависимость коэффициента Холла при всех температурах представляет собой неправильную параболу, причем ее максимум расположен при концентрации молибдена приблизительно 20 % и ниобия 80 %. Максимальное изменение R с изменением состава наблюдается при температуре 77 К. С повышением температуры максимум концентрационной зависимости уменьшается. При температуре 900 К концентрационную зависимость R_H значительно ослабевает.

Температурную зависимость удельного электросопротивления чистого Mo, Nb и двойных непрерывных твердых растворов системы Mo-Nb с составами 6Nb-94Mo, 16Nb-84Mo, 36Nb-64Mo, 82Nb-18Mo и 96Nb-4Mo измерили обычным четырех зондовым методом в интервале температур 200-1000 К. Результаты измерений показаны на рис.5. Значение удельного электросопротивления для чистого Mo и Nb при комнатной температуре $5.6 \cdot 10^{-8}$ Ом*м и $14.7 \cdot 10^{-8}$ Ом*м соответственно, что находится в очень хорошем согласии с литературными данными для этих металлов. Температурная зависимость удельного электросопротивления ниобия выше 650 К слегка отклоняется от линейности, т.е. температурный коэффициент уменьшается.

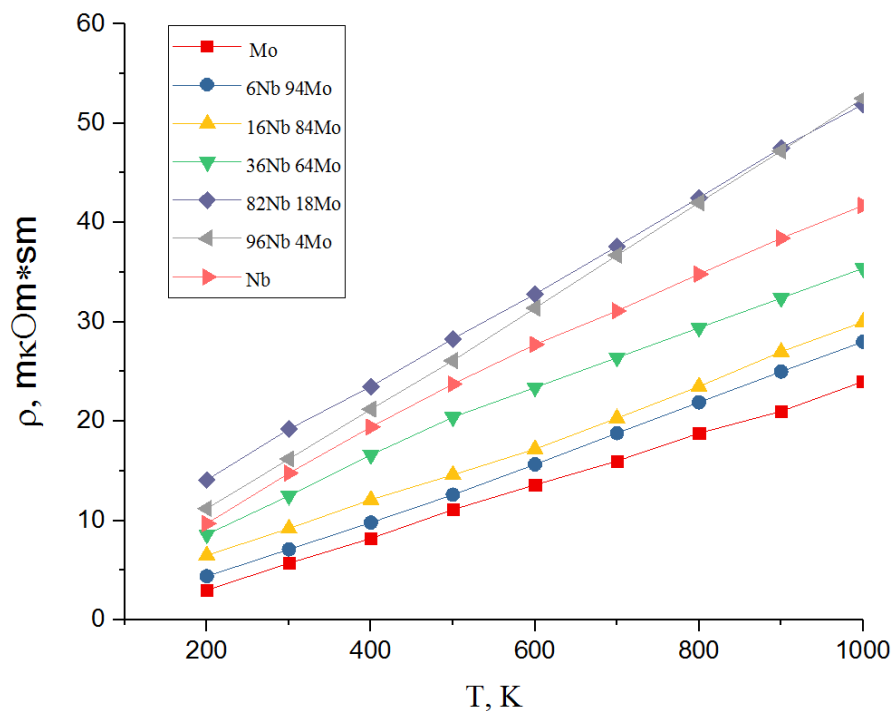


Рис.5. Температурная зависимость удельного электросопротивления двойных непрерывных твердых растворов системы Mo-Nb

Такое же отклонение от линейности наблюдается в твердом растворе 36Nb-64Mo начиная 550К. Для образца 96Nb-4Mo, наоборот, начиная с температуры 500К температурный коэффициент сопротивления начинает увеличиваться. С помощью полученных экспериментальных результатов по температурным зависимостям удельного электросопротивления сплавов системы Mo-Nb построили его концентрационную зависимость. Зависимость удельного электросопротивления от концентрации компонент сплавов системы Mo-Nb показана на рис.6. Как видно из рисунка с увеличением ниобия в составе молибденового сплава значение удельного электросопротивления увеличивается и при концентрации ниобия 96% концентрационная зависимость достигает максимума. Из электронной теории металлов известно, что электросопротивление сильно концентрированного твердого раствора подчиняется правилу Маттиссена-Флеминга:

$$\rho(c, T) = \rho_{\text{осн}}(T) + \rho_0(c) \quad (8)$$

где $\rho_{осн}(T)$ —удельное электросопротивление основного компонента (растворителя), то есть неискаженной кристаллической решетки, зависящее от температуры; $\rho_0(c)$ —добавочное сопротивление, обусловленное атомами примеси и не зависящее от температуры.

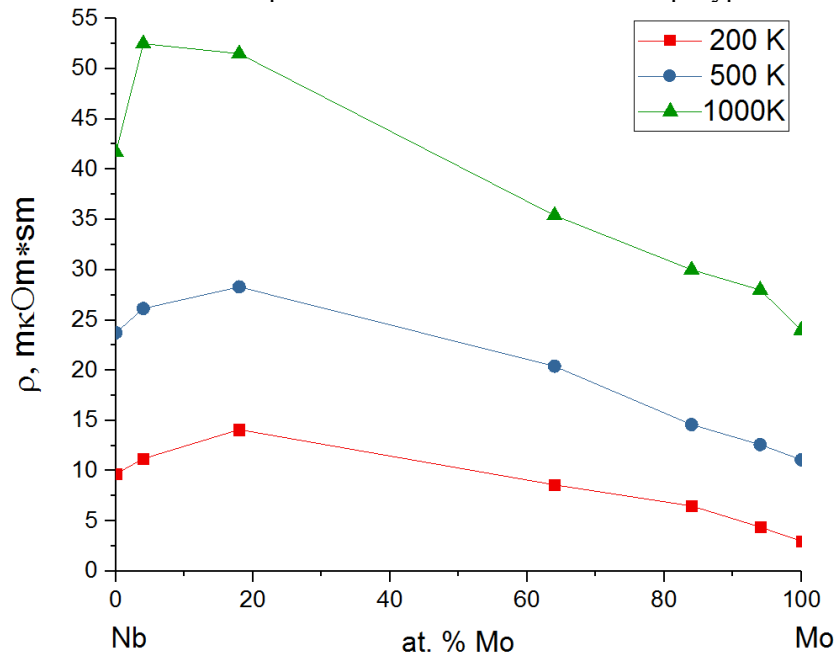


Рис.6. Концентрационная зависимость удельного электросопротивления двойных непрерывных твердых растворов системы Mo-Nb

Из этого правила следует, что электросопротивление сплава складывается из двух составляющих: первый, $\rho_{осн}(T)$ —сопротивление растворителя, которое зависит от температуры и повышается вместе с ней; второй, $\rho_0(c)$ —составляющая, обусловленная присутствием в основной решетке посторонних атомов, которые искажают эту решетку, нарушая периодичность электрического потенциала решетки, благодаря чему сопротивление повышается. Правило Маттисена утверждает, что рассеяние электронов на фонах и на атомах примесей не зависят друг от друга и являются аддитивными.

Обсуждение. Как известно при образовании кристаллических решеток переходных металлов ns- и (n-1)-электронные подуровни расщепляются в зоны, которые перекрывают друг друга s- и d-электроны различным образом распределяются в зонах. Некоторые свойства переходных металлов обусловлен частичным переходом ns-электронов в зону незанятых (n-1) уровней. Таким переходом объясняется большое электросопротивление переходных металлов по сравнению с непременными металлами. Распределение электронов между s- и d-зонами при их перекрытие зависит от температуры и концентрации примесей.

В [12] предложена модель, с помощью которой авторы показали, что многие наблюдаемые особенности температурных и концентрационных зависимостей коэффициента Холла металлов и сплавов могут возникать из-за специфических различий в анизотропии рассеяния носителей заряда при разных механизмах. Используя эту модель, можно обсудить наблюдаемые особенности наших данных по температурным и концентрационным зависимостям коэффициента Холла бинарных непрерывных твердых растворов переходных металлов. Коэффициент Холла кубических металлов в слабых магнитных полях можно выразить формулой

$$R = R_0(\varepsilon(\mathbf{k})) * A[\varepsilon(\mathbf{k}), \tau(\mathbf{k})] \tag{10}$$

где - R_0 - характеристическая константа, значение которой определяется зонной структурой $\varepsilon(\mathbf{k})$, - A - зависящий от температуры фактор, значение которого определяется анизотропией времени электронной релаксации на поверхности Ферми. Если существуют два различных механизма рассеяния носителей, а и b, которые приведут к разным величинам анизотропии времени релаксации, то величина фактора анизотропии A изменяется с температурой в зависимости от того, как изменяются относительные вклады, ρ_a или ρ_b , каждого механизма в общее сопротивление ρ

изменением температуры. Используя вариационное исчисление, авторы [13] получили следующее выражение

$$A = \frac{A_a(1-D)^2 x^2 + 2BD(1-D)x(1-x) + A_b D^2(1-x)^2}{[D(1-x) + (1-D)x]^2} \quad (11)$$

где - A_a , A_b , B и D - параметры, не зависящие от температуры и концентрации $x = \frac{\rho_a}{(\rho_a + \rho_b)}$.

Для многих металлов A изменяется равномерно между A_a и A_b в зависимости от изменения дробного сопротивления x с температурой. Обычно у нас есть некоторая информация о сопротивлениях, вызванных различными механизмами, поэтому мы можем предположить изменения x в зависимости от температуры и от концентрации примесей. Таким образом, зная поведение x и A , мы можем понять экспериментально наблюдаемые особенности концентрационных и температурных зависимостей коэффициента Холла металлов. Другими словами, с помощью этой модели мы можем определить, какой механизм рассеяния играет доминирующую роль в формировании температурной и концентрационной зависимостей коэффициента Холла.

В разбавленных сплавах основными источниками рассеяния являются примеси и фононы. Сопротивление, обусловленное примесями, не зависит от температуры, но изменяется пропорционально изменению концентрации примесей. Сопротивление, обусловленное фононами, наоборот, увеличивается с ростом температуры, но не зависит от изменения концентрации примесей. Обозначим ρ_i - сопротивление металла, обусловленное примесями, а ρ_f - сопротивление металла, обусловленное фононами. Тогда, согласно [13], зная температурную и концентрационную зависимости $x = \frac{\rho_i}{(\rho_i + \rho_f)}$ можно определить температурную зависимость A в зависимости от

значений параметров A_i , A_f , B . Здесь индексы i и f указывают на примесный и фононный вклады соответственно. Для сплавов системы Mo-Nb коэффициент Холла уменьшается с ростом температуры. Добавление второй компоненты приводит к увеличению значения кривой $R_H(T)$. Максимум на диаграмме концентрационной зависимости $R_H(C)$ наблюдается при концентрациях 70-90% Mo. Поэтому можно сделать вывод, что за температурные зависимости коэффициента Холла $R_H(T)$ сплавов системы Mo-Nb ответственен механизм рассеяния на примесях.

Выводы. Молибден является компенсированным металлом и положительный знак коэффициента Холла определяется разницей подвижностей дырок и электронов на уровне Ферми. При добавлении к молибдену некомпенсированного металла ниобия, следует ожидать, что положительное значение коэффициента Холла молибдена должно увеличиться. Таким образом, при добавлении ниобия к молибдену уровень компенсации сплава будет постоянно изменяться в сторону увеличения положительных значений. Очевидно, что именно этот механизм изменения уровня компенсации двойных непрерывных твердых растворов Mo-Nb, наложенный на изменение кривой $R_H(C)$, вызванное процессами рассеяния, должен обуславливать наблюдаемое асимметричное поведение правой и левой частей концентрационной зависимости коэффициента Холла и электросопротивления.

Для всех исследованных образцов температурная зависимость коэффициента Холла $R_H(T)$ имеет определенного температурного интервала, где наклон кривых, образующихся с осью температур, изменяется. Такое сильное ослабление зависимостей $R_H(T)$ происходит в интервале температур 400 К-500 К. Этот температурный интервал можно связать с температурой Дебая, где может происходить изменение механизмы рассеяния.

ЛИТЕРАТУРА:

1. Калин Б.А. *Физическое материаловедение. Т. 5. М.: МИФИ, 2008. Гл. 16.*
2. Кувандиков О.К. *Магнитные и кинетические свойства конденсированных сплавов и соединений на основе переходных и редкоземельных металлов. Ташкент, Фан, - 2009, - 292с*
3. Tianjun Dai, Yixuan Ren, Lingxuan Qian, and Xingzhao Liu. *Characterization of Molybdenum Oxide Thin Films Grown by Atomic Layer. Journal of ELECTRONIC MATERIALS, 2018. <https://doi.org/10.1007/s11664-018-6555-4>*
4. Карпов М.И., Климкина А.А. *Изучение структуры и свойств молибденовых сплавов, полученных методами аддитивных технологий. Сборник трудов Секции Международной молодежной научной конференции «XLVII Гагаринские чтения» 20-23 апреля 2021, Москва, ИП. Мех РАН, с.81*

5. Смитльз Дж. *Металлы. М. Металлургия. - 1980. - 446 с.*
6. Шальникова А.И. *Физика низких температур. Издательство иностранных литератур. 1959- 937с.*
7. Лякишев Н.П. *Диаграммы состояния двойных металлических систем. Машиностроение, 2000 г*
8. Грузинов Б.Ф., Константинов П.П. *Автоматическое измерение эффекта Холла и электропроводности в сильнолегированных полупроводниках. ПТЭ. 1972. №5. с.225-227.*
9. Frank V. *Hall coefficient of technically pure metals: from 80 to 800K II Results for Zr, W, Mo, Nb, Ta and Al. Appl. Sci. Res. B. - 1958, - V. 7.- N 1. - P.41-51.*
10. Волькеништейн П.В., Галошина Э.В. *Эффект Холла в переходных металлах с малым числом d-электронов. ФММ.1965. Т. 20. №3. С.475-480*
11. Черепанов В.И., Старцев В.Е., Волькеништейн Н.В. *Влияние анизотропии электрон – фононного рассеяния на эффект Холла в молибдене. ФНТ. 1979. Т.5. №10. С.1162-1167.*
12. Hurd C.M. *The Hall effect in metals and alloys. Plenum press. New York-London, -1972. P.407.*
13. Kimura H., Hondo K. *Temperature dependence of the Hall coefficient of metals and dilute alloys. Soc. Japan, - 1971, - 31, - P.129-135*

АНАЛИЗ ТЕМПЕРАТУРНОГО ЭФФЕКТА ПО ДАННЫМ МЮОННОГО ТЕЛЕСКОПА

Хамраев Юлдаш Бурханович,

Самаркандский государственный педагогический институт,
Самарканд, Узбекистан
yu-hamrayev@mail.ru

Каршиев Киличбой,

Самаркандский государственный педагогический институт,
Самарканд, Узбекистан

Абдурахманов Мухиддин,

Самаркандский государственный педагогический институт,
Самарканд, Узбекистан

Аннотация. Метод приемных векторов позволяет определять анизотропию космических лучей в каждый момент времени и делает возможным исследование быстрых флуктуаций анизотропии, связанных с динамикой межпланетной среды. Приемные векторы рассчитывались ранее для нейтронных мониторов и мюонных телескопов. Однако большая часть мюонных телескопов сети станций космических лучей, для которых были выполнены расчеты, в настоящее время не работает. В последние годы появился ряд новых, более совершенных детекторов, использование которых, к сожалению, ограничено отсутствием для них приемных коэффициентов. К таким детекторам относится и матричный телескоп в Новосибирске. В связи с этим определены компоненты приемных векторов системы мюонных телескопов наблюдательного комплекса космических лучей станции «Новосибирск». При этом были учтены конструктивные особенности установки, ее ориентация, диаграммы направленности в зависимости от зенитного и азимутального углов, коэффициенты связи системы телескопов, найденные экспериментально методом пробного детектора.

Ключевые слова: Космические лучи, Мюонная компонента, Температурный эффект, Температура атмосферы, Мюонный телескоп, Анизотропия, Эффективная температура, Нейтронный монитор, Вариации, Геомагнитная жесткость отсечки

MYUON TELESKOPI MA'LUMOTLARI ASOSIDA TEMPERATURA EFFEKTINI TAHLIL QILISH

Annotatsiya. Qabul qiluvchi vektorlar usuli kosmik nurlar anizotropiyasini har bir vaqt momentida aniqlash imkonini beradi va interplanetar muhit dinamikasi bilan bog'liq anizotropiyaning tezkor fluktuatsiyalarini o'rganishga sharoit yaratadi. Qabul qiluvchi vektorlar ilgari neytron monitorlari va muon teleskoplari uchun hisoblangan. Biroq kosmik nurlar stansiyalari tarmog'idagi hisob-kitoblar amalga oshirilgan muon teleskoplarining katta qismi hozirda ishlamaydi. So'nggi yillarda bir qator yangi, takomillashgan detektorlar paydo bo'ldi, biroq ular uchun qabul qiluvchi koeffitsiyentlarning yo'qligi sababli ulardan foydalanish cheklangan. Bunday detektorlarga Novosibirskdagi matritsali teleskop ham kiradi. Shu munosabat bilan "Novosibirsk" stansiyasining kosmik nurlar kuzatuv majmuasidagi muon teleskoplar tizimi uchun qabul qiluvchi vektorlarning komponentlari aniqlangan. Bunda qurilmaning konstruktiv xususiyatlari, uning orientatsiyasi, zenit va azimut burchaklariga bog'liq yo'nalish diagrammalari hamda tajribaviy "sinov detektori" usuli bilan topilgan teleskoplar tizimining bog'lanish koeffitsiyentlari hisobga olingan.

Kalit so'zlar: kosmik nurlar, myuon komponenti, temperatur effekt, atmosfera harorati, myuon teleskopi, anizotropiya, samarali temperatura, neytron monitor, variatsiyalar, geomagnit kesilish qattiqligi.

ANALYSIS OF THE TEMPERATURE EFFECT BASED ON MUON TELESCOPE DATA

Abstract. The receiver vector method enables the determination of cosmic ray anisotropy at any given moment in time and makes it possible to study rapid fluctuations in anisotropy associated with the dynamics of the interplanetary medium. Receiver vectors were previously calculated for neutron monitors and muon telescopes. However, most of the muon telescopes in the cosmic ray station network for which calculations

were performed are currently not operational. In recent years, a number of new and more advanced detectors have appeared; however, their use is limited due to the lack of receiver coefficients. One such detector is the matrix telescope in Novosibirsk. In this regard, the components of the receiver vectors for the muon telescope system of the cosmic ray observation complex at the “Novosibirsk” station have been determined. In doing so, the structural features of the installation, its orientation, directional diagrams depending on zenith and azimuth angles, as well as experimentally obtained coupling coefficients of the telescope system using the trial detector method were taken into account.

Keywords: Cosmic rays, Muon component, Temperature effect, Atmospheric temperature, Muon telescope, Anisotropy, Effective temperature, Neutron monitor, Variations, Geomagnetic cutoff rigidity
Cosmic rays, Muon component, Temperature effect, Atmospheric temperature, Muon telescope, Anisotropy, Effective temperature, Neutron monitor, Variations, Geomagnetic cutoff rigidity

Введение. Спектрограф космических лучей (нейтронный монитор, ионизационная камера, 4 мюонных телескопа) создан в 1957 году в Якутске (широта 61.59°, долгота 129.41°, $R_c=1.46$ GV, высота над уровнем моря 95 м, среднее давление $P_0=1003$ mb). Площадь каждого счетчикового детектора 3.5 м² и состоит из 3-х плоскостей счетчиков, без свинцового поглотителя. Счетчиковые мюонные телескопы установлены на поверхности земли и в шахте на уровнях 7, 20, 40 и 60 м в.э.. Телескопы азимутально ориентированы на север и на юг под углами 30° и 60°. Уникальный спектрографический комплекс детекторов позволяет изучать потоки мюонов в широком спектре энергий (от 2 до 300 ГэВ).

Данные детекторов якутского спектрографа доступны на сайте [База данных спектрографа, 1999] или в базе данных мюонных детекторов [База данных mddb]. В таблице 1, кроме ионизационной камеры, сведены периоды работы четчиковых телескопов.

Таблица 1. Период работы детекторов спектрографа.

детектор, м в.э.	период	работа с
IC, 0	1953-2003	
CT, 0	1971-2003 (0°, ±30°)	2009 (0°, ±30°, ±60°)
CT, 7	1971-2003 (0°, ±30°)	2009 (0°, ±30°, ±60°)
CT, 20	1971-2003 (0°, ±30°)	2009 (0°, ±30°, ±60°)
CT, 40		2009 (0°, ±30°, ±60°)
CT, 60	1993-1999 (0°, ±30°)	

С 2016 года на всех уровнях параллельно вводятся в строй многонаправленные сцинтилляционные детекторы 8ST эффективной площадью 8 м².

Температурные данные. Для анализа привлекались результаты модели атмосферы национального центра экологического прогнозирования США NCEP [Американская модель атмосферы]. Модель опирается на все доступные данные глобального высотного зондирования (наземное, высотное, спутниковое) для их интерполяции. Модель позволяет получать как ретроспективные, так и прогностические данные трехмерного температурного поля. Выход модели - данные температуры на 17 стандартных изобарических уровнях в диапазоне 10 - 1000 hPa для четырех моментов в сутки (0, 6, 12, 18 UT). Для получения данных с часовым временным разрешением выполняется интерполяция кубическими сплайнами. Подробное описание методики дано в работе [1,2]. По данным высотного распределения температуры вычисляется эффективная температура с учетом вклада различных уровней T_{eff} , среднемаассовая температура T_{mm} и высота эффективного уровня генерации мюонов H_{100} , необходимые для оценки температурного эффекта мюонной компоненты различными методами.

Коррекция данных на первичные вариации. При исследовании атмосферных вариаций данные наблюдений предварительно освобождаются от первичных вариаций космических лучей. В приближении нулевой гармонике процедура поправок на первичные вариации достаточно проста. Действительно, вариации V , освобожденные от первичных вариаций, можно найти как разность наблюдаемых вариаций \tilde{V} и ожидаемых первичных вариаций космических лучей в пункте наблюдения V^E для детектора с теми же характеристиками, но свободного от атмосферных вариаций, т.е.

$$\nu = \tilde{\nu} - \nu^E \quad (1.1)$$

На практике привлечь данные такого детектора трудно, поэтому в таких случаях обычно в качестве опорного привлекают данные нейтронного монитора, свободного от температурного эффекта, а различие вариаций мюонного и опорного детектора учитывается соответствующими приемными коэффициентами.

Действительно, вариации для двух различных или разнесенных детекторов можно записать на основе приемных коэффициентов в приближении нулевой гармоники как

$$\nu^E = a_{10} \cdot C_0^E \quad \text{и} \quad \nu^S = a_{10} \cdot C_0^S,$$

где C_0^S и ν^S - приемный коэффициент и первичные вариации опорного детектора, а C_0^E и ν^E - приемный коэффициент и ожидаемые первичные вариации в пункте наблюдения. Освобождаясь от неизвестной амплитуды нулевой гармоники a_{10} , получим связь ожидаемых первичных вариаций с вариациями на опорной станции

$$\nu^E = \frac{C_0^E}{C_0^S} \nu^S. \quad (1.2)$$

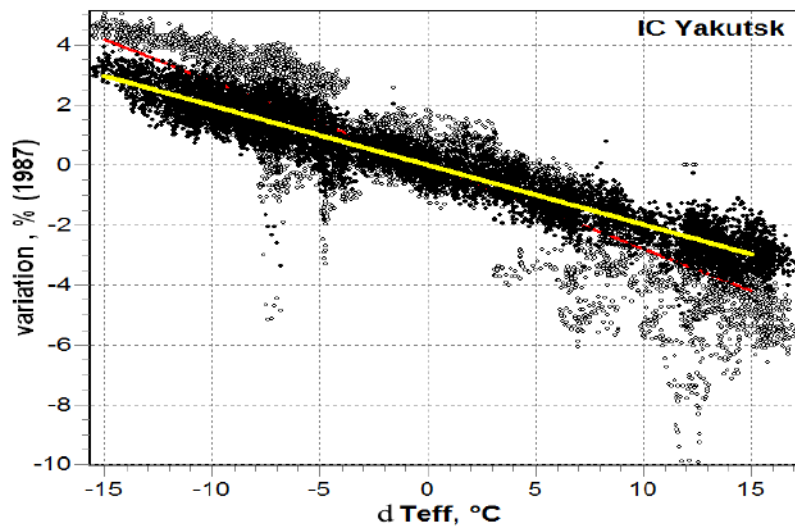


Рис. 1. Коррекция на первичные вариации космических лучей на примере сильно возмущенного 1991 года.

Выражение (6) учитывает различие параметров станций (высоту, жесткость геомагнитного обрезания) и, в принципе, позволяет привлекать любую станцию в качестве опорной станции, но оптимальной является близкорасположенная станция с однотипным детектором.

Это нейтронные мониторы с очень близкими характеристиками Huancayo (13.3 GV) и Haleakala (13.5 GV) и работающий в настоящий момент нейтронный монитор Thailand с более высокой жесткостью геомагнитного обрезания 17.1 GV. Эффективная жесткость всех трех нейтронных мониторов близка к 31.0 GV, ионизационной камеры 50.8 GV, что приводит к разной глубине модуляции и регулируются приемными коэффициентами детекторов.

Рис. 1 иллюстрирует эффективность коррекции на первичные вариации космических лучей на примере сильно возмущенного периода 1991 года для ионизационной камеры Якутск. На заднем плане рисунка приведена корреляционная кривая между вариациями и изменениями эффективной температуры без поправок, а на переднем плане с поправками на первичные вариации космических лучей по описанной выше методике. Введение поправок на вариации приводит к уменьшению температурного коэффициента.

Другой эффективный способ исключения первичных вариаций - это выделение методом Фурье - преобразований частот, соответствующих сезонным вариациям космических лучей [4]. Это очень наглядный и эффективный метод, но для его реализации необходим примерно десятилетний ряд данных.

Результаты анализа. Долголетняя стабильная работа якутской прецизионной ионизационной камеры ASK-1 [3] позволяет изучить долговременные изменения температурного коэффициента

мюонной компоненты космических лучей, даже не смотря на небольшую статистическую точность таких данных (соответствует скорости счета ~ 30 Hz). Сразу нужно отметить, что камера работала в здании церкви со значительной толщиной перекрытия (более 1 м в.э.). Поэтому нельзя непосредственно привлекать плотности температурных коэффициентов, рассчитанные для “стандартного” детектора с экраном 10 см Pb, выделяющего жесткие мюоны. Но применяемый метод эффективной температуры в линейном приближении позволяет учесть особенности такого детектора, вводя коэффициент C . На рис. 2. (левая панель) приведен температурный коэффициент α_{IC} и его временная зависимость, полученная методом эффективной температуры. Четко видна 11-летняя волна в значении температурного коэффициента с амплитудой 5% от среднего значения температурного коэффициента. Поскольку в максимуме солнечной активности средняя энергия частиц выше, то меньше и температурный коэффициент.

Учитывая, что эффективная энергия регистрируемых частиц для ионизационной камеры выше, чем для телескопа 3-х кратных совпадений без свинца, температурный коэффициент ионизационной камеры также выше. Хорошо заметен долговременный тренд примерно на 10% за 5 циклов солнечной активности, причем такой, что влияние температурного эффекта со временем уменьшается, что вероятнее всего связано с нестабильностью ионизационной камеры.

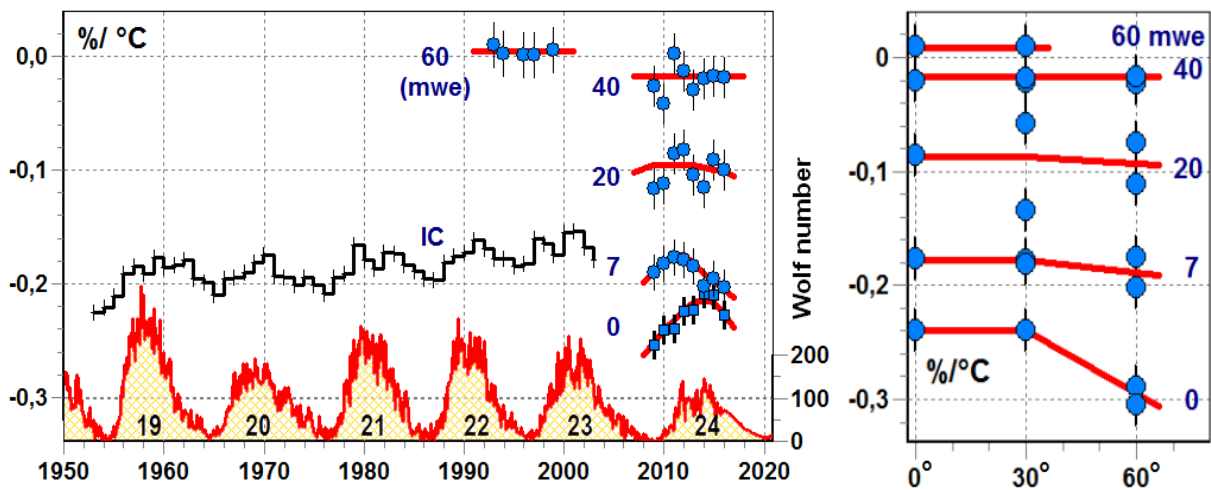


Рис. 2. Временная зависимость температурных коэффициента различных детекторов (вертикаль)- левая панель и угловая зависимость средних значений (правая панель). Данные чисел Вольфа опубликованы на сайте <http://www.sidc.be/silso/DATA/monthssn.dat>.

Так на рис.2. (правая панель), приведено изменение температурного коэффициента ионизационной камеры. Четко просматривается 11-ти летний ход и постоянный рост за 5 циклов солнечной активности примерно на 10%.

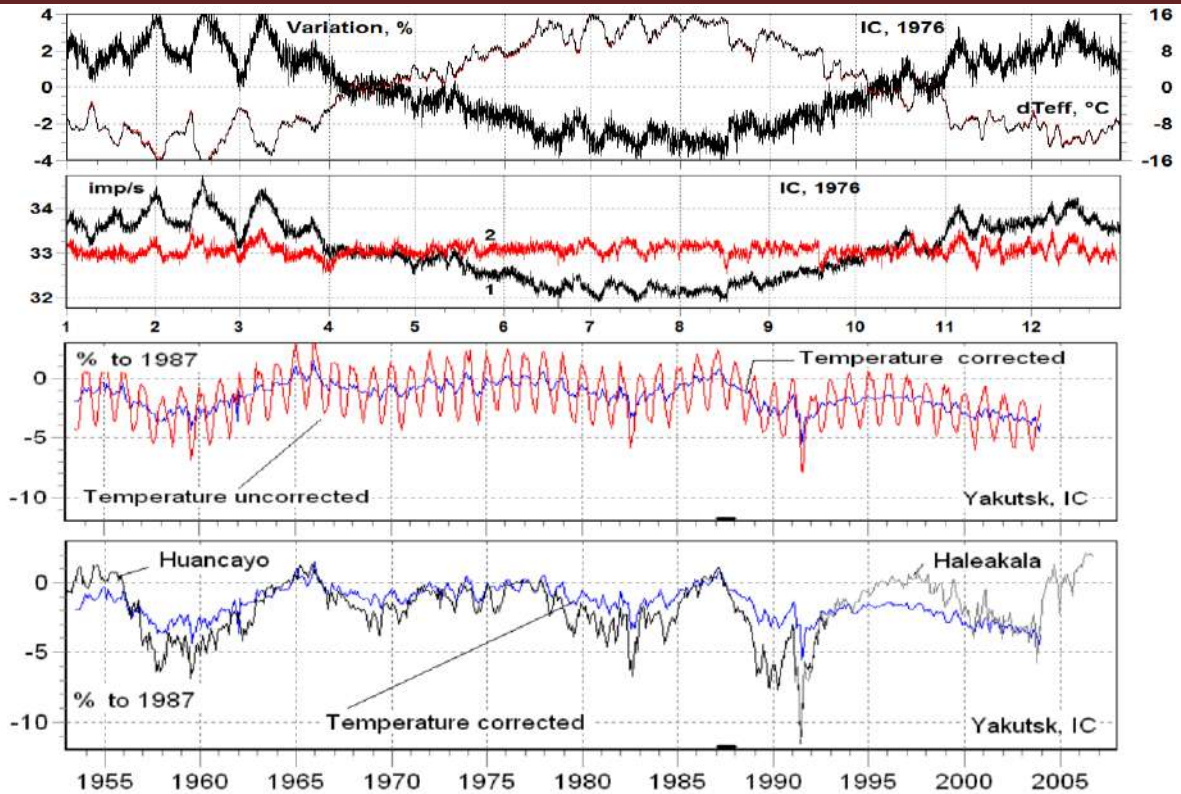


Рис.4. Ионизационная камера Якутск. Временная зависимость эффективной температуры атмосферы и наблюдаемых вариаций космических лучей за 1976 год (верхняя панель); Иллюстрация применимости метода эффективной температуры Среднее значение температурного коэффициента (0°).

На рис.2. (правая панель), показана зависимость средних значений температурных коэффициентов для всех рассматриваемых телескопов от зенитного угла. Как и следовало ожидать, небольшой рост отрицательного температурного эффекта с ростом зенитного угла наблюдается для наземного телескопа. Вплоть до зенитных углов $<60^\circ$ атмосферу условно можно считать плоской, тогда длина пути, проходимого наклонными мюонами от уровня рождения до телескопа, обратно пропорциональна $\cos\theta$. Т.е. для наклонных мюонов оказывается больше не только сам пройденный путь, но и приращения длины пути, связанные с изменением температурного режима атмосферы.

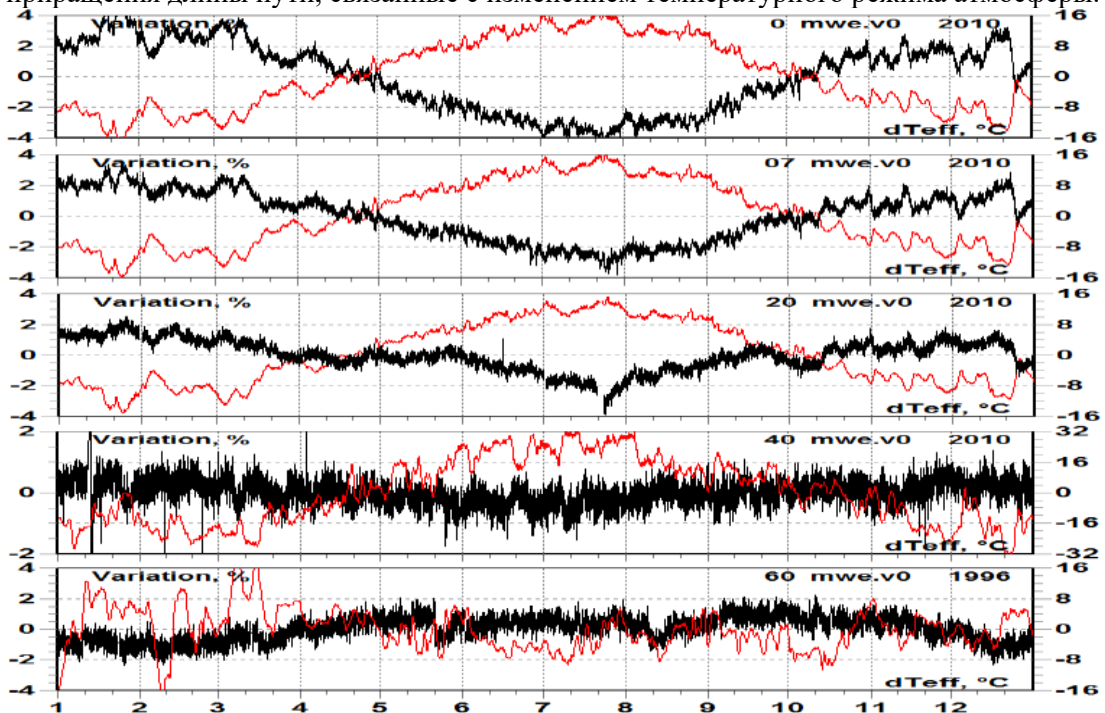


Рис 3. Корреляция изменений эффективной температуры и вариаций скорости счета для детекторов уровней 0, 7, 20, 40, 60 мвэ на примере одного 2010 года.

Это приводит к тому, что наклонные мюоны небольших энергий, регистрируемые наземным телескопом, являются более чувствительными к температурным изменениям в атмосфере, чем вертикальные мюоны, а значит, наблюдается рост отрицательного температурного эффекта, определяемого распадом мюонов. Для подземных телескопов такой зависимости практически не наблюдается из-за увеличения энергии регистрируемых частиц. Как известно, с ростом энергии мюонов растет положительная составляющая температурного эффекта, определяемая распадами пионов и каонов. На правой панели Рис. 3 хорошо видно, как с увеличением глубины телескопов (а значит с ростом энергии регистрируемых мюонов) уменьшается суммарный отрицательный температурный эффект. Одновременно с этим уже не наблюдается и роста суммарного отрицательного температурного эффекта с ростом зенитного угла. Это можно объяснить тем, что для мюонов более высоких энергий, регистрируемых подземными телескопами, уже не так существенна длина пройденного пути.

Для телескопов, расположенных на глубинах 40 и 60 м.в.э., положительный и отрицательный температурный эффекты практически уравниваются, что приводит к почти нулевому суммарному температурному коэффициенту – для телескопа 40 м.в.э. наблюдается незначительный суммарный отрицательный температурный эффект, а для телескопа 60 м.в.э. наблюдается незначительный положительный температурный эффект.

ЛИТЕРАТУРА:

- 1. Berkova M., Belov A., Eroshenko E. Temperature effect of cosmic rays and methods of its correction // Advances in Space Research. – 2009. – Vol. 44, No. 3. – P. 323–328.*
- 2. Berkova M., Yanke V., Eroshenko E. Influence of atmospheric temperature on cosmic ray muon component // Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics. – 2012. – Vol. 89. – P. 1–7.*
- 3. Shafer Y.G., Antonova V.P., Vashenyuk E.V. Ionization chamber ASK-1 and its application in cosmic ray studies // Geomagnetism and Aeronomy. – 1984. – Vol. 24, No. 5. – P. 720–723.*
- 4. Arunbabu K.P., Mohanty P.K., Dugad S.R. Fourier analysis of cosmic ray intensity variations and atmospheric effects // Astroparticle Physics. – 2017. – Vol. 94. – P. 1–8.*
- 5. National Centers for Environmental Prediction (NCEP). NCEP/NCAR Reanalysis Data [Electronic resource]. – Access mode: <https://psl.noaa.gov/data/gridded/data.ncep.reanalysis.html>*

ANOMALOUS PHOTOVOLTAIC EFFECT IN OBLIQUELY DEPOSITED CDSE THIN FILMS UNDER MONOCHROMATIC AND BROADBAND ILLUMINATION

Onarkulov Karimberdi Egamberdiyevich,

Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor of Fergana State University;

Zokirov Adxamjon Ilxomjon o'g'li,

Teacher of Fergana State University;

Abstract. Anomalous photovoltage (APV) thin films represent a promising class of materials for next-generation, non-conventional photovoltaic devices, photodetectors, and optical sensors. In this work, cadmium selenide (CdSe) thin films were synthesized using the thermal evaporation technique under a high vacuum (10^{-5} Torr) with an oblique deposition angle of 45° onto glass substrates. The structural asymmetry induced by the tilted geometry generated a giant photovoltage significantly exceeding the semiconductor's band gap ($E_g \approx 1.7$ eV) under both white and monochromatic illumination. The photovoltage (U_{APV}) demonstrated a robust linear dependence on the illumination intensity within the range of 20×10^3 to 42×10^3 Lx. The maximum photovoltage of ~ 28 V was achieved under white light excitation, followed by red (656 nm), green (589 nm), and blue (486 nm) monochromatic light. The wavelength-dependent behavior is explained in terms of photon penetration depth, charge carrier generation efficiency, and surface recombination velocity. These insights provide a scalable pathway for designing high-voltage micro-optoelectronic systems without conventional p-n junctions.

Keywords: CdSe thin films; Anomalous photovoltaic effect; Oblique angle deposition; Photovoltage anisotropy; Grain boundaries.

МОНОХРОМАТИК ВА КЕНГ ПОЛАСАЛИ ЙОРИТИШ ШАРОИТИДА ҚИЯ УСУЛДА ЧО'КТИРИЛГАН CdSe YUPQA PLYONKALARIDA АНОМАЛ ФОТОВОЛТАИК ЭФФЕКТ

Annotatsiya. Anomal fotokuchlanish (APV) hosil qiluvchi yupqa plyonkalar yangi avlod noan'anaviy fotoelektrik qurilmalar, fotodetektorlar va optik sensorlar uchun istiqbolli materiallar sinfi hisoblanadi. Ushbu ishda kadmiy selenid (CdSe) yupqa plyonkalari yuqori vakuum sharoitida (10^{-5} Torr) termik bug'latish usuli yordamida shisha tagliklarga 45° qiya cho'ktirish burchagida sintez qilindi. Qiya geometriya natijasida yuzaga kelgan strukturaviy assimetriya oq va monoxromatik yoritish sharoitlarida yarimo'tkazgichning taqiqlangan zonasi energiyasidan ($E_g \approx 1,7$ eV) ancha yuqori bo'lgan ulkan fotokuchlanish hosil qildi. Fotokuchlanish (U_{APV}) 20×10^3 – 42×10^3 lx yorug'lik intensivligi oralig'ida chiziqli bog'liqlikni namoyon etdi. Maksimal fotokuchlanish qiymati taxminan 28 V bo'lib, oq yorug'lik ta'sirida kuzatildi; undan keyingi natijalar mos ravishda qizil (656 nm), yashil (589 nm) va ko'k (486 nm) monoxromatik nurlar ostida qayd etildi. To'lqin uzunligiga bog'liq xatti - harakat fotonlarning kirib borish chuqurligi, zaryad tashuvchilar hosil bo'lish samaradorligi va sirt rekombinatsiyasi tezligi nuqtai nazaridan izohlanadi. Olingan natijalar an'anaviy p – n o'tishlarsiz yuqori kuchlanishli mikrooptoelektron tizimlarni yaratish uchun istiqbolli va masshtablanadigan yondashuvni taklif etadi.

Kalit so'zlar: CdSe yupqa plyonkalari, anomal fotovoltaiik effect, qiya burchak ostida cho'ktirish, fotokuchlanish anizotropiyasi, donalar chegaralari.

АНОМАЛЬНЫЙ ФОТОВОЛЬТАИЧЕСКИЙ ЭФФЕКТ В ТОНКИХ ПЛЁНКАХ CdSe, ОСАЖДЁННЫХ ПОД УГЛОМ, ПРИ МОНОХРОМАТИЧЕСКОМ И ШИРОКОПОЛОСНОМ ОСВЕЩЕНИИ

Аннотация. Тонкие плёнки, демонстрирующие аномальный фотоэлектрический эффект (APV), представляют собой перспективный класс материалов для создания фотоэлектрических устройств нового поколения, фотодетекторов и оптических сенсоров. В данной работе тонкие плёнки селенида кадмия (CdSe) были синтезированы методом термического испарения в условиях высокого вакуума (10^{-5} Торр) на стеклянных подложках при угле наклонного осаждения 45° . Структурная асимметрия, обусловленная наклонной геометрией осаждения, привела к возникновению гигантского фотонапряжения, значительно превышающего ширину запрещённой

зоны полупроводника ($E_g \approx 1,7$ эВ), как при белом, так и при монохроматическом освещении. Фотонапряжение (U_{APV}) продемонстрировало устойчивую линейную зависимость от интенсивности освещения в диапазоне $20 \times 10^3 - 42 \times 10^3$ лк. Максимальное значение фотонапряжения около 28 В было получено при воздействии белого света, тогда как при монохроматическом освещении наибольшие значения наблюдались для красного (656 нм), затем зелёного (589 нм) и синего (486 нм) света. Зависимость фотоотклика от длины волны объясняется глубиной проникновения фотонов, эффективностью генерации носителей заряда и скоростью поверхностной рекомбинации. Полученные результаты открывают перспективный путь к разработке высоковольтных микрооптоэлектронных систем без использования традиционных $p-n$ -переходов.

Ключевые слова: тонкие плёнки CdSe; аномальный фотоэлектрический эффект; наклонное осаждение; анизотропия фотонапряжения; границы зёрен.

Introduction. The Anomalous Photovoltaic (APV) effect is a captivating phenomenon observed in non-centrosymmetric semiconductor structures, wherein a steady-state photovoltage substantially exceeding the material's characteristic bandgap potential $V_{ph} \gg E_g/e$ is generated under uniform illumination. Unlike conventional $p-n$ junction solar cells, where the open-circuit voltage is strictly limited by the built-in potential barrier, the APV effect originates from the microscopic asymmetric structural features within the bulk or film texture. First documented in PbS thin films in 1946, this multi-volt photovoltaic phenomenon has been widely explored in various polycrystalline II-VI semiconductor compounds, including CdTe, CdS, and ZnSe [1-4].

The physical mechanism underlying the APV effect is generally interpreted through two prominent models: the micro-junction cascade model and the Demer effect at asymmetric grain boundaries. In the cascade model, the film is viewed as a series of microscopic photovoltaic cells connected in a head-to-tail configuration, allowing individual micro-photovoltages to sum up constructively along the film surface [5].

To achieve the necessary structural asymmetry for this cumulative effect, Oblique Angle Deposition (OAD) is frequently employed. Depositing the semiconductor vapor stream at a distinct angle relative to the substrate normal induces vapor shadowing effects, resulting in the formation of tilted, isolated columnar grains.

Cadmium Selenide (CdSe) is a direct-bandgap n-type semiconductor ($E_g \approx 1.7$ eV) widely celebrated for its high absorption coefficient, excellent optoelectronic transport properties, and broad applications in photodetectors, thin-film transistors, and solar energy conversion. While the conventional photovoltaic properties of CdSe have been extensively probed, research addressing its APV behavior via OAD-induced structural anisotropy remains limited [6-8].

This study systematically explores the generation of high-voltage APV characteristics in CdSe thin films synthesized via vacuum thermal evaporation at a 45° tilt angle. We investigate the linear dependency of U_{APV} across various monochromatic wavelengths and broadband white light intensities, clarifying the role of photon energy and surface recombination dynamics [9,10].

Materials and Methods. CdSe thin films were fabricated using a UVN-7 vacuum deposition system via standard thermal evaporation. High-purity CdSe powder (126 mg) was loaded into a tungsten crucible. To induce the required structural anisotropy for the APV effect, clean glass substrates were mounted at an oblique angle of 45° relative to the incident vapor beam direction. The source-to-substrate distance was fixed at 8 cm.

The vacuum chamber was evacuated to a base pressure of 10^{-5} mm Hg (approx. 1.33×10^{-3} Pa) to prevent severe oxidation and minimize contaminant incorporation during film growth. Substrate and crucible temperatures were precisely maintained at 80°C and 710°C , respectively. The total evaporation sequence was carried out for 27 minutes.

The electrophysical measurement setup involved illuminating the synthesized films with four distinct light configurations: broadband white light and three monochromatic lines centered at 656 nm (red, ~ 1.89 eV), 589 nm (green, ~ 2.11 eV), and 486 nm (blue, ~ 2.55 eV). The illumination intensity (E) was varied linearly from 20×10^3 Lx to 42×10^3 Lx. The resulting steady-state anomalous photovoltage (U_{APV}) was measured across the lateral dimensions of the film using a high-impedance electrometer to prevent loading effects.

Results. The generated anomalous photovoltage (U_{APV}) as a function of the illumination intensity (E) for the different light sources is displayed in Figure 1.

Table 1: Photovoltage Ranges for CdSe Thin Films under Varying Intensities

Illumination type	Wavelength / Energy	U_{APV} at $20 \times 10^3 \text{ Lx}$ (V)	U_{APV} at $42 \times 10^3 \text{ Lx}$ (V)
White light	Broadband spectrum	~ 152	~ 320
Red light	656 nm ($\sim 1.89 \text{ eV}$)	~ 119	~ 239
Green light	589 nm ($\sim 2.11 \text{ eV}$)	~ 63	~ 159
Blue light	486 nm ($\sim 2.55 \text{ eV}$)	~ 45	~ 92

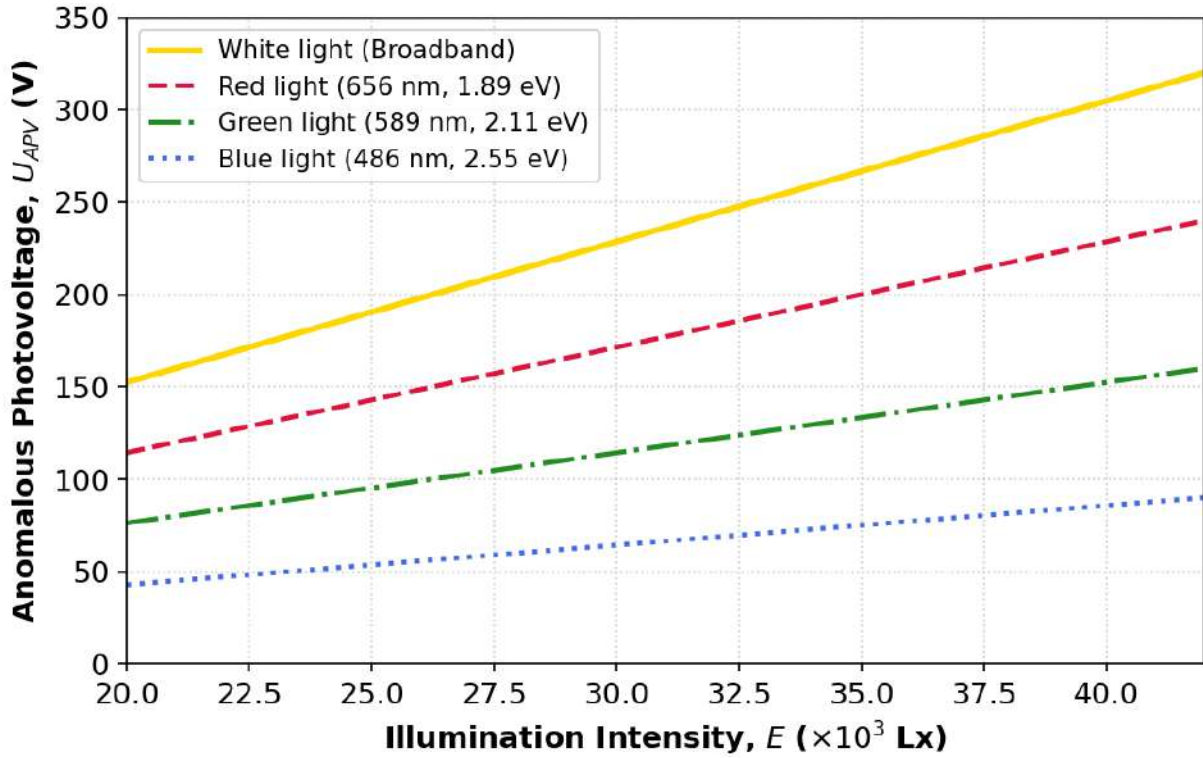


Figure 1. Anomalous photovoltage (U_{APV}) as a function of illumination intensity (E) for CdSe thin films under broadband white light and monochromatic (red, green, and blue) illumination.

A linear increase in U_{APV} with rising light intensity was observed across all tested light profiles, showing a consistently positive slope ($\partial U_{APV} / \partial E > 0$). Broadband white light generated the most intense photovoltaic response, scaling from $\sim 152 \text{ V}$ to $\sim 320 \text{ V}$. For monochromatic light sources, a clear red-shift enhancement was observed: the longest wavelength (656 nm, red) generated the highest photovoltage, while the shortest wavelength (486 nm, blue) yielded the lowest output.

Discussion. The experimental data confirms that the APV effect in these CdSe thin films is closely tied to the 45° oblique deposition angle. This geometry triggers asymmetric growth, forming tilted, columnar grains via self-shadowing. This structural tilt leads to anisotropic light absorption and creates internal electric fields at the grain boundaries. As photogenerated electron-hole pairs separate across these microscopic interfaces, their potentials sum up constructively along the film, generating a macro-photovoltage that significantly exceeds the $\sim 1.7 \text{ eV}$ bandgap of bulk CdSe. These multi-volt outputs match APV characteristics reported for similar obliquely deposited II-VI compounds like CdTe and CdS.

The wavelength dependence of U_{APV} highlights the interplay between photon energy, material penetration depth, and surface recombination dynamics. White light produces the highest photovoltage because its broadband spectrum covers a wide range of electronic transitions, maximizing total carrier generation.

For monochromatic sources, red light (656 nm, $\sim 1.89 \text{ eV}$) matches the CdSe bandgap ($\sim 1.7 \text{ eV}$) exceptionally well. This allows the photons to penetrate deeply and uniformly into the film, generating bulk electron-hole pairs that separate efficiently at internal grain boundaries.

Conversely, blue light (486 nm, ~ 2.55 eV) has a high absorption coefficient, causing it to be absorbed almost entirely near the top surface. This surface-confined generation triggers severe surface recombination at superficial defect states, decreasing the net steady-state carrier concentration and yielding a lower photovoltage.

The strictly linear relationship between light intensity and U_{APV} indicates that the recombination mechanism is dominant in a regime where the deep-level trapping centers within the CdSe lattice remain unsaturated. Furthermore, maintaining a low chamber pressure (10^{-5} mm Hg) and a substrate temperature of 80°C successfully prevented uncontrolled phase degradation or heavy oxidation, preserving the native semiconductor network required for steady charge separation.

The schematic model of this wavelength-dependent penetration depth and charge carrier separation in the oblique columnar microstructure is illustrated in Figure 2.

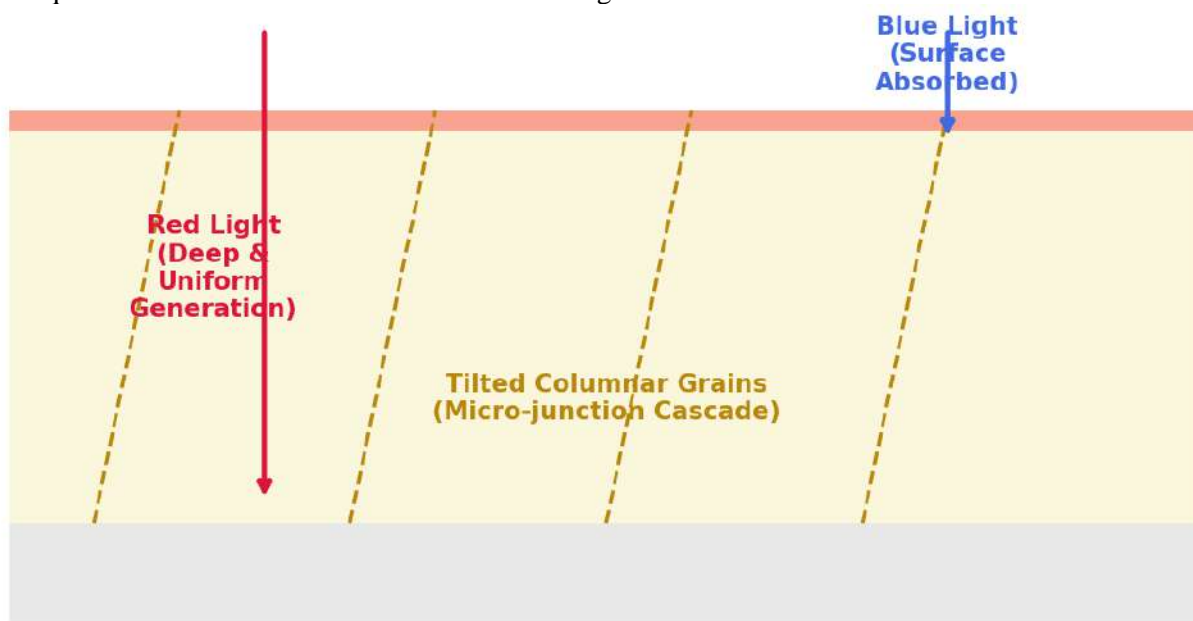


Figure 2. Schematic illustration of the physical mechanism governing the wavelength dependence of the APV effect in obliquely deposited CdSe thin films, highlighting photon penetration depths and surface recombination dynamics

Conclusion. CdSe thin films fabricated via vacuum thermal evaporation at a 45° oblique angle exhibit a highly pronounced Anomalous Photovoltaic effect. The magnitude of the generated photovoltage is highly sensitive to both illumination intensity and photon wavelength. The highest response was achieved under broadband white light (~ 320 V), while monochromatic studies revealed that near-bandgap red light is significantly more efficient at driving the APV effect than highly absorbed blue light. The results underscore the potential of using simple oblique angle adjustments in thermal evaporation setups to design high-voltage, self-powered optoelectronic devices. Future work will focus on introducing dopants or constructing multilayer architectures to further optimize charge separation efficiency.

REFERENCES:

1. Goldstein, B., & Pensak, L. (1959). High-voltage photovoltaic effect in cadmium telluride. *Journal of Applied Physics*, 30(2), 155-161. <https://doi.org/10.1063/1.1735125>
2. Chernyakova, A. P., & Lyubin, V. M. (1964). Anomalous photovoltaic effect in thin films of lead sulfide. *Soviet Physics - Solid State*, 6(3), 750-755.
3. Sosnowski, L. (1947). Excess-defect semiconductor contacts and the anomalous photovoltaic effect. *Physical Review*, 72(7), 641-642. <https://doi.org/10.1103/PhysRev.72.641>
4. Matsushita, T., Suzuki, A., & Okuda, M. (1995). Anomalous photovoltaic effect in obliquely deposited II-VI semiconductor thin films. *Japanese Journal of Applied Physics*, 34(4R), 1920-1925. <https://doi.org/10.1143/JJAP.34.1920>
5. Nesterenko, B. A., & Borodkin, V. I. (2011). Structure anisotropy and photovoltaic properties of CdSe thin films obtained by oblique deposition. *Semiconductor Physics, Quantum Electronics & Optoelectronics*, 14(2), 204-209.

PHYSICS

6. Pankove, J. I. (1971). *Optical Processes in Semiconductors*. Prentice-Hall.
7. Chopra, K. L. (1969). *Thin Film Phenomena*. McGraw-Hill.
8. Smith, L. (2018). Modeling of grain boundary potentials and cascade micro-junctions in anomalous photovoltaic thin films. *Thin Solid Films*, 645, 112-118. <https://doi.org/10.1016/j.tsf.2017.11.023>
9. Patel, M., & Kim, J. (2022). Oblique angle deposition techniques for next-generation self-powered optoelectronic sensors. *Advanced Functional Materials*, 32(15), 2109045. <https://doi.org/10.1002/adfm.202109045>
10. Takahashi, K., & Garcia, R. (2024). Wavelength dependence and surface recombination velocities in Cd-based chalcogenide thin films. *Journal of Luminescence*, 266, 119930. <https://doi.org/10.1016/j.jlumin.2023.119930>

TABIIY GADOLINIY IZOTOPLARINING NEYTRON QAMRASH JARAYONIDA
YUTILGAN ENERGIYAGA FRAKSION HISSASINI GEANT4 MODELI ASOSIDA BAHOLASH

Kulabdullayev Gayratulla Asatovich,

*O‘zbekiston Respublikasi Fanlar akademiyasi Yadro fizikasi instituti,
100214, Toshkent, O‘zbekiston*

Kim Andrey Alekseyevich,

*O‘zbekiston Respublikasi Fanlar akademiyasi Yadro fizikasi instituti,
100214, Toshkent, O‘zbekiston*

Abdullayeva Gayane Artoyevna,

*O‘zbekiston Respublikasi Fanlar akademiyasi Yadro fizikasi instituti,
100214, Toshkent, O‘zbekiston*

Yuldashev Jasur Orzikulovich,

*O‘zbekiston Respublikasi Fanlar akademiyasi Yadro fizikasi instituti,
100214, Toshkent, O‘zbekiston*

*Buxoro davlat tibbiyot instituti, 200126, Buxoro, O‘zbekiston
yuldashev.djasur@bsmi.uz*

Abstrakt. Ushbu ishda tabiiy gadoliniiy tarkibidagi izotoplarning Gd neytron qamrash terapiyasi jarayonida yutilgan energiyaga qo‘shgan fraksion hissi Geant4 Monte Karlo modeli asosida baholandi. Hisoblashlarda umumiy tabiiy Gd konsentratsiyasi 1000 ppm deb olinib, ^{152}Gd , ^{154}Gd , ^{155}Gd , ^{156}Gd , ^{157}Gd , ^{158}Gd va ^{160}Gd izotoplari tabiiy ulushlariga mos konsentratsiyalarda modellashtirildi. Natijalar o‘simta, suv/to‘qima ekvivalent muhit va PMMA hajmlarida ikkilamchi zarrachalar bo‘yicha yutilgan energiya ($E_{\text{yut.}}$) asosida tahlil qilindi. O‘simta hajmida eng yuqori yutilgan energiya tabiiy Gd aralashmasi uchun kuzatildi, alohida izotoplar orasida esa ^{157}Gd va ^{155}Gd asosiy hissa berdi. Zarracha turlari bo‘yicha tahlil umumiy energiya yutilishining katta qismi elektromagnit ikkilamchi elektronlar bilan bog‘liq ekanini ko‘rsatdi. Oje elektronlari ulushi integral qiymat bo‘yicha kichikroq bo‘lsa-da, ularning qisqa masofali tabiati lokal energiya yutilishi uchun muhimdir. Olingan natijalar tabiiy Gd asosidagi GdNQT modellarida izotop tarkibi va ikkilamchi zarracha transportini birgalikda hisobga olish zarurligini ko‘rsatadi.

Kalit so‘zlar: Geant4, gadoliniiy, neytron qamrash, tabiiy Gd izotoplari, yutilgan energiya, fraksion hissa, Oje elektronlar, ichki konversiya elektronlari (IK_{e^-}), Monte Karlo modeli

ОЦЕНКА ФРАКЦИОННОГО ВКЛАДА ИЗОТОПОВ ПРИРОДНОГО ГАДОЛИНИЯ В
ПОГЛОЩЁННУЮ ЭНЕРГИЮ ПРИ ПРОЦЕССЕ ЗАХВАТА НЕЙТРОНОВ НА ОСНОВЕ
МОДЕЛИ GEANT4

Аннотация. В данной работе на основе модели Монте-Карло Geant4 была оценена фракционная доля изотопов, входящих в состав природного гадолиния, в поглощённой энергии в процессе гадолиний-нейтронозахватной терапии. В расчётах общая концентрация природного Gd была принята равной 1000 ppm, а изотопы ^{152}Gd , ^{154}Gd , ^{155}Gd , ^{156}Gd , ^{157}Gd , ^{158}Gd и ^{160}Gd моделировались в концентрациях, соответствующих их природным содержаниям. Результаты были проанализированы на основе поглощённой энергии ($E_{\text{наколл.}}$) вторичных частиц в объёмах опухоли, водной/тканеэквивалентной среды и PMMA. Наибольшая поглощённая энергия в объёме опухоли наблюдалась для смеси природного Gd, а среди отдельных изотопов основной вклад внесли ^{157}Gd и ^{155}Gd . Анализ по типам частиц показал, что значительная часть общей поглощённой энергии связана с электромагнитными вторичными электронами. Несмотря на то, что вклад Оже-электронов по интегральной величине меньше, их короткопробежный характер важен для локального поглощения энергии. Полученные результаты показывают необходимость совместного учёта изотопного состава и транспорта вторичных частиц в моделях GdНЗТ на основе природного Gd.

Ключевые слова: Geant4, гадолиний, нейтронный захват, изотопы природного Gd, поглощённая энергия, фракционный вклад, Оже-электроны, электроны внутренней конверсии (BK_{e^-}), модель Монте-Карло.

ASSESSMENT OF THE FRACTIONAL CONTRIBUTION OF NATURAL GADOLINIUM ISOTOPES TO ABSORBED ENERGY IN THE NEUTRON CAPTURE PROCESS USING THE GEANT4 MODEL

Abstract. *In this work, the fractional contribution of isotopes in natural gadolinium to the deposited energy during gadolinium neutron capture therapy was evaluated using the Geant4 Monte Carlo model. In the calculations, the total concentration of natural Gd was set to 1000 ppm, and the isotopes ^{152}Gd , ^{154}Gd , ^{155}Gd , ^{156}Gd , ^{157}Gd , ^{158}Gd , and ^{160}Gd were modeled at concentrations corresponding to their natural abundances. The results were analyzed based on the deposited energy ($E_{dep.}$) of secondary particles in the tumor, water/tissue-equivalent medium, and PMMA volumes. The highest energy deposited in the tumor volume was observed for the natural Gd mixture, while among the individual isotopes, ^{157}Gd and ^{155}Gd made the main contributions. Particle-type analysis showed that a large fraction of the total energy deposition was attributed to electromagnetic secondary electrons. Although the integral contribution of Auger electrons was smaller, their short-range nature is important for local energy deposition. The obtained results indicate the need to jointly consider isotopic composition and secondary particle transport in natural-Gd-based GdNCT models.*

Keywords: *Geant4, gadolinium, neutron capture, natural Gd isotopes, deposited energy, fractional contribution, Auger electrons, internal conversion electrons (IC_{e-}), Monte Carlo model.*

Kirish. Gadoliniiy neytron qamrash terapiyasi, ya'ni GdNQT, neytron qamrash reaksiyalaridan keyin hosil bo'ladigan ikkilamchi nurlanish komponentlari orqali o'simta to'qimasida lokal energiya yutilishini kuchaytirishga asoslangan yadro-fizik konsepsiyadir. GdNQT jarayonida gadoliniiy atomi neytronni qamragandan so'ng, uyg'ongan yadro va atom qobig'i relaksatsiyasi natijasida gamma-kvantlar, rentgen nurlari, ichki konversiya elektronlari hamda Oje elektronlari hosil bo'ladi. Ushbu komponentlarning har biri modda ichida turlicha masofada energiya qoldiradi; shuning uchun GdNQT samaradorligini baholashda faqat neytron qamrash ehtimolini emas, balki har bir ikkilamchi zarracha turi bo'yicha yutilgan energiya miqdorini, ya'ni $E_{yut.}$ (MeV) ni alohida tahlil qilish zarur [1, 4]. Geant4 zarracha transporti va modda bilan o'zaro ta'sirlarni Monte Carlo usulida modellashtirish uchun ishlab chiqilgan keng qo'llaniladigan toolkit hisoblanadi [1].

Gadoliniiyning GdNQT uchun muhimligi uning ayrim izotoplari, ayniqsa ^{155}Gd va ^{157}Gd , issiq neytronlarni juda samarali qamrashi bilan bog'liq. ^{157}Gd barqaror yadrolar orasida eng yuqori issiq neytron qamrash kesimlaridan biriga ega bo'lib, adabiyotlarda uning qamrash kesimi taxminan 254 000 barn atrofida keltiriladi [2, 3]. Biroq yuqori qamrash kesimi o'z-o'zidan o'simta ichida yuqori yutilgan energiya degani emas. Chunki GdNQT natijasida hosil bo'ladigan gamma, rentgen nuri, Oje elektronlar, ichki konversiya elektronlari va boshqa elektromagnit ikkilamchi elektronlar modda ichida turlicha transport qilinadi. Shu sababli mazkur ishda asosiy mezon sifatida $E_{yut.}$ (MeV) – o'simta, suv/to'qima ekvivalent muhit va PMMA hajmlarida qoldirilgan energiya qabul qilindi [2,5].

GdNQT mexanizmini to'g'ri talqin qilishda tabiiy gadoliniiy tarkibi alohida ahamiyatga ega. Tabiiy Gd bitta izotopdan iborat emas; u ^{152}Gd , ^{154}Gd , ^{155}Gd , ^{156}Gd , ^{157}Gd , ^{158}Gd va ^{160}Gd izotoplari aralashmasidan tashkil topgan. NIST ma'lumotlariga ko'ra, ularning tabiiy atom ulushlari mos ravishda 0.20%, 2.18%, 14.80%, 20.47%, 15.65%, 24.84% va 21.86% ni tashkil qiladi [6]. Demak, agar o'simta to'qimasiga 1000 ppm tabiiy Gd kiritilgan deb qaralsa, bu konsentratsiya 1000 ppm sof ^{157}Gd degani emas; aksincha, har bir izotop o'z tabiiy ulushiga mos ppm qiymatida ishtirok etadi.

Avvalgi mahalliy tadqiqotlarda epiterimal neytronlar ta'sirida biologik namuna va fantom obyektlarida yutilgan doza, fantom ichidagi nurlanish maydoni, suvli fantomda GdNQT sharoitlarini modellashtirish va epiterimal neytronlar uchun dozimetrik yondashuvlar ko'rib chiqilgan [7,13]. Xususan, epiterimal neytron nurlanishida fantom obyekt ichidagi biologik namunalar uchun hisoblash sxemasi ishlab chiqilgani AIP Conference Proceedings maqolasida ko'rsatilgan [8]. Mazkur ish ushbu yo'nalishni davom ettirgan holda, e'tiborni umumiy dozimetrik baholashdan ikkilamchi zarrachalar bo'yicha energiya yutilishi ($E_{yut.}$) ga ko'chiradi. Bunday tahlil GdNQT da qaysi izotop, qaysi zarracha turi va qaysi muhit o'simta ichidagi energiya yutilishiga ko'proq hissa qo'shishini aniqlash imkonini beradi.

Shu sababli ushbu maqolaning maqsadi – tabiiy Gd izotoplarining fraksion tarkibi asosida GdNQT jarayonida hosil bo'ladigan ikkilamchi zarrachalar bo'yicha $E_{yut.}$ (MeV) qiymatlarini Geant4 yordamida baholashdir. Natijalar o'simta, suv/to'qima ekvivalent muhit va PMMA hajmlarida gamma, rentgen nuri, Oje e-, IK e-, boshqa elektron, proton, alfa va og'ir-Ion kabi zarracha kategoriyalari bo'yicha tahlil qilindi. Bu yondashuv tabiiy Gd tarkibida ^{155}Gd va ^{157}Gd ning rolini real fraksion konsentratsiya sharoitida

baholashga, shuningdek yuqori tabiiy ulushga ega ^{156}Gd , ^{158}Gd va ^{160}Gd izotoplarining yutilgan energiyaga nisbiy hissasini aniqlashga imkon beradi.

Tadqiqot metodikasi.

Hisoblash modeli va Geant4 instrumentariysi

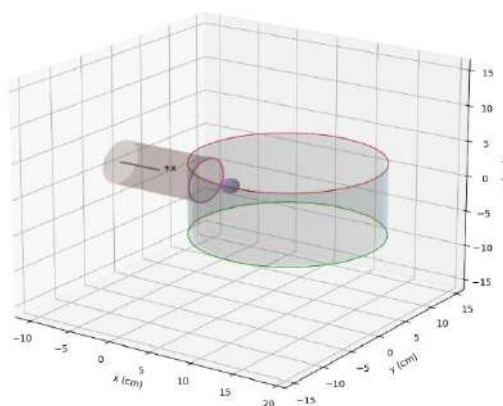
Hisoblashlar Geant4 Monte Carlo toolkit asosida bajarildi. Geant4 zarrachalarning modda ichida transporti, elektromagnit va hadronik o‘zaro ta’sirlar, yadro reaksiyalari, ikkilamchi zarrachalar hosil bo‘lishi va energiya yutilishini bosqichma-bosqich modellashtirish imkonini beradi [1]. GdNQT hisoblarida bu ayniqsa muhim, chunki bitta neytron qamrash aktidan keyin turli energiya va turli yo‘l uzunligiga ega zarracha komponentlari hosil bo‘ladi. Mazkur ishda Geant4 natijalari birinchi navbatda $E_{\text{yut.}}$ (MeV) Scoring orqali baholandi, ya’ni har bir zarracha turi ma’lum hajmda qancha energiya qoldirgani hisobga olindi.

Fizik jarayonlar uchun QGSP_BIC_HP fizik ro‘yxati ishlatildi. Geant4 hujjatlarida QGSP_BIC_HP fizik ro‘yxati 20 MeV dan past neytronlar uchun HP neutron modellaridan va G4NDL ma’lumotlar bazasidan foydalanishi ko‘rsatilgan [3,4]. Bu GdNQT hisoblari uchun zarur, chunki issiq va past energiyali neytron qamrash reaksiyalari Gd izotoplari bilan bog‘liq asosiy fizik mexanizmni tashkil qiladi.

Elektromagnit fizikada atom de-excitation, fluorescence va Oje-kaskad mexanizmlari yoqilgan holda hisoblash olib borildi. Elektromagnit fizika jarayonlarini hisoblashda atomning qo‘zg‘algan holatdan chiqishi, fluoressensiya nurlanishi va Oje elektronlari bilan bog‘liq ketma-ket relaksatsiya mexanizmlari faollashtirilgan holda modellashtirish amalga oshirildi [2,5]. Ushbu jarayonlarda hosil bo‘lgan past energiyali elektronlar kichik masofada energiya qoldiradi; shu sababli ularning $E_{\text{yut.}}$ hissasini alohida ajratish GdNQT mexanizmini tushuntirishda muhim hisoblanadi [2].

Geometriya va hisoblash hajmlari

Hisoblash modeli yadro reaktori gorizontali kanali kolimatoridan chiqayotgan neytron oqimi, kolimator darchasi, fantom obyekt va o‘simta hajmini aks ettiruvchi soddalashtirilgan geometriya asosida tuzildi (1-rasm). Nur yo‘nalishi +X o‘qi bo‘yicha qabul qilindi. Fantom obyektida tashqi konstruktiv qism sifatida PMMA, ichki muhit sifatida suv yoki to‘qima ekvivalent modda, nishon soha sifatida esa Gd bilan boyitilgan o‘simta hajmi ko‘rib chiqildi.



1-rasm. GdNQT fantom modelining hisoblash geometriyasi: kolimator darchasi, tushuvchi neytronlar yo‘nalishi, PMMA fantom chegarasi, suv/to‘qima ekvivalent muhit va Gd bilan boyitilgan tumor hajmining joylashuvi.

$E_{\text{yut.}}$ (MeV) quyidagi uchta asosiy hajm bo‘yicha alohida yig‘ildi: O‘simta; suv / to‘qimaga ekvivalent muhit; PMMA

Bunday ajratish natijalarni fizik talqin qilish uchun zarur. O‘simta hajmidagi $E_{\text{yut.}}$ GdNQT ning nishon sohadagi lokal energiya yutilishini ko‘rsatadi. Suv yoki to‘qimaga ekvivalent hajmdagi $E_{\text{yut.}}$ nishon tashqarisidagi energiya tarqalishini baholaydi. PMMA hajmidagi $E_{\text{yut.}}$ esa fantom konstruktiv materialida ikkilamchi nurlanish energiyasi qanchalik yutilayotganini ko‘rsatadi.

Tabiiy Gd izotop tarkibiga asoslangan fraksion model

Tabiiy gadolinii uchun umumiy konsentratsiya: $C_{Gd,umum} = 1000$ [ppm] deb qabul qilindi. Har bir izotopning fraksion konsentratsiyasi uning tabiiy atom ulushiga mos ravishda quyidagicha hisoblandi:

$$C_i = C_{Gd,umum} \cdot f_i, \tag{1}$$

bu yerda C_i – i -izotop uchun kiritilgan konsentratsiya, f_i – tabiiy izotop ulushi. NIST ma’lumotlariga ko‘ra tabiiy Gd tarkibida ^{152}Gd , ^{154}Gd , ^{155}Gd , ^{156}Gd , ^{157}Gd , ^{158}Gd va ^{160}Gd mos ravishda 0.0020, 0.0218, 0.1480, 0.2047, 0.1565, 0.2484 va 0.2186 atom ulushlariga ega [6].

Bu metodik yondashuv har bir izotopni 1000 ppm sof izotop sifatida emas, balki 1000 ppm tabiiy Gd tarkibidagi real ulushi sifatida baholaydi. Shuning uchun olingan $E_{\text{yut.}}$ qiymatlari izotoplarning boyitilgan

ssenariydagi maksimal javobini emas, balki tabiiy Gd tarkibida energiya yutilishiga qo‘shgan fraksion hissasini ifodalaydi.

Neytron manbasi va spektr sharoiti

Ushbu ishda GdNQT jarayoni issiq neytronlar spektri sharoitida modellashtirildi. Bunday tanlov gadoliniy izotoplarining neytron qamrash xususiyatlari bilan bevosita bog‘liq, chunki ¹⁵⁵Gd va ¹⁵⁷Gd izotoplarini past energiyali neytronlar sohasida yuqori qamrash kesimiga ega. Issiq neytronlar ta‘sirida Gd yadrolarida qamrash reaksiyalari sodir bo‘lib, keyingi bosqichlarda gamma-kvantlar, rentgen nurlari, ichki konversiya elektronlari va Oje elektronlari hosil bo‘ladi. Mazkur ishda ushbu ikkilamchi zarrachalar tomonidan o‘simta, suv va to‘qima ekvivalent muhit va PMMA hajmlarida qoldirilgan energiya E_{yut.} (MeV) bo‘yicha baholandi. Hisoblashlarda barcha izotoplar uchun bir xil geometriya va bir xil issiq neytron spektri qo‘llanildi; farqlanuvchi parametr sifatida faqat tabiiy Gd tarkibidagi izotoplarining fraksion konsentratsiyasi olindi. Natijada har bir izotopning tabiiy gadoliniy tarkibida energiya yutilishiga qo‘shgan nisbiy hissasini bevosita taqqoslash imkoniyati yaratildi [2,3].

Neytron spektri bir xil saqlangan holda faqat Gd izotop tarkibi va fraksion konsentratsiyasi o‘zgartirildi. Bu yondashuv turli izotoplar bo‘yicha E_{yut.} farqlarini neytron spektridagi o‘zgarishlar bilan emas, balki izotop tarkibi va yadroviy o‘zaro ta‘sir bilan bog‘lash imkonini beradi.

Geant4 hisobida har bir step davomida zarracha tomonidan muhitga berilgan energiya yig‘ildi. Keyin bu energiyalar hajm, izotop va zarracha turi bo‘yicha guruhlandi. Natijada har bir izotop uchun quyidagi ko‘rinishdagi tahliliy jadval hosil qilindi:

Isotop, Hajm, Zarracha turi, E_{yut.umum.}, E_{yut.o‘rt.}, E_{yut.stat.xato.}

bu yerda E_{yut.umum.} ma‘lum izotop va ma‘lum hajmda shu zarracha turi tomonidan qoldirilgan umumiy energiyani bildiradi. E_{yut.o‘rt.} hodisa yoki muhit bo‘yicha o‘rtacha energiya yutilishini ifodalaydi. E_{yut.stat.xato.} esa Monte Karlo statistik takrorlanish yoki jarayonlar-darajasi o‘zgaruvchanlik asosida baholangan standart xatolik sifatida ishlatiladi.

Tahlil quyidagi zarracha kategoriyalari bo‘yicha olib borildi: gamma, rentgen, Oje_e-, IK_e-, beta_e-, juftlik_e-, juftlik_e+, boshqa_elektron, proton, alpha, og‘ir-Ion

Ushbu guruhlash GdNQT fizik mexanizmini zarracha kanallari bo‘yicha ajratish uchun ishlatildi. Oje_e- – Gd atom qobig‘i relaksatsiyasi natijasida hosil bo‘lgan lokal elektron komponentni, IK_e- – ichki konversiya elektronlarini, rentgen nuri atom relaksatsiyasining foton komponentini, gamma yadroviy o‘tishlar bilan bog‘liq fotonlarni bildiradi. boshqa_elektron esa Oje, IK, beta yoki juftlik-mahsulot guruhlari kirmagan umumiy elektromagnit ikkilamchi elektronlarni bildiradi; bu guruhga Kompton elektronlari, fotoelektronlar, delta-elektronlar va boshqa tasniflanmagan elektronlar kirishi mumkin.

Energetik va fazoviy tahlil

E_{yut.} natijalari ikki xil darajada tahlil qilindi:

Birinchi darajada, har bir izotop uchun o‘simta, Suv va PMMA hajmlarida zarracha turi bo‘yicha E_{yut.umum.} solishtirildi. Bu tahlil qaysi izotop va qaysi zarracha turi o‘simta ichida energiya yutilishiga ko‘proq hissa qo‘shishini aniqlashga xizmat qildi.

Ikkinchi darajada, ikkilamchi zarralarning yig‘ilgan energetik gistogrammasi natijalari asosida zarracha kinetik energiyasi bo‘yicha E_{yut.} gistogrammalari tuzildi. Bu grafiklar, masalan, Oje elektronlar energiyasi qaysi oraliqda o‘simta ichida ko‘proq yutilayotganini yoki gamma/rentgen nurlari komponenti qaysi energiya diapazonida muhitga ko‘proq energiya berganini ko‘rsatadi.

Bunday ko‘p darajali tahlil GdNKT jarayonida faqat umumiy energiya yutilishini emas, balki izotop → zarracha turi → muhit → fazoviy joylashuv ketma-ketligi bo‘yicha fizik sabablarni ajratishga imkon beradi.

Statistik noaniqlik va E_{yut.} natijalarini talqin qilish

Monte Carlo hisoblarida E_{yut.} statistikasi zarracha tarixi soniga va ma‘lum zarracha kanali qanchalik ko‘p uchrashiga bog‘liq. Umumiy qoida sifatida statistik xatolik zarracha tarixlari sonining kvadrat ildiziga teskari proporsional kamayadi (2):

$$\sigma_{E_{\text{toipL}}} \propto \frac{1}{\sqrt{N}} \tag{2}$$

Shuning uchun gamma, rentgen nuri, boshqa_elektron, Oje_e- va IK_e- kabi ko‘proq uchraydigan kanallar odatda barqarorroq E_{yut.} natijalarini beradi. Aksincha, alpha, og‘ir-Ion, ayrim proton yoki juftlik_e± kanallari kam statistikaga ega bo‘lishi mumkin. Bunday hollarda E_{yut.o‘rt.} va E_{yut.stat.xat.MeV} qiymatlarining katta nisbiy xatolikka ega chiqishi fizik xato emas, balki kam uchraydigan hodisalar statistikasi bilan bog‘liq bo‘lishi mumkin.

Shu sababli maqola tahlilida asosiy e‘tibor o‘simta hajmidagi Oje_e-, IK_e-, rentgen nur, gamma va boshqa_elektron komponentlarining E_{yut.umum.} qiymatlariga qaratildi. Statistik ishonchliligi past bo‘lgan alfa-

zarralar va og‘ir ionlar hissasi ehtiyotkorlik bilan tahlil qilindi. Ular Gd ga xos mahalliy energiya yutilishining asosiy mexanizmi sifatida emas, balki qo‘shimcha ikkilamchi zarralar hissasi yoki statistik jihatdan yetarlicha asoslanmagan fon komponenti sifatida ko‘rib chiqildi.

Natijalar.

Tabiiy Gd tarkibidagi izotoplarning umumiy $E_{yut.}$ hissasi

Tabiiy gadolinii tarkibidagi izotoplarning fraksion hissasini baholash uchun har bir izotop tabiiy ulushiga mos konsentratsiyada modellashtirildi. Umumiy tabiiy Gd konsentratsiyasi 1000 ppm deb qabul qilindi. Shu asosda ^{152}Gd , ^{154}Gd , ^{155}Gd , ^{156}Gd , ^{157}Gd , ^{158}Gd va ^{160}Gd izotoplari mos ravishda 2.0, 21.8, 148.0, 204.7, 156.5, 248.4 va 218.6 ppm qiymatlarida hisoblandi. Olingan natijalar har bir izotopning biologik to‘qima, suv va to‘qima ekvivalent muhit va PMMA hajmlarida yutilgan energiyaga qo‘shgan fraksion hissasini ko‘rsatadi (1-jadval).

Tumor hajmida umumiy $E_{yut.umum.}$ qiymati bo‘yicha eng yuqori natija tabiiy Gd aralashmasi uchun kuzatildi. Tabiiy Gd holatida tumor ichida yutilgan umumiy energiya 4430.15 MeV ni tashkil qildi. Alohida izotoplar orasida eng katta hissa ^{157}Gd izotopiga to‘g‘ri keldi: uning tumor hajmidagi umumiy $E_{yut.umum.}$ qiymati 3964.31 MeV bo‘ldi. Keyingi o‘rinda ^{155}Gd turib, uning tumor hajmidagi $E_{yut.umum.}$ qiymati 2297.11 MeV ni tashkil etdi. Qolgan izotoplar – ^{152}Gd , ^{154}Gd , ^{156}Gd , ^{158}Gd va ^{160}Gd – tumor hajmida nisbatan yaqin qiymatlar berdi.

1-jadval. O‘simta hajmida izotoplar bo‘yicha umumiy $E_{yut.umum.}$ qiymatlari.

Gd holati	O‘simta $E_{yut.umum.}$, MeV
tabiiy Gd	4430.15
^{157}Gd	3964.31
^{155}Gd	2297.11
^{160}Gd	1622.51
^{152}Gd	1546.73
^{158}Gd	1537.71
^{156}Gd	1537.29
^{154}Gd	1503.38

Bu natija shuni ko‘rsatadiki, tabiiy Gd tarkibidagi fraksion konsentratsiyalar hisobga olingan holatda ham o‘simta ichidagi energiya yutilishida ^{157}Gd va ^{155}Gd izotoplari asosiy rol o‘ynaydi. Ayniqsa ^{157}Gd ning o‘simta hajmidagi $E_{yut.umum.}$ qiymati tabiiy Gd natijasiga juda yaqin bo‘lib, bu izotop tabiiy Gd ning GdNQT jarayonidagi dominant komponentlaridan biri ekanini ko‘rsatadi.

O‘simta, Suv va PMMA hajmlarida $E_{yut.}$ taqsimoti

Hisoblash natijalari shuni ko‘rsatdiki, barcha izotoplar uchun yutilgan energiyaning asosiy qismi suv/to‘qima ekvivalent muhit hajmida qayd etildi (2-jadval). Bu geometriyada suv hajmining o‘simta va PMMA ga nisbatan katta bo‘lishi, shuningdek neytronlar va ikkilamchi foton-elektron komponentlarning fantom ichida kengroq tarqalishi bilan bog‘liq.

Tabiiy Gd holatida umumiy $E_{yut.umum.}$ qiymatlari quyidagicha bo‘ldi: Suv hajmida **136652.65 MeV**, PMMA hajmida **23067.54 MeV**, O‘simta hajmida esa **4430.15 MeV**. Shunga o‘xshash nisbatlar alohida izotoplarda ham kuzatildi. O‘simta hajmining umumiy yutilgan energiyadagi ulushi tabiiy Gd holatida taxminan **2.70%**, ^{157}Gd holatida esa **2.50%** ni tashkil etdi. Boshqa izotoplarda o‘simta ulushi asosan **1.19–1.68%** diapazonida bo‘ldi.

2-jadval. Hajmlar bo‘yicha umumiy $E_{yut.umum.}$ taqsimoti.

Gd holati	PMMA, MeV	O‘simta, MeV	Suv, MeV
tabiiy Gd	23067.54	4430.15	136652.65
^{152}Gd	19272.32	1546.73	105438.27
^{154}Gd	19119.94	1503.38	106115.09
^{155}Gd	20079.19	2297.11	114128.39
^{156}Gd	19025.40	1537.29	105468.76
^{157}Gd	22665.86	3964.31	132060.01
^{158}Gd	19139.40	1537.71	106143.88
^{160}Gd	19278.73	1622.51	105529.28

Bu natijalar o‘simta hajmida nisbatan kichik, ammo fizik jihatdan muhim $E_{yut.}$ hissasi shakllanishini ko‘rsatadi. O‘simta ichidagi energiya yutilishi GdNQT uchun asosiy tahlil sohasi bo‘lsa-da, Suv va PMMA

hajmlaridagi energiya yutilishi ikkilamchi zarrachalarning nishon tashqarisidagi transportini baholash uchun muhimdir.

O'simta hajmida zarracha turlari bo'yicha $E_{yut.}$ taqsimoti

O'simta hajmida yutilgan energiya zarracha turi bo'yicha tahlil qilinganda, asosiy hissa boshqa_elektron guruhiga to'g'ri kelgani aniqlandi (3-jadval). Barcha izotoplar bo'yicha o'simta hajmida boshqa_elektron komponentining umumiy $E_{yut.umum}$ qiymati **14534.18 MeV** ni tashkil qildi. Bu o'simta ichidagi jami $E_{yut.}$ ning taxminan **78.82%** qismiga teng. Keyingi yirik hissa proton komponentiga to'g'ri keldi: uning umumiy $E_{yut.umum}$ qiymati **2848.16 MeV** yoki taxminan **15.45%** bo'ldi.

Gd bilan bevosita bog'liq lokal elektron komponent sifatida qaraladigan Oje_e- kanali o'simta hajmida **422.39 MeV** umumiy $E_{yut.umum}$ berdi. Bu jami o'simta energiya yutilishining **2.29%** qismiga teng. IK_e- komponenti esa nisbatan kichik bo'lib, barcha izotoplar bo'yicha o'simta hajmida **3.63 MeV** ni tashkil qildi.

3-jadval. O'simta hajmida zarracha turlari bo'yicha umumiy $E_{yut.umum.}$

Zarracha turi	O'simta $E_{yut.umum.}$, MeV	Nisbiy ulush, %
Boshqa_elektron	14534.18	78.82
Proton	2848.16	15.45
Oje_e-	422.39	2.29
og'ir-Ion	215.42	1.17
juftlik_e-	177.32	0.96
juftlik_e+	172.65	0.94
Boshqa elektron	63.57	0.34
IK_e-	3.63	0.02
alfa	1.18	0.01
rentgen nuri	0.65	<0.01
gamma	0.046	<0.01

boshqa elektron ning katta qiymatga ega bo'lishi o'simta ichidagi energiya yutilishida umumiy elektromagnit ikkilamchi elektronlar muhim rol o'ynashini ko'rsatadi. Ushbu guruh Oje, ichki konversiya, beta yoki juftlik-production elektronlari sifatida tasniflanmagan ikkilamchi elektronlarni o'z ichiga oladi. Fizik jihatdan bu komponent Compton elektronlari, fotoelektronlar, delta-elektronlar va boshqa elektromagnit transport jarayonlarida hosil bo'lgan elektronlar bilan bog'liq bo'lishi mumkin.

Tabiiy Gd, ^{155}Gd va ^{157}Gd uchun o'simta hajmidagi asosiy zarracha kanallari

O'simta hajmida $E_{yut.}$ bo'yicha eng muhim natijalar tabiiy Gd, ^{155}Gd va ^{157}Gd holatlarida kuzatildi (4-jadval). Tabiiy Gd holatida o'simta hajmidagi umumiy $E_{yut.umum}$ **4430.15 MeV** bo'lib, uning **3819.51 MeV** qismi boshqa_elektron kanaliga, **294.78 MeV** qismi proton kanaliga, **152.81 MeV** qismi esa Oje_e- kanaliga to'g'ri keldi. Bu tabiiy Gd holatida o'simta ichidagi energiya yutilishining asosiy qismini elektromagnit ikkilamchi elektronlar tashkil etishini ko'rsatadi.

^{157}Gd holatida o'simta hajmidagi umumiy $E_{yut.umum}$ **3964.31 MeV** bo'ldi. Bu qiymat tabiiy Gd natijasiga yaqin. ^{157}Gd uchun boshqa_elektron hissasi **3351.23 MeV**, proton hissasi **314.37 MeV**, Oje_e- hissasi esa **136.67 MeV** ni tashkil etdi. Bu ^{157}Gd ning tabiiy Gd tarkibida $E_{yut.}$ hosil qilishdagi dominant rolini tasdiqlaydi.

^{155}Gd holatida o'simta hajmida umumiy $E_{yut.umum}$ **2297.11 MeV** bo'ldi. Uning asosiy qismi boshqa_elektron kanaliga to'g'ri keldi (**1845.82 MeV**). Proton komponenti **335.87 MeV**, Oje_e- komponenti esa **52.21 MeV** ni tashkil etdi. ^{155}Gd natijasi ^{157}Gd ga nisbatan kichikroq bo'lsa-da, qolgan izotoplar bilan solishtirganda sezilarli darajada yuqori.

4-jadval. O'simta hajmida tabiiy Gd, ^{155}Gd va ^{157}Gd uchun asosiy $E_{yut.}$ komponentlari.

Gd holati	boshqa_elektron, MeV	proton, MeV	Oje_e-, MeV	IK_e-, MeV	Jami o'simta $E_{yut.}$, MeV
tabiiy Gd	3819.51	294.78	152.81	1.87	4430.15
^{155}Gd	1845.82	335.87	52.21	0.15	2297.11
^{157}Gd	3351.23	314.37	136.67	0.73	3964.31

Tabiiy Gd va ^{157}Gd holatlaridagi Oje_e- qiymatlarining yuqoriligi GdNQT uchun muhim natija hisoblanadi. Chunki Oje elektronlar past energiyali va qisqa masofali bo'lib, ularning o'simta ichida energiya qoldirishi lokal energiya yutilishi mexanizmini ifodalaydi.

To'planish chuqurligi bo'yicha $E_{yut.}$ taqsimoti

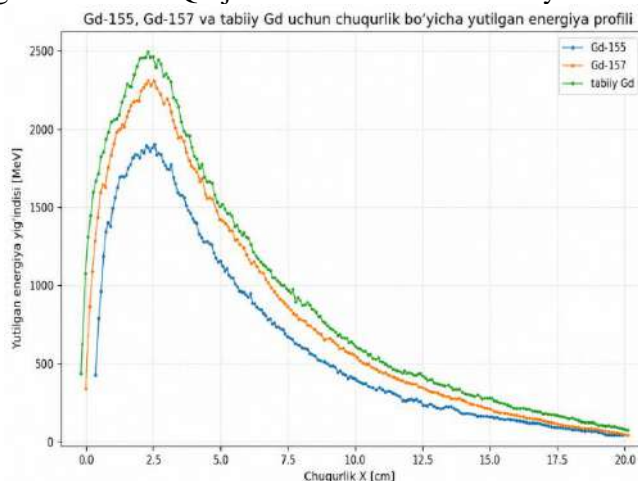
Chuqurlik bo'yicha $E_{yut.}$ profillari nur yo'nalishi bo'ylab energiya yutilishining fantom ichidagi fazoviy o'zgarishini ko'rsatdi. Tabiiy Gd holatida to'planish joyi bo'yicha eng yuqori $E_{yut.umum.}$ qiymati $x = 2.55$ cm da kuzatildi va **2497.32 MeV** ni tashkil qildi. Tabiiy Gd uchun yuqori qiymatlar asosan $x = 2.35$ –**2.75** cm oralig'ida jamlangan.

^{157}Gd holatida eng yuqori to'planish joyi qiymati $x = 2.65$ cm da qayd etildi va **2372.69 MeV** ni tashkil qildi. ^{155}Gd uchun maksimal qiymat ham $x = 2.65$ cm atrofida bo'lib, **1922.36 MeV** ga teng bo'ldi. Qolgan izotoplarda maksimal to'planish joyi qiymatlari nisbatan kichik bo'lib, taxminan 1700–1760 MeV oralig'ida qayd etildi (5-jadval).

5-jadval. To'planish joyi bo'yicha maksimal $E_{yut.umum.}$ qiymatlari.

Gd holati	Maksimum x, cm	Maksimum $E_{yut.umum.}$, MeV
tabiiy Gd	2.55	2497.32
^{152}Gd	1.75	1752.55
^{154}Gd	2.35	1732.95
^{155}Gd	2.65	1922.36
^{156}Gd	2.05	1720.14
^{157}Gd	2.65	2372.69
^{158}Gd	1.95	1707.85
^{160}Gd	1.95	1757.76

To'planish joyi natijalari tabiiy Gd va ^{157}Gd holatlarida energiya yutilishining o'simta joylashgan sohaga yaqin masofalarda kuchayishini ko'rsatadi (2-rasm). Bu holat o'simta markazining nur yo'nalishi bo'yicha $x = 3.0$ cm atrofida joylashtirilgani bilan mos keladi. Tabiiy Gd va ^{157}Gd profillarining yuqori qiymatlari ushbu izotoplarning fraksion GdNQT javobida dominant ekanini yana bir bor tasdiqlaydi.



2-rasm. ^{155}Gd , ^{157}Gd va tabiiy Gd holatlari uchun tushuvchi neytronlar yo'nalishi bo'yicha yutilgan energiyaning ($E_{yut.umum.}$) chuqurlik profillari.

Muhokama. Olingan natijalar tabiiy Gd tarkibidagi izotoplar GdNQT jarayonida yutilgan energiyaga turlicha hissa qo'shishini ko'rsatdi. O'simta hajmida eng yuqori $E_{yut.}$ qiymatlari tabiiy Gd, ^{157}Gd va ^{155}Gd holatlarida kuzatildi. Bu ^{157}Gd va ^{155}Gd izotoplarining past energiyali neytronlarni samarali qamrash xususiyati bilan bog'liq. Tabiiy Gd holatida $E_{yut.}$ qiymatining yuqori bo'lishi barcha izotoplarning qo'shma hissasi bilan izohlanadi, ^{157}Gd natijasining tabiiy Gd qiymatiga yaqinligi esa uning dominant rolini ko'rsatadi. Hajmlar bo'yicha tahlilda suv/to'qima ekvivalent muhitda umumiy $E_{yut.}$ qiymatlari o'simta hajmidagidan yuqori bo'ldi, biroq bu holat asosan suv hajmining kattaligi va ikkilamchi foton-elektron komponentlarning keng tarqalishi bilan bog'liq. Shu sababli GdNQT uchun asosiy baholash Gd bilan boyitilgan o'simta hajmidagi energiya yutilishiga qaratilishi kerak.

Zarracha turlari bo'yicha o'simta hajmida boshqa elektron komponenti eng katta ulushga ega bo'ldi. Bu Kompton elektronlari, fotoelektronlar, delta-elektronlar va boshqa elektromagnit ikkilamchi elektronlarning umumiy energiya yutilishidagi muhim rolini ko'rsatadi. Oje elektronlarining ulushi kichikroq bo'lsa-da, ular past energiyali va qisqa masofali zarrachalar bo'lgani uchun lokal energiya yutilishida muhim ahamiyatga ega. Proton komponenti sezilarli hissa bergan bo'lsa, alfa va og'ir ionlar kam statistik hodisalar bilan bog'liq qo'shimcha ikkilamchi ta'sir sifatida talqin qilindi. Chuqurlik bo'yicha $E_{yut.}$ maksimumlarining

$x \approx 2.5\text{--}2.7$ cm oralig'ida kuzatilishi o'simta markazining $x = 3.0$ cm atrofida joylashgani bilan mos keladi. Ushbu ishda izotoplar 1000 ppm sof modda sifatida emas, balki 1000 ppm tabiiy Gd tarkibidagi real fraksion ulushiga mos holda baholangani sababli natijalar tabiiy Gd ishlatilganda har bir izotopning amaliy hissasini ifodalaydi.

Xulosa. Ushbu ishda tabiiy gadolinij tarkibidagi ^{152}Gd , ^{154}Gd , ^{155}Gd , ^{156}Gd , ^{157}Gd , ^{158}Gd va ^{160}Gd izotoplarining GdNQT jarayonida yutilgan energiyaga qo'shgan fraksion hissasi Geant4 Monte Karlo modeli asosida baholandi. Hisoblashlarda umumiy tabiiy Gd konsentratsiyasi 1000 ppm deb olinib, har bir izotop tabiiy ulushiga mos fraksion konsentratsiyada modellashtirildi. Natijalar o'simta hajmida eng yuqori E_{yut} qiymatlari tabiiy Gd, ^{157}Gd va ^{155}Gd holatlarida shakllanishini ko'rsatdi. Ayniqsa ^{157}Gd ning natijasi tabiiy Gd qiymatiga eng yaqin bo'lib, uning GdNQT jarayonidagi dominant rolini tasdiqladi. ^{155}Gd ham sezilarli hissa berdi va ushbu ikki izotop tabiiy Gd tarkibida termal neytron qamrash jarayonining asosiy fizik komponentlari ekanini ko'rsatdi.

Hajmlar bo'yicha tahlilda eng katta integral E_{yut} qiymatlari suv/to'qima ekvivalent muhitda qayd etildi, bu holat muhit hajmining kattaligi va ikkilamchi foton-elektron komponentlarning keng tarqalishi bilan izohlanadi. Biroq GdNQT nuqtai nazaridan asosiy baholash sohasi Gd bilan boyitilgan o'simta hajmi hisoblanadi. Zarracha turlari bo'yicha esa asosiy hissa boshqa elektron komponentiga to'g'ri keldi, Oje elektronlari esa kichik ulushga ega bo'lsa-da, qisqa masofali lokal energiya yutilishi uchun muhim ahamiyat kasb etdi. Alfa zarrachalar va og'ir ionlar kam statistik hodisalar bilan bog'liq bo'lishi mumkinligi sababli qo'shimcha ikkilamchi hissa sifatida talqin qilindi. Umuman, natijalar GdNQT da energiya yutilishi izotop tarkibi, neytron qamrash jarayoni, ikkilamchi foton-elektron transporti va fantom geometriyasining birgalikdagi ta'siri bilan shakllanishini ko'rsatdi.

Mazkur ishda E_{yut} fizik energiya yutilishi sifatida baholandi; u biologik ekvivalent doza, RBE yoki klinik terapevtik samaradorlikni bevosita ifodalamaydi.

ADABIYOTLAR:

1. Agostinelli S., Allison J., Amako K., et al. *Geant4 - a simulation toolkit. Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A.* 2003;506:250–303. DOI: 10.1016/S0168-9002(03)01368-8.
2. Martin R.F., D' Cunha G., Pardee M., Allen B.J. *Induction of DNA double-strand breaks by ^{157}Gd neutron capture. Pigment Cell Research.* 1989;2(4):330–332. DOI: 10.1111/j.1600-0749.1989.tb00213.x.
3. Ho S.L., Yue H., Tegafaw T., Ahmad M.Y., Liu S., Nam S.-W., Chang Y., Lee G.H. *Gadolinium Neutron Capture Therapy (GdNCT) Agents from Molecular to Nano: Current Status and Perspectives. ACS Omega.* 2022;7(3):2533–2553. DOI: 10.1021/acsomega.1c06603.
4. Geant4 Collaboration. *QGSP_BIC_HP Physics List. Geant4 Physics List Guide. CERN Geant4 Documentation.* Available at: https://geant4-userdoc.web.cern.ch/UsersGuides/PhysicsListGuide/html/reference_PL/QGSP_BIC.html. Accessed: 21 May 2026.
5. Wu F., Sun P., et al. *Nanocarrier-driven neutron capture therapy: strategies and perspectives. Acta Biomaterialia.* 2025. DOI: 10.1016/j.actbio.2025.07.009
6. NIST Physical Measurement Laboratory. *Atomic Weights and Isotopic Compositions for Gadolinium. National Institute of Standards and Technology.* Available at: https://physics.nist.gov/cgi-bin/Compositions/stand_alone.pl?ele=Gd. Accessed: 21 May 2026.
7. Kulabdullayev G.A., Kim A.A., Abdullaeva G.A., Djuraeva G.T., Yuldashev D.O., Mavlyanov I.R., Kadyrbekov R.T., Kadyrbekov N.R., Beknazarov H.J. *Investigation of exposure of epithermal neutrons radiation on the samples of tumor tissues at Gd-NCT. In: LXX International Conference "NUCLEUS–2020. Nuclear Physics and Elementary Particle Physics. Nuclear Physics Technologies". Book of Abstracts. 11–17 October 2020.* p. 196.
8. Kulabdullayev G.A., Kim A.A., Abdullaeva G.A., Yuldashev D.O., Djuraeva G.T. *Calculations of epithermal neutron absorbed dose in the phantom object. AIP Conference Proceedings.* 2024;3020:060005. DOI: 10.1063/5.0193158.
9. Kulabdullayev G.A., Kim A.A., Abdullaeva G.A., Yuldashev D.O., Djuraeva G.T. *Calculations of epithermal neutron absorbed dose in the phantom object. In: IV International Scientific Forum "Nuclear Science and Technologies". Almaty, Kazakhstan; 26–30 September 2022.* p. 226–227.
10. Kulabdullayev G.A., Kim A.A., Djuraeva G.T., Nebesny A.F., Abdullaeva G.A., Yuldashev D.O. *High-sensitive color indicator of absorbed dose of epithermal neutrons radiation. In: III International Scientific Forum "Nuclear Science and Technologies". Almaty, Kazakhstan; 20–24 September 2021.* p. 241–242.

11. Yuldashev D.O., Kulabdullaev G.A., Kim A.A., Abdullaeva G.A., Djuraeva G.T., Normatov E.Kh. *Определение поглощенной дозы эпитепловых нейтронов в фантомном объекте. In: Fan, ta'lim va ishlab chiqarishni rivojlanishida yosh olimlarning o'rni. Tashkent; 2022. p. 125–128.*
12. Kulabdullayev G.A., Kim A.A., Abdullayeva G.A., Djurayeva G.T., Yuldashev J.O. *GdNQTda yutilgan dozani suvli fantom obyekt yordamida modellashtirib aniqlash. In: Fizika fanining rivojida iste'dodli yoshlarning o'rni, RIAK-XVI-2023. Tashkent; 2023. p. 205–206.*
13. Qulabdullayev G.A., Kim A.A., Abdulayeva G.A., Yuldashev J.O. *Gd neytron qamrash terapiyasidagi terapevtik dozalarni aniqlash. In: Tibbiyot sohasida tibbiy kimyo, biokimyo va biofizikada istiqbolli tadqiqotlar. Bukhara; 2024. p. 536–540.*

EFFECT OF PLASTIC DEFORMATION ON CARBON CONCENTRATION IN SILICON CRYSTALS

Mamarasulova Khanifa Dilshod qizi,
Jizzakh State Pedagogical University
mamarasulovahanifa2@gmail.com

Annotation. The work revealed the phenomenon of the transition of all optically active oxygen into an optically inactive state during the process of plastic deformation of Si in silicon single crystals. The effect is observed under conditions of uniform compression ≈ 70 kbar under shear stress 2.5 kbar and 500- 900°C within 1-5 minutes, with the formation of a new oxygen center. As the plastic deformation pressure decreases, some of the oxygen remains in an optically active form. Under these same conditions, the concentration of optically active carbon decreases. Annealing the deformed samples in a quartz ampoule in a vacuum for 1100- 1200°C 1-5 minutes completely restores the concentration of optically active oxygen and does not affect the state of the carbon.

Key words: silicon single crystals, optically inactive state, plastic deformation, carbon, concentration.

ВЛИЯНИЕ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ НА КОНЦЕНТРАЦИЮ УГЛЕРОДА В КРИСТАЛЛАХ КРЕМНИЯ

Аннотация. В работе выявлено явление перехода всего оптически активного кислорода в оптически неактивное состояние в процессе пластической деформации Si в монокристаллах кремния. Эффект наблюдается в условиях равномерного сжатия под сдвиговым напряжением и в течение 1-5 минут с образованием нового кислородного центра. По мере снижения давления пластической деформации часть кислорода остается в оптически активной форме. В этих же условиях концентрация оптически активного углерода уменьшается. Отжиг деформированных образцов в кварцевой ампуле в вакууме в течение 1-5 минут полностью восстанавливает концентрацию оптически активного кислорода и не влияет на состояние углерода.

Ключевые слова: монокристаллы кремния, оптически неактивное состояние, пластическая деформация, углерод, концентрация.

PLASTIK DEFORMATSIYANING KREMNIY KRISTALLARIDAGI UGLEROD KONSENTRATSIYASIGA TA'SIRI

Annotatsiya. Tadqiqot davomida kremniy monokristallarida plastik deformatsiya jarayonida barcha optik faol kislorodning optik nofaol holatga o'tishi hodisasi aniqlandi. Ushbu effekt bir jinsli siqilish sharoitida, siljish kuchlanishi ta'sirida va 1-5 daqiqa davomida yangi kislorod markazining hosil bo'lishi bilan kuzatiladi. Plastik deformatsiya bosimi kamayishi bilan kislorodning bir qismi optik faol holatda saqlanib qoladi. Shu sharoitlarda optik faol uglerod konsentratsiyasi ham kamayadi. Deformatsiyalangan namunalarni vakuumda kvarts ampulada 1-5 daqiqa davomida tavlash optik faol kislorod konsentratsiyasini to'liq tiklaydi va uglerod holatiga ta'sir qilmaydi.

Kalit so'zlar: kremniy monokristallari, optik nofaol holat, plastik deformatsiya, uglerod, konsentratsiya.

Introduction. It is known that various influences on Si (heat treatment, irradiation, etc.) lead to the transition of some oxygen from the so-called free (optically active) state to an optically inactive one. In [1], it was shown that the combined effect of high pressure and temperature leads to the transition of all optically active oxygen to an optically inactive form. It was assumed that the decrease in NQ m at high pressure is associated with the process of plastic deformation of the sample in the high-pressure chamber. The aim of this study is to clarify the cause-and-effect relationship between plastic deformation of samples, carried out under different conditions, and the optically active state of carbon.

Silicon crystals remain one of the most important semiconductor materials in modern microelectronics, photovoltaics, integrated circuits, sensors, and optoelectronic devices. The functional

properties of silicon are highly dependent on the structural perfection of the crystal lattice and the concentration of impurities incorporated during crystal growth and subsequent technological processing. Among these impurities, carbon occupies a special position because even relatively small changes in its concentration and distribution can influence defect formation, mechanical stability, electrical behavior, and the reliability of silicon-based devices. Therefore, studying the factors that affect carbon concentration in silicon crystals is an important scientific and technological problem.

Carbon in silicon crystals is usually present as a substitutional impurity, replacing silicon atoms in the crystal lattice. Its concentration depends on the raw material purity, growth conditions, thermal history, and post-growth treatment of the crystal. Although carbon is often considered an undesirable impurity, its behavior is complex. In some cases, carbon can contribute to the formation of defect complexes, while in other cases it may interact with oxygen and point defects, affecting the development of microdefects and dislocation structures. As a result, carbon can influence both the physical properties of silicon crystals and their performance in semiconductor applications.

Plastic deformation is one of the important external factors that can significantly change the defect structure of silicon crystals. When a silicon crystal undergoes plastic deformation, dislocations are generated and redistributed within the lattice. These dislocations act as active centers for impurity interaction, diffusion, and segregation. Since carbon atoms are sensitive to lattice defects and internal stress fields, plastic deformation may change their spatial distribution and effective concentration in different regions of the crystal. This makes the relationship between plastic deformation and carbon concentration especially relevant for understanding the behavior of real silicon crystals under technological and mechanical influences.

The effect of plastic deformation on carbon concentration is mainly associated with the interaction between carbon atoms, vacancies, interstitials, and dislocations. During deformation, the crystal lattice experiences local distortions, which create energetically favorable sites for impurity atoms. Carbon atoms may migrate toward dislocation cores, defect clusters, or strained regions of the lattice. This process can lead to local enrichment or depletion of carbon in certain areas of the crystal. As a result, the measured carbon concentration may vary depending on the degree of deformation, temperature, deformation rate, and initial impurity content of the crystal.

Another important aspect is the interaction between carbon and oxygen in silicon crystals. Oxygen is commonly present in Czochralski-grown silicon and can form complexes with carbon under certain thermal and mechanical conditions. Plastic deformation can accelerate or modify these interactions by increasing the number of structural defects and enhancing diffusion processes. Carbon–oxygen complexes may influence precipitation processes, thermal stability, and the formation of electrically active centers. Therefore, the study of carbon concentration after plastic deformation also helps to clarify the broader mechanism of impurity-defect interaction in silicon.

From a practical point of view, understanding the effect of plastic deformation on carbon concentration is important for semiconductor manufacturing. Silicon wafers are subjected to various mechanical and thermal processes during cutting, polishing, oxidation, doping, annealing, and device fabrication. Even small mechanical stresses may produce defects that later affect the electrical properties of the material. If plastic deformation changes the concentration or distribution of carbon, it can influence carrier lifetime, resistivity, leakage currents, defect generation, and long-term device reliability. Therefore, controlling carbon behavior is necessary for obtaining high-quality silicon crystals with predictable properties.

The scientific importance of this topic is also connected with the need to improve models of impurity behavior in deformed semiconductor crystals. Traditional approaches often consider impurity concentration as a relatively stable parameter determined mainly by crystal growth conditions. However, experimental and theoretical studies show that mechanical deformation can modify impurity distribution through defect-mediated mechanisms. This means that carbon concentration should be analyzed not only as a chemical characteristic, but also as a structural and mechanical response of the crystal lattice to deformation.

This study focuses on the effect of plastic deformation on carbon concentration in silicon crystals. The main objective is to examine how deformation-induced defects influence the redistribution and possible change of carbon content in the crystal structure. Special attention is given to the role of dislocations, internal stresses, point defects, and carbon-related complexes. By analyzing these processes, the study aims to contribute to a deeper understanding of impurity-defect interactions in silicon and to provide scientific insights that may be useful for improving semiconductor material processing technologies.

In general, the investigation of carbon behavior in plastically deformed silicon crystals is essential for both fundamental solid-state physics and applied semiconductor technology. It allows researchers to reveal the mechanisms of impurity redistribution, evaluate the stability of silicon crystals under mechanical influence, and develop more effective methods for controlling material quality. As the demand for highly reliable semiconductor devices continues to increase, the study of deformation effects on impurity concentration becomes increasingly relevant for modern materials science.

Experimental procedures. For the experiments, a dislocation-free sample was used. Si with $P = 10\text{--}300 \text{ Omm}$, grown in a vacuum by the Czochralski method, with an oxygen content $\square 10^{17} \text{ cm}^{-3}$. Samples in the form of disks $\mathcal{K} = 3\text{--}4 \text{ mm}$ and a thickness $1\text{--}3 \text{ mm}$. The samples were cut from a single crystal with the planes of the washers oriented perpendicular to the axes. $\langle 111 \rangle$, $\langle 100 \rangle$, $\langle 110 \rangle$. To create pressure, temperature and shear stress, the samples were placed in the center of the working volume of a high-pressure chamber of the "Toroid" type with a graphite heater, and the planes of the sample were perpendicular to the axis of the chamber cylinder.

Using the technique described in [2], we found that when hexagonal boron nitride is compressed to $\square 75 \text{ kbar}$ in a given chamber, the normal component of the stress along the axis of the chamber cylinder exceeds the radial component by $\square 5 \text{ kbar}$. Thus, at $\square 75 \text{ kbar}$ the maximum shear stresses in the sample did not exceed — $\square 2.5 \text{ kbar}$. At a pressure of $10\text{--}20 \text{ kbar}$, these stresses decreased due to a decrease in the strength of the medium transmitting pressure to the sample. To increase the shear stresses, anvils made of sintered cubic boron nitride were inserted into the chamber, as in [3]. Typically, pressure with shear stress was first created and then the temperature was increased. Some experiments were conducted under conditions where;

The shear stresses increased slightly after heating the sample due to an increase in the total pressure by $5\text{--}10\%$. No difference in the results was observed. Deformation was carried out at $10\text{--}20 \text{ kbar}$ and $\square 75 \text{ kbar}$ for $500\text{--}900^\circ\text{C}$ times ranging from 1 to 60 min. At 500°C the samples usually fractured brittlely. The minimum deformation temperature at low pressure was $\square 900^\circ\text{C}$. The degree of residual deformation of the samples ϵ was controlled by decreasing their thickness $\epsilon = \frac{\Delta h}{h}$. At a degree of deformation $2\text{--}3\%$ by etching, the dislocation density was determined. The maximum degree of deformation was 12% . For comparison, one sample was deformed at atmospheric pressure and a temperature 800°C of 3% uniaxial compression for 2 min.

Measurement of IR spectra of carbon. IR spectra of the samples before and after deformation were measured using Specord - IR -75 and TJR -20 spectrophotometers at room temperature using a microscope attachment in a single-beam configuration. In addition, we monitored changes in the spectrum in the regions $490, 610$ and 750 cm^{-1} , characteristic of absorption by the lattice [4]. The study of the change in the absorption band 607 cm^{-1} on carbon atoms replacing Si atoms is complicated by the fact that in the same region of the spectrum (610 cm^{-1}) absorption by the Si crystal lattice is observed with an absorption coefficient at the maximum of the band $\alpha_p = 8 \text{ cm}^{-1}$. Such strong lattice absorption does not allow one to estimate the change in the carbon concentration, when studying the spectrum using the single-beam method. In this regard, optical measurements were carried out using the differential method [5], which makes it possible to automatically exclude the influence of absorption by the Si crystal lattice. In this case, a Si sample of the same thickness as the one being studied, but having N_C , determined by the activation analysis method, $N_C = 3.4 \cdot 10^{15} \text{ cm}^{-3}$ was placed in the comparison channel. The estimate was made using the formula $N_C = C \cdot \frac{m}{h} \text{ cm}^{-3}$, where $C = 1.1 \cdot 10^{17} \text{ cm}^{-2}$ — a coefficient found by comparing optical data with the results of activation analysis. Most experiments were conducted with samples compressed

along the x-axis. $\langle 111 \rangle$ Identical results were obtained with samples compressed along the x- axis $\langle 100 \rangle$ and $\langle 110 \rangle$.

Analysis of the obtained results. A study of the change in the carbon absorption band 610 cm^{-1} showed that the intensity of the carbon absorption band decreases during plastic deformation, with a noticeable tendency for this effect to increase with decreasing deformation pressure. At low pressures, a proportional relationship is observed between the degree of deformation ϵ and the decrease in absorption in the band 600 cm^{-1} . The absorption band at 819 cm^{-1} , responsible for the Z - SiC phase, does not change its intensity during deformation. It was found that the band intensities 610 cm^{-1} do not change in the first two annealing modes. Annealing according to the third mode has virtually no effect on the band 610 cm^{-1} . Increasing the annealing time at the same (fourth mode) does not lead to any changes in the spectrum of samples annealed according to the third mode [6].

The carbon peak does not change as actively, and the effect is more noticeable during deformation at low pressures. The constancy of the peak values at 807 and 1230 cm^{-1} does not provide grounds for believing that the process of formation of (Z - SiC and SiO_2) is taking place, as was suggested in [7, 8]. It should also be noted that if a second phase (SiO_2) were present or formed in the sample, then at high pressure it would most likely transform into the high-pressure phase - coesite, which has its own characteristic spectrum in the IR region. We did not observe coesite lines after prolonged annealing of the samples at high pressure.

Conclusions. The main results of the work can be formulated as follows.

- under $500\text{-}900^\circ\text{C}$ these conditions, the concentration of optically active carbon decreases.
- annealing of deformed samples in a vacuum at 900°C for 6 hours and 1000°C for 1 hour does not change the concentration of optically active oxygen and carbon.
- annealing of deformed samples in a vacuum in a quartz ampoule at $1000\text{-}1150^\circ\text{C}$ for 1-5 minutes completely restores the concentration of optically active oxygen and does not affect the state of carbon.

LITERATURE:

1. Koji, S., Seiji, S., Seishiro, F., 2007. *First Principles of Analysis of Formation Energy of Point Defects and Voids in Silicon Crystals during the Cooling Process of Czochralski Method*, *Journal of Solid Mechanics and Materials Engineering*, Volume 1, Issue 9, pp. 1175-1185.
2. Copper J., Jones N. - *J. Appl. Phys.*, 1977, u. 48, no. 4, p. 1646-1655.
3. Stubhaug, E., Ekker R., 2005. *Temperature and injection dependent lifetime spectroscopy*, Norwegian University of Science and Technology, Faculty of Natural Sciences and Technology, Department of Physics, Trondheim, Norway.
4. Pankov Zh. *Optical processes in semiconductors*. Moscow, 1973. 456 p.
5. Luque, A., Hegedus, S., 2011. *Handbook of Photovoltaic Science and Engineering*, Second Edition, John Wiley & Sons.
6. Li, Sheng S., 2006. *Semiconductor Physical Electronics*. Department of Electrical and Computer Engineering, Second Edition, University of Florida, USA.
7. Eremenko V. G., Nikitenko V. I., Yakimov E. B. *Dependence of electrical properties in silicon on the temperature of plastic deformation and annealing*. — *JETP*, 1977, v. 73, p. 3 (9), pp. 1129–1139.
8. Shulpyakov I. F., Vitman R. F., Lebedev A. A., Dremin A. N. *Effect of high pressure on the state of optically active oxygen in Si during heat treatment*. — *FTP*, 1984, v. 18, p. 7, pp. 1306–1307.
9. Hull, R. (Ed.). *Properties of Crystalline Silicon*. London: INSPEC, The Institution of Electrical Engineers, 1999.
10. Sumino, K. "Interaction of Dislocations with Impurities in Silicon Crystals." *Philosophical Magazine A*, 1983.
11. Reiche, M., Kittler, M., & Pippel, E. "Electronic and Optical Properties of Dislocations in Silicon." *Crystals*, 2016, 6(7), 74.
12. Capan, I., Brodar, T., Pivac, B., & Borghesi, A. "Dislocation-related Deep Levels in Carbon Rich p-type Silicon." *Physica B: Condensed Matter*, 2007.

PHYSICS

13. Londos, C. A., et al. "Oxygen- and Carbon-Related Defects in Electron Irradiated Cz-Si." *Applied Sciences*, 2022, 12(16), 8151.
14. Kovalev, I. D., et al. "Determination of Oxygen and Carbon Impurities in Polycrystalline Silicon by IR Spectrometry." *Journal of Analytical Chemistry*, 2008.
15. Wang, L., et al. "Dislocations in Crystalline Silicon Solar Cells." *Advanced Energy and Sustainability Research*, 2024.
16. Hirth, J. P., & Lothe, J. *Theory of Dislocations*. 2nd ed. New York: Wiley, 1982.
17. Sze, S. M., & Ng, K. K. *Physics of Semiconductor Devices*. 3rd ed. Hoboken: Wiley-Interscience, 2007.
18. Shimura, F. *Semiconductor Silicon Crystal Technology*. San Diego: Academic Press, 1989.
19. Pizzini, S. *Advanced Silicon Materials for Photovoltaic Applications*. Chichester: Wiley, 2012.
20. Peaker, A. R., Markevich, V. P., & Coutinho, J. "Tutorial: Junction Spectroscopy Techniques and Deep-Level Defects in Semiconductors." *Journal of Applied Physics*, 2020.
21. Chang, Z., et al. "Simulation Study of Nucleation Mechanism of Grown-in Defects in Silicon Crystals." *Physica B: Condensed Matter*, 2023.

QUYOSH ENERGIYASINI O‘LCHASH VA HISOBLASH USULLARI

Jamilov Yusuf Yunus o‘g‘li,

Navoiy davlat universiteti fizika va astronomiya kafedrasi dotsenti, p.f.f.d. (PhD)

yusuffamilov91@gmail.com

Muxammadiyeva Marjona Sunnatillo qizi,

Navoiy davlat universiteti magistranti

marjonamuxammadiyeva30@gmail.com

Aslonova Munisa Oybekovna,

Navoiy davlat universiteti magistranti

aslonovamunisa5@gmail.com

Annotatsiya. Maqolada Quyosh energiyasidan foydalanishning fizik asoslari, bunda Quyosh energiyasi, Quyosh konstantasi, radiatsiya oqimi, radiatsiya ta'siri, intensivlik, to'g'ri nurlanish, sochilgan nurlanish, yig'indi nurlanish, Quyosh nurlanishi spektri kabi asosiy tushunchalar ta'riflari, ahamiyati hamda aktinometr, piranometr, albedometr, balansomer, geliograf kabi o'lchov asboblari, ularning tuzilishi, ishlash prinsipi va qo'llanilishi to'g'risida ma'lumotlar bayon qilingan. Quyosh energiyasini ifodalovchi kattaliklarni o'lchash va hisoblash, uning sutka va yil davomida o'zgarishini bilish amaliy ahamiyatga ega hisoblanadi. Shu nuqtai nazardan maqolada piranometr yordamida yig'indi va sochilgan Quyosh radiatsiyasini o'lchash tajriba ishi ketma-ketligi ko'rsatib o'tilgan.

Kalit so'zlar: Quyosh energiyasi, Quyosh konstantasi, radiatsiya oqimi, radiatsiya ta'siri, intensivlik, to'g'ri nurlanish, sochilgan nurlanish, yig'indi nurlanish, Quyosh nurlanishi spektri, aktinometr, piranometr, albedometr, balansomer, geliograf.

METHODS FOR MEASURING AND CALCULATING SOLAR ENERGY

Abstract. The article describes the physical foundations of the use of solar energy, including the definitions and significance of basic concepts such as solar energy, solar constant, radiation flux, radiation effect, intensity, direct radiation, scattered radiation, total radiation, solar radiation spectrum, as well as information on measuring instruments such as actinometer, pyranometer, albedometer, balance meter, heliograph, their structure, operating principle and application. Measuring and calculating the quantities representing solar energy, knowing its changes during the day and year are of practical importance. In this regard, the article shows the sequence of experimental work on measuring total and scattered solar radiation using a pyranometer.

Keywords: Solar energy, solar constant, radiation flux, radiation effect, intensity, direct radiation, scattered radiation, total radiation, solar radiation spectrum, actinometer, pyranometer, albedometer, balance meter, heliograph.

МЕТОДЫ ИЗМЕРЕНИЯ И РАСЧЁТА СОЛНЕЧНОЙ ЭНЕРГИИ

Аннотация. В статье описываются физические основы использования солнечной энергии, включая определения и значение основных понятий, таких как солнечная энергия, солнечная постоянная, поток излучения, эффект излучения, интенсивность, прямое излучение, рассеянное излучение, полное излучение, спектр солнечного излучения, а также информация об измерительных приборах, таких как актинометр, пиранометр, альбедометр, весы, гелиограф, их конструкция, принцип работы и применение. Измерение и расчет величин, представляющих солнечную энергию, а также знание ее изменений в течение дня и года имеют практическое значение. В этой связи в статье показана последовательность экспериментальных работ по измерению полного и рассеянного солнечного излучения с помощью пиранометра.

Ключевые слова: Солнечная энергия, солнечная постоянная, поток излучения, радиационный эффект, интенсивность, прямое излучение, рассеянное излучение, суммарное излучение, спектр солнечного излучения, актинометр, пиранометр, альбедометр, весы, гелиограф.

Kirish. Quyosh energiyasi tugamaydigan energiya manbai bo‘lib, tabiatdagi barcha turdagi energiya va umuman hayot Quyosh energiyasining hosilasi hisoblanadi. Quyosh nurlanishi sekundiga 300 000 km tezlik bilan tarqalib, 8 minutda Yer orbitasiga yetib keladi. Yer sirtiga 50 % Quyosh energiyasi (nurlanishi) yetib keladi. Qolgan qismi atmosferada yutiladi. Lekin, Yer sirtiga tushadigan Quyosh energiyasining miqdori butun dunyodagi neft, gaz, ko‘mir va boshqa qayta tiklanmaydigan energiya resurslarining aniqlangan zaxirasidan ham ortiqdir. Olimlarning hisoblariga ko‘ra Quyosh energiyasining atigi 0.0125% ini ishlatilishi hozirgi kunda dunyo energetikasini to‘liq energiyaga bo‘lgan talabini qoplashi mumkin [1, 16-17 b.].

Quyosh nurlanishining energiyasini hisoblash uchun Quyosh radiatsiyasi energiyasining to‘rtta tushunchasi quyidagicha ta’riflanadi:

1) Radiatsiya oqimi: Quyosh tomonidan vaqt birligida radiatsiya ko‘rinishida chiqariladigan energiya Quyosh nurlanish oqimi deb ataladi, shuningdek, nurlanish kuchi deb ham ataladi, birligi Vt .

2) Quyosh radiatsiyasining intensivligi I : Birlik vaqt uchun birlik maydonga proyeksiya qilingan Quyosh radiatsiyasi energiyasi Quyosh nurlanishining intensivligi deb ataladi, shuningdek Quyosh nurlanishi deb ataladi va uning birligi W/m^2 .

3) Radiatsiya ta’siri h : Quyosh tomonidan ma’lum vaqt oraliq‘ida (masalan, bir soat, bir kun, bir oy, bir yil va boshqalar) birlik maydonga proyeksiya qilingan radiatsiya energiyasi radiatsiya ta’siri deb ataladi va uning birligi kWh/m^2 .

4) Quyosh konstantasi I_{SC} : Quyosh konstantasi Yer atmosferasidan (yuqori atmosfera) Quyosh va Yer orasidagi o‘rtacha masofadagi Quyosh doimiysi qiymatini bildiradi. Quyosh nuriga (chegara) perpendikulyar bo‘lgan tekislikda vaqt birligida birlik maydoniga tushadigan umumiy Quyosh nurlanishining energiya qiymati hisoblanadi, birligi W/m^2 .

Quyosh bilan Yer orasidagi masofa katta bo‘lganligi uchun nisbiy o‘zgarish juda kichik bo‘lib, Yer atmosferasining yuqori chegarasida Quyosh nurlanishi intensivligining nisbiy o‘zgarishi buning natijasida $\pm 3.4\%$ dan oshmaydi. Demak, Yer atmosferasining yuqori chegarasida Quyosh nurlanishining intensivligi asosan doimiy bo‘lib, shuning uchun bu nurlanish Quyosh doimiysi deb ataladi. Quyosh va Yer orasidagi o‘rtacha masofa $1.496 \cdot 10^8$ kmni tashkil qiladi. 1981-yilda Jahon meteorologiya tashkiloti (WMO - World Meteorological Organization) Quyosh konstantasining optimal qiymatini tavsiya qildi:

$$I_{SC} = (1367 \pm 7) W/m^2$$

Yuqoridagi ta’rifdan bilamizki, I_{SC} bu Quyosh va Yer orasidagi o‘rtacha masofadagi astronomik nurlanish intensivligi. Agar ma’lum bir kunda atmosferaning yuqori chegarasining astronomik nurlanish intensivligi I_0 (peshin vaqtiga, balandlik burchagiga to‘g‘ri keladi 90°) bo‘lsa, u holda

$$I_0 = I_{SC} \left[1 + 0.034 \cos\left(\frac{2\pi n}{365}\right) \right] = I_{SC} r \quad (1)$$

bu yerda, n yanvardan boshlab kunlar soni; r Quyosh va Yer orasidagi masofadan kelib chiqqan tuzatish qiymati; vertikal bo‘lmagan yoritish uchun (1) tenglamaga ko‘ra, gorizont tekislikka yetib boradigan Quyosh nurlanishining intensivligi va Quyosh doimiysi o‘rtasida quyidagi bog‘liqlik mavjud:

$$I = I_0 \sin h \quad (2)$$

bu formulada, h Quyosh balandligi burchagi.

Discussion. Yer yuzasiga yetib boruvchi Quyosh nurlanish energiyasi quyidagicha bo‘ladi: Yer yuzasiga yetib boruvchi Quyosh nurlanish energiyasini taxminan uch qismga bo‘lish mumkin:

Birinchi qism issiqlik energiyasiga aylanadi, bu esa Yerning o‘rtacha haroratini ushlab turadi - taxminan $14^\circ C$, bu esa turli organizmlarning yashashi va rivojlanishi uchun qulay tabiiy muhitni yaratadi, shu bilan birga, Yer yuzidagi suvning doimiy ravishda bug‘lanishiga olib keladi, buning natijasida yillik global yog‘ingarchilik, ularning ko‘p qismi okeanga tushadi va oz qismi quruqlikka tushadi.

Ikkinchi qism dengiz suvi va atmosferaning konveksiya harakatini targ‘ib qilish uchun ishlatiladi. Bu okean oqimi energiyasi, to‘lqin energiyasi va shamol energiyasining kelib chiqishini ifodalaydi.

Uchinchi qism o‘simliklar barglarida xlorofill tomonidan ushlanib, fotosintez uchun energiya manbai bo‘ladi.

1) Yerga yetib kelgan Quyosh radiatsiyasining bir qismi to‘g‘ridan-to‘g‘ri parallel yorug‘lik shaklida keladi, bu to‘g‘ridan to‘g‘ri radiatsiya deb ataladi, boshqa qismi esa tarqoq nurlanish deb ataladi, bu esa Yer yuzasi (faol radiatsiya) tomonidan yuqoriga ko‘tariladi. Shunday qilib, umumiy radiatsiya E_g uch qismni o‘z ichiga oladi: gorizont yuzada to‘g‘ridan-to‘g‘ri Quyosh nurlanishi S_1 , tarqalgan radiatsiya E_d va qisqa

to'liqlik aks ettirilgan nurlanish E_r . Ba'zan qulaylik uchun tarqoq nurlanish E_d va qisqa to'liqlik aks ettirilgan radiatsiya E_r umumiy ravishda tarqoq (sochilgan) radiatsiya deb ataladi E_d .

2) Yer yuzasida Quyosh radiatsiyasi energiyasiga ta'sir qiluvchi astronomik omillar: Quyosh va Qer orasidagi masofa, Quyosh egilishi va Quyosh soati burchagi.

- Geografik omillar: geografik joylashuv, balandlik.

- Jismoniy omillar: Quyosh nurlanishini qabul qiluvchi sirtning fizik va kimyoviy xossalari, shu jumladan, sirt qoplamining xususiyatlari.

- Geometrik omillar: Quyosh nurlanishini qabul qiluvchi sirtning moyillik burchagi (biror sirtning gorizont tekislikka nisbatan qanchalik qiyalashganligini ko'rsatuvchi burchak) va azimuti (yo'nalishni aniqlash uchun ishlatiladigan burchak bo'lib, u shimol yo'nalishidan boshlab janubga tomon soat strelkasi bo'ylab o'lanadi).

Atmosferadagi turli gazlar, suv tomchilari, chang va boshqa aralashmalar Quyosh nurini susaytiradi. Atmosferaning Quyosh radiatsiyasiga susaytiruvchi ta'siri atmosferaning susayishi deyiladi. Atmosfera Quyosh nuri uchun shaffof bo'lmagan muhit bo'lib, asosiy susaytirish effektlari yutilish, tarqalish va diffuz aks etishni o'z ichiga oladi. Atmosferaning zaiflashishi Quyosh nurining atmosfera bo'ylab o'tadigan yo'lining uzunligi bilan bog'liq, yo'l qanchalik uzoq bo'lsa, zaiflashuv shunchalik katta bo'ladi va yo'lining uzunligi Quyosh balandligi bilan bog'liq [5].

Quyosh nurlanishi Yer atmosferasiga kirar ekan, Yer sirtiga yoki tanlangan sirt yuzasiga yetib kelguncha, u o'z harakati davomida yutilishi, qaytishi va sochilishi mumkin. Gorizont va gorizontga nisbatan burchak ostida o'rnatilgan qiya tekislik yuzasiga tushadigan Quyosh nurlanish energiyasini aniqlashda quyidagi keltirib o'tilgan asosiy tushunchalar va kattaliklardan foydalaniladi:

Atmosfera massasi m - to'g'ri tushuvchi nurining ma'lum bir vaqt ichida bosib o'tgan yo'l uzunligining Quyosh zenitida bo'lgan yo'lining uzunligiga nisbati.

To'g'ri tushuvchi nurlanish (DNI-Direct Normal Irradiance) – Quyoshdan yo'nalishni o'zgartirmasdan (sochilishsiz) kelayotgan nurlanish.

Tarqoq (yoki diffuz) nurlanish (DHI-Diffuse Horizontal Irradiance) – atmosfera tomonidan akslanishi va sochilishi tufayli yo'nalishini o'zgartirgandan Quyoshdan kelayotgan nurlanish. Adabiyotlardagi tarqoq (sochilgan) nurlanish ko'pincha osmon radiatsiyasi yoki Quyosh nurlanishi deb ataladi. Bu Yerda berilgan ta'rif tarqoq nurlanishni atmosferadan chiqadigan infraqizil nurlanish bilan aralastirmaslik uchun ishlatiladi.

Umumiy (yig'indi) Quyosh nurlanishi (GHI-Global Horizontal Irradiance) - to'g'ri tushuvchi va tarqoq nurlanish yig'indisi. Ko'p hollarda gorizont yuzaga tushayotgan umumiy Quyosh nurlanishi o'lanadi.

Energiya intensivligi yoki nurlanish oqimi zichligi, W/m^2 - birlik yuzaga vaqt birligi ichida tushayotgan yorug'lik energiyasining shu sirt yuzasiga nisbati. Energetik yoritilganlikni ifodalash uchun to'g'ri tushuvchi, tarqoq yoki spektral nurlanish uchun tegishli indekslar ega G belgisi ishlatiladi.

Tushayotgan Quyosh nurlanishi (yoki energiya ekspozitsiyasi), J/m^2 (Wh/m^2)-ma'lum vaqt davomida, odatda, bir soat yoki bir sutka davomida sirt yuzasi birligiga tushadigan energiya. Ko'pincha, asosan, Quyosh energetikasida ishlatiladigan "insolyatsiya" atamasi Quyosh nurlanishining energiya ekspozitsiyasiga ham tegishlidir. H belgisi kun davomidagi insolyatsiyani ko'rsatish uchun ishlatiladi va I - bir soat (yoki boshqa davr) davomida. H va I o'lchamlari to'g'ri tushuvchi, tarqoq yoki yig'indi nurlanishga, shuningdek, har qanday yo'nalishli tekisliklar uchun o'rinli.

Quyosh nurlanishi yuqorida aytilganidek, umumiy, to'g'ridan to'g'ri tushuvchi va tarqoq (diffuz) shakllarda ifodalanadi: Umumiy Quyosh nurlanishi: bu Yer atmosferasiga keladigan barcha Quyosh energiyasining yig'indisidir. To'g'ridan to'g'ri tushuvchi Quyosh nurlanishi: Bu Quyoshdan kelayotgan nurlarning to'g'ridan to'g'ri Yer yuzasiga tushayotgan qismini anglatadi. Ushbu nurlanish yo'lda hech qanday to'siqsiz yoki yutilishsiz Yerga yetib keladi. Tarqoq (diffuz) Quyosh nurlanishi: bu Yer atmosferasiga kirgan Quyosh nurlanishining qisman atmosferada yutilishi va qaytishi natijasida Yer yuzasiga tarqoq shaklda yetib keladigan qismidir. Bu nurlanish turli bulutlar, chang va boshqa zarrachalar tomonidan tarqoq bo'lib, diffuz shaklda Yerga yetib keladi [6, 42-46 b.].

Xulosa. Shunday qilib Yerda Quyosh nurlanishining fizik mohiyatini quyidagicha izohlash mumkin, ya'ni shaffof muhitda elektromagnit to'liqlik tarzida energiyaning ko'chish jarayoni sodir bo'ladi. Kvant nazariyasiga ko'ra elektromagnit to'liqliklar - bu fotonlar oqimi yoki vakuumda yorug'lik tezligi bilan tarqaluvchi tinch nol massaga ega elementar zarralardir.

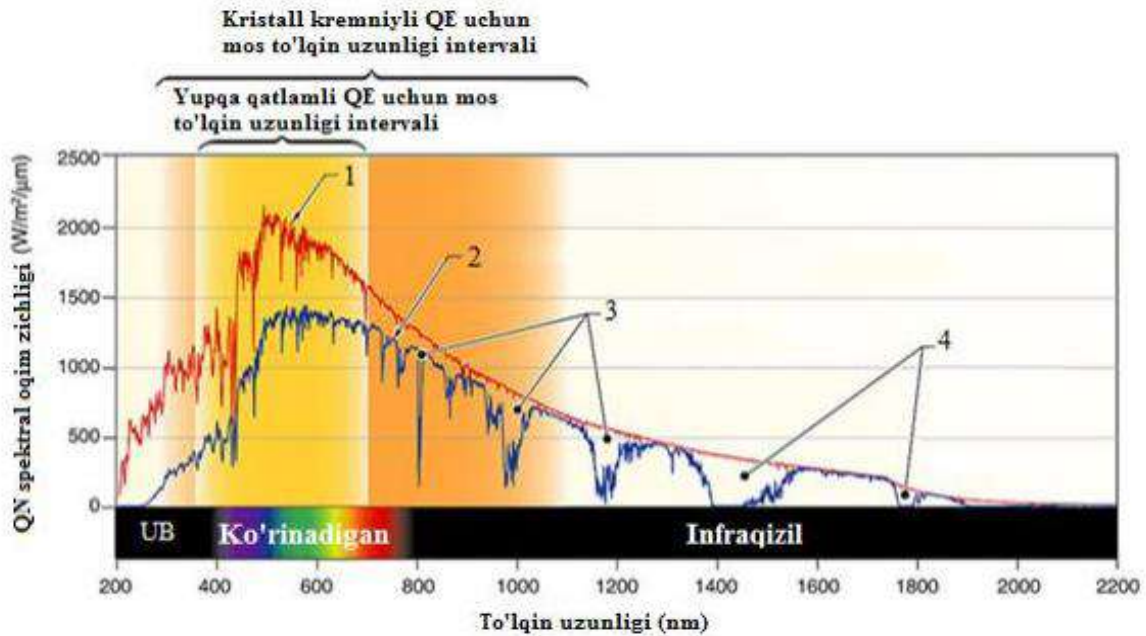
Kosmosda $1 m^2$ yuzadan 1 s davomida $4 \cdot 10^4$ ta foton o'tadi, uning energiyasini quyidagicha ifodalash mumkin:

$$E_f = h * \nu \quad (3)$$

$$\nu = \frac{c}{\lambda} \quad (4)$$

$$E_f = \frac{hc}{\lambda} \quad (5)$$

bu yerda $h=6,626176 \cdot 10^{34} \text{ J} \cdot \text{s}$, ν – elektromagnit to‘lqinlar chastotasi, λ – to‘lqin uzunligi. Quyosh nurlanish energiyasining 99% qismi 0,1÷3 mkm oralig‘idagi to‘lqin uzunligiga to‘g‘ri keladi. Quyosh spektri uchta sohadan tashkil topib, ular ultrabinafsha ($\lambda < 0,38 \text{ mkm}$), spektrning ko‘rinadigan qismi ($0,38\text{mkm} < \lambda < 0,78 \text{ mkm}$), infraqizil nurlanish ($0,78 \text{ mkm} < \lambda < 3 \text{ mkm}$) hisoblanadi (1-rasm).



1-rasm. Kosmosda va Yer atmosferasida Quyosh nurlanishi spektrining taqsimlanishi [3, 10-12 b.].

Quyosh nuri oqimi radiatsiyasi hamda nur tushgan sirt yoki muhitning radiatsion xossalarini o‘rganuvchi meteorologiya bo‘limiga aktinometriya deb yuritiladi. To‘g‘ri Quyosh radiatsiyasi aktinometr bilan, sochilgan va yig‘indi radiatsiyalari esa pironometrlar bilan o‘lchanadi. Albatta, har bir kvadrat metr yuzaga bir kunda tushayotgan Quyosh radiatsiyasi miqdori joyning geografik kengligiga, uning Quyosh nuriga nisbatan og‘ish burchagi va oriyentatsiyasiga bog‘liqdir. Shunga asosan Quyoshning og‘ish burchagi

$$\delta = 23,45 \sin\left(360 \frac{284 + n}{360}\right), n = 1, 2, 3 \quad (6)$$

Quyoshning balandlik burchagi α - gorizont tekislik bilan Quyosh nurlari va ularning proyeksiyalari orasidagi burchakdir:

$$\alpha = z + 90^\circ.$$

Quyoshning azimuti α - gorizont tekislik bilan Quyosh nurlari proyeksiyasining janubiy yo‘nalish bilan tashkil etgan burchagidir [2, 15-16 b.].

Quyosh nurlanishi bilan bog‘liq ma‘lumotlarni aktinometrik asboblarda bajaradi, yana ularni radiometrlar deb atashadi: *piranometrlar* - gorizont yuzaga to‘g‘ri keladigan yig‘indi radiatsiyani, hamda osmondan kelayotgan tarqoq (diffuz) radiatsiyani o‘lchaydi; *aktinometrlar va pirgeliometrlar* - Quyoshdan va uning atrofidagi osmonning 5° radiusidagi Quyosh atrofi zonasidan to‘g‘ri chiqayotgan Quyosh radiatsiyasini o‘lchaydi (2-rasm).



2-rasm. Aktonimetr va piranometr

Albedometr. Albedometr - o'zgaruvchan bulutlikda albedoni (jism sirtining yorug'lik yoki nurlanishni qaytarish qobiliyati) o'lchashga imkon beradigan, 2 ta piranometrdan iborat tizim. Albedometr - Yerning faoliyatli yuzasidan qaytarilgan Quyosh radiatsiyasini o'lchaydi. Ma'lumki, Albedo, bu har qanday jism yuzasini unga tushadigan nurlanishni qaytarish (yoyish) qobiliyatini tavsiflovchi kattalik. Albedometrning ishlash prinsipi osmondan va Quyoshdan yuzaga tushadigan hamda u yuzaga tushib qaytarilgan nurlanishni o'lchashga asoslangan. Bu tubdan qaralganda, Yer yuzini o'rganish uchun havo sharlariga, keyinchalik samolyot va sun'iy yo'ldoshlarga o'rnatilgan spektrofotometrlarni birinchi aksi kabidir. Bu ma'lumotlar iqlimshunoslik, qishloq va suv xo'jaligi, qurilish va boshqa sohalardagi keng doiradagi mutaxassislarga zarur hisoblanadi (3-rasm).



3-rasm. Albedometr

Balansomer. Balansomer - Yerning faoliyatli yuzasidagi qoldiq radiatsion balansini aniqlash uchun qo'llaniladi (4-rasm). Radiatsion balans Quyoshning to'g'ri radiatsiyasiz o'lchanadi, buning uchun balansomerni qabul qiluvchi yuzasi ekran bilan to'siladi. Bir vaqtning o'zida aktinometr bilan to'g'ri radiatsiya o'lchanadi. To'liq balans olish uchun gorizontaldagi to'g'ri radiatsiya kattaligi to'silgan balansometrda o'lchangan qiymatga qo'shiladi. Ko'proq zamonaviy balansomerlar boshqa prinsipga asoslangan. Asbobda ikkita radiatsiya qabul qilgich bo'lib, bittasi yuqoriga qaratilgan va faoliyat yuzaga tushayotgan radiatsini yutadi, ikkinchi qabul qilgich pastga qaratilgan va faoliyat yuzasiga tushmaydigan barcha turdagi radiatsiyalarni yutadi.



4-rasm. Balansomer

Oxirgi aktinometrik asbob – geliograf yoki uni yana Quyosh yarqirashini qayd qiluvchi deb aytiladi. Geliograf - Quyoshning yoritish davomiyligini, ya'ni Quyoshning bulutlar bilan qoplanmagan vaqtini avtomatik tarzda qayd qilish uchun ishlatiladi (5-rasm). Bu asboblarni o'lchov natijalariga qisqa va uzoq muddatli ob-havo ma'lumotlari tuzish uchun, iqlimlar paydo bo'lishini o'rganuvchi iqlimshunoslik uchun, Yer shari iqlimi klassifikatsiyasini tavsiflash, insoniyat va boshqa hayot faoliyati uchun kerakli o'simliklarni yetishtirishni rejalashtirish uchun qishloq xo'jaligini bio va agro iqlimshunosligini o'rganish uchun statistik ma'lumotlar yig'uvchi meteorologlar juda muhtojdirlar [3, 25-31 b.].



5-rasm. Geliograf

Misol tariqasida piranometr yordamida yig'indi va sochilgan Quyosh radiatsiyasini o'lchash tajriba ishini ko'rishimiz mumkin [4, 290-292 b.].

Har qanday gelioqurilmaga, istalgan og'ma sirtga, o'simliklar bargiga va hokazolarga to'g'ri va sochilgan Quyosh radiatsiyasi doimo bir vaqtda tushadi. Odatda gorizonttal sirtga bir vaqtda tushuvchi to'g'ri Quyosh radiatsiyasi va sochilgan Quyosh radiatsiyasini yig'indi radiatsiyasi deb ataladi. Yig'indi Quyosh radiatsiyasining intensivligini Q bilan belgilaylik.

$$Q = S + D = S \sin h + D \quad (7)$$

Bu yerda h – Quyosh balandligi (Quyoshning ufqdan balandlik burchagi $\sin h$ to'g'ri nurlarni gorizonttal sirtga proyeksiyalash uchun ishlatiladi), S - to'g'ri Quyosh radiatsiyasini tik sirtidagi intensivligi, D – sochilgan (atmosfera sochilib, gorizonttal sirtga tushayotgan) Quyosh radiatsiyasi intensivligi. Yig'indi Quyosh radiatsiyasining sutka va yil davomida o'zgarishini bilish amaliy ahamiyatga ega.

Yig'indi Quyosh radiatsiyasining tarkibi ham Quyoshning gorizontdan balandligi, atmosferaning tiniqligi, joyning geografik kengligiga qarab o'zgaradi. Bulutsiz kunlar ko'p bo'lgan joylarda yig'indi Quyosh radiatsiyasining asosiy qismini to'g'ri Quyosh radiatsiyasi tashkil qiladi. Havu ochiq kuni Quyoshning balandligi oshgan sari to'g'ri radiatsiyaning qiymati (sochilgan radiatsiyaga) qaraganda orta boshlaydi. Tush vaqtida maksimal qiymatga erishadi, kunning ikkinchi yarmida esa oshib boradi. Havu bulut bo'lganda yig'indi radiatsiya oqimi oshishi yoki kamayishi mumkin. Masalan, bulut Quyosh diskini butunlay qoplamagan vaqtda Yerga tushadigan yig'indi radiatsiyaning qiymati havu ochiq bo'lgandagiga qaraganda ochiq bo'ladi. Quyosh diski bulut bilan to'liq qoplanganida (to'la bulutlanishida) esa yig'indi radiatsiya faqat

PHYSICS

sochilgan radiatsiyadan iborat bo‘ladi. Shuning uchun yig‘indi radiatsiyaning qiymati havo ochiq holdagidan ozayib ketadi. Yerdagi qor yig‘indi radiatsiyasi tarkibidagi sochilgan radiatsiya ulushini oshiradi.

Endi yig‘indi va sochilgan radiatsiyani o‘lchash usuli bilan tanishaylik. Yig‘indi va sochilgan radiatsiyani o‘lchash uchun Yu.D.Yanishevskiy piranometri ishlatiladi. Bu asbobning ishlash prinsipi termoelektrik effekt hodisasiga asoslangan bo‘lib, asosiy ishchi qismi termobareyadan iborat. Termobatareya bir – biriga ketma – ket ulangan (kavsharlangan) manganan va konstantan polosalardan iborat. Barcha polosalar gorizontall tekislikda joylashtirilib, yorug‘lik nurlarini qabul qiladigan plastinka vazifasini bajaradi. Termobateriyaning barcha toq nomerli (isitilmaydigan) kavsharlari sirti magnezii bilan oq rangga bo‘yalgan. Piranometrning nur tushadigan termobateriyasining qora rangga bo‘yalgan katakchalari ketma – ket almashadigan qilib o‘rnatilgan.

Quyosh nurlarini qabul qiluvchi plastinka metall prizmalarga o‘rnatilib ustini yarim shar shaklidagi maxsus shishadan yasalgan qalpoq bilan qoplanadi. Bu qalpoqcha termobateriyani shamol, qor va yomg‘irdan saqlaydi. O‘lchash vaqti termobatareyaning uchlariga mahkamlangan mis simlari GSA-1 tipidagi galvanometrga ulanadi. Nur tushuvchi sirtga to‘g‘ri va sochilgan radiatsiya bir vaqtda tushadi. Ammo oq rangga bo‘yalgan katakchalar o‘ziga tushuvchi Quyosh radiatsiyasining 15 foizini yutadi, qora katakchalar esa Quyosh radiatsiyasining 98 foizini yutadi. Natijada oq va qora termokavsharlarning temperaturalarini bir – biridan farq qiladi, Bu temperaturalar ayirmasi nurni yutadigan sirtga tushuvchi radiatsiya kattaligiga to‘g‘ri proporsionaldir. Termobatareyada temperaturalar ayirmasiga proporsional ravishda termotok hosil bo‘ladi (zanjir berk bo‘lganda). Termotok kattaligini asbobga ulangan galvanometr strelkasining og‘ishidan bilamiz. Galvanometr strelkasining ko‘rsatishlarini W/m^2 da ifodalash uchun galvanometr strelkasi ko‘rsatishini shu piranometr va galvanometr gagina tegishli bo‘lgan K – doimiylikka ko‘paytirib olinishi kerak. K – aktinometrik doimiylik deyiladi va biz ishlatiladigan piranometr – galvanometr tizimi uchun $K = 11$ ga teng.

Ishning bajarish tartibi: O‘lchash ishlarini boshlashdan 30 minut oldin piranometr ochiq maydonchaga o‘rnatiladi, chunki uning qismlarini temperaturasi atrofidagi havo temperaturasi bilan tenglashishi kerak. So‘ngra piranometr oyoqchalarini burash yo‘li bilan termobatareyani aniq gorizontall holatga keltiriladi.

O‘lchash ishlari quyidagi tartibda olib boriladi:

1. Piranometr termobatareyasidan chiqqan ikta simni GSA-1 tipidagi galvanometrning “+” va “S” deb yozilgan klemmalariga ulanadi.

2. G‘ilof olib qo‘yiladi va ekran (soyabon) bilan piranometrni to‘g‘ri radiatsiyadan to‘siladi. Oradan 20 sekund o‘tgach galvanometr ko‘rsatishini N_1 aniqlanadi. So‘ngra har 20 sekundda galvanometr ko‘rsatishlari N_2 va N_3 aniqlanadi.

3. To‘suvcchi ekranni olib qo‘yib yuqoridagi tartibda o‘lchab, N_4 , N_5 va N_6 lar aniqlanadi.

4. Piranometrni ekran bilan yana to‘siladi qo‘yiladi va N_7 , N_8 , N_9 lar aniqlanadi.

5. Piranometrni g‘ilofi bilan yopib qo‘yib galvanometr strelkasining keyingi nol holati N_0 aniqlanadi.

6. Sochilgan radiatsiya intensivligini quyidagi formula bo‘yicha aniqlanadi.

$$D = K \left(\frac{N_1 + N_2 + N_3 + N_7 + N_8 + N_9}{6} - \frac{N_0^1 + N_0^4}{2} \right) \quad (8)$$

7. Gorizontall sirtga tushadigan yig‘indi radiatsiya intensivligini quyidagicha hisoblanadi:

$$Q = K \left(\frac{N_4 + N_5 + N_6}{3} - \frac{N_0 + N_0}{2} \right) \quad (9)$$

Tajribalar bir necha marta o‘tkazilib, olingan natijalar quyidagi 1-jadvalga yozib qo‘yiladi.

1-jadval

Tajriba o‘tkaziladigan kun	Vaqt	Sochilgan radiatsiya intensivligi, Vt/m^2	Yig‘indi radiatsiya intensivligi, Vt/m^2

ADABIYOTLAR:

1. Muhitdinov M.M., Ergashov S.F., Isaqulov J.I. “Quyosh energiyasidan foydalanish” O‘zbekiston Respublikasi Fanlar akademiyasi “Fan” nashriyoti. Toshkent. 1999-yil. 192 bet.

2. Shoimqulov B.A., Xayriddinov B.E., Xolmirzayev N.S., Halimov G‘.G‘., Vardiyashvili A.A. “Quyosh energiyasidan foydalanishning fizik asoslari”. O‘quv qo‘llanma. Toshkent. “Akademik” nashriyoti. 2019-yil. 208 bet.

3. Yuldoshev I.A., Tursunov M.N., Shog‘o‘chqorov S.Q., Jamolov T.R. “Quyosh energetikasi”. O‘quv qo‘llanma. - Toshkent. 2019-yil. - 183 b.

PHYSICS

4. Qahhorov S.Q., Jo'rayev H.O., Jamilov Y.Y., Hamdamova N.M. *Qayta tiklanuvchi energiya manbalari. O'quv qo'llanma. Buxoro: "Durdona" nashriyoti. 2021-y. 224 b.*
5. Eshboltayev I.M., Erkinova M.M., G'ofurov S.Z. "Quyosh nurlaring radiatsiyasi va energiyasini o'rganish usullari" *Advances in Science and Education, 2025, 12-14 b.*
6. Avezova N.R., Raximov E.Yu. *O'zbekistonning gelioenergetik resurslarini baholash uchun ma'lumotlar bazasini shakllantirish va verifikatsiyalash. Monografiya / Qarshi. «Ilm-fan-ma'naviyat» nashriyoti, 2025-yil, 156-bet.*

**BOLALAR OVQATLANISHI UCHUN FERMENTLANGAN SUT MAHSULOTLARI
MIKROBIOLOGIYASI**

Akbarov Mansur Muxtorovich,
Qarshi davlat texnika universiteti dotsenti, PhD
mansurxon 7801@gmail.com
Uzoqova Shirin Ibrohimovna,
Qarshi davlat texnika universiteti katta o'qituvchisi
uzoqovashirin 120@gmail.com
Egamberdiyeva Marjona Xusniddin qizi,
Qarshi davlat texnika universiteti katta o'qituvchisi
egamberdiyevamarjona286@gmail.com

Annotatsiya. Ushbu maqolada bolalar ovqatlanishida muhim o'rin tutuvchi fermentlangan sut mahsulotlarining mikrobiologik xususiyatlari tahlil qilinadi. Tadqiqotda yogurt, kefir va boshqa fermentlangan mahsulotlar tarkibidagi foydali mikroorganizmlar, xususan, sut kislotali bakteriyalar va ularning bolalar organizmiga ta'siri o'rganilgan. Fermentatsiya jarayonida mikroflora tarkibining shakllanishi, patogen mikroorganizmlarni bostirish xususiyatlari hamda mahsulot xavfsizligini ta'minlash omillari yoritilgan. Shuningdek, ushbu mahsulotlarning hazm bo'lish darajasi, immun tizimni mustahkamlashdagi roli va ichak mikrobiotasiga ijobiy ta'siri ilmiy asosda baholangan. Tadqiqot natijalari bolalar uchun mo'ljallangan fermentlangan sut mahsulotlarini ishlab chiqarishda mikrobiologik nazoratni kuchaytirish va sifat ko'rsatkichlarini oshirish zarurligini ko'rsatadi.

Kalit so'zlar: fermentlangan sut mahsulotlari, bolalar ovqatlanishi, mikrobiologiya, sut kislotali bakteriyalar, probiotiklar, yogurt, kefir, mikroflora, oziq-ovqat xavfsizligi, fermentatsiya jarayoni, ichak mikrobiotasi, immunitet.

**АНАЛИЗ МИКРОБИОЛОГИИ ФЕРМЕНТИРОВАННЫХ МОЛОЧНЫХ ПРОДУКТОВ
ДЛЯ ДЕТСКОГО ПИТАНИЯ**

Аннотация. В данной статье анализируются микробиологические особенности ферментированных молочных продуктов, занимающих важное место в питании детей. В исследовании изучены полезные микроорганизмы, содержащиеся в йогурте, кефире и других ферментированных продуктах, в частности молочнокислые бактерии и их влияние на организм детей. Рассмотрены процессы формирования микрофлоры в ходе ферментации, свойства подавления патогенных микроорганизмов, а также факторы, обеспечивающие безопасность продукции. Кроме того, на научной основе оценены степень усвояемости данных продуктов, их роль в укреплении иммунной системы и положительное влияние на кишечную микробиоту. Результаты исследования показывают необходимость усиления микробиологического контроля и повышения показателей качества при производстве ферментированных молочных продуктов, предназначенных для детей.

Ключевые слова: ферментированные молочные продукты, детское питание, микробиология, молочнокислые бактерии, пробиотики, йогурт, кефир, микрофлора, пищевая безопасность, процесс ферментации, кишечная микробиота, иммунитет.

**ANALYSIS OF THE MICROBIOLOGY OF FERMENTED DAIRY PRODUCTS FOR
CHILDREN'S NUTRITION**

Abstract. This article analyzes the microbiological characteristics of fermented dairy products that play an important role in children's nutrition. The study examines beneficial microorganisms present in yogurt, kefir, and other fermented products, particularly lactic acid bacteria and their effects on the child's organism. The formation of microflora during fermentation, the ability to suppress pathogenic microorganisms, and the factors ensuring product safety are discussed. In addition, the digestibility of these

products, their role in strengthening the immune system, and their positive impact on gut microbiota are scientifically evaluated. The results indicate the need to enhance microbiological control and improve quality indicators in the production of fermented dairy products intended for children.

Key words: *fermented dairy products, children's nutrition, microbiology, lactic acid bacteria, probiotics, yogurt, kefir, microflora, food safety, fermentation process, gut microbiota, immunity.*

Kirish. Bolalar sogʻlom rivojlanishi va immun tizimining mustahkamlanishi bevosita ularning toʻgʻri va muvozanatli ovqatlanishiga bogʻliq. Shu nuqtayi nazardan qaralganda, fermentlangan sut mahsulotlari – masalan, qatiq, kefir, tvorog, biolakt kabi mahsulotlar – bolalar ratsionida alohida oʻrin egallaydi. Ushbu mahsulotlar nafaqat yuqori biologik qiymatga ega boʻlgan oqsillar, vitaminlar va minerallar bilan boy, balki foydali mikroorganizmlar – probiotiklar manbayi hamdir. Fermentlangan sut mahsulotlarining mikrobiologik sifati esa bolalar salomatligi uchun hal qiluvchi ahamiyatga ega boʻlib, ularning xavfsizligi va sifat koʻrsatkichlari chuqur tahlil etilishi lozim.

Mikrobiologik jihatdan xavfsiz mahsulotlar ishlab chiqarish zamonaviy oziq-ovqat sanoatining muhim vazifalaridan biri hisoblanadi. Fermentatsiya jarayoni davomida mikroflora tarkibining oʻzgarishi, patogen bakteriyalarning yoʻq qilinishi va foydali mikroorganizmlarning koʻpayishi natijasida mahsulot sogʻliq uchun foydali holga keladi. Ammo notoʻgʻri ishlab chiqarish, saqlash yoki transport qilish natijasida bu mahsulotlar patogen mikroorganizmlar bilan ifloslanishi mumkin. Shu sababli, ularning mikrobiologik koʻrsatkichlarini nazorat qilish bolalar sogʻligʻi nuqtayi nazaridan dolzarb masaladir.

Ushbu maqola maqsadi – bolalar ovqatlanishida keng qoʻllanilayotgan fermentlangan sut mahsulotlarining mikrobiologik holatini, sanitariya-gigiyenik talablar asosida tahlil qilish, foydali mikroorganizmlarning roli va xavfsizlik omillarini oʻrganishdir. Shuningdek, Prezidentimiz qarorlari va tegishli meʼyoriy hujjatlar asosida bolalar uchun moʻljallangan fermentlangan sut mahsulotlariga qoʻyiladigan gigiyenik va sifat talablarini oʻrganish ham ushbu tahlilning dolzarbligini belgilaydi.

Shu tarzda olib boriladigan mikrobiologik tahlil natijalari bolalar salomatligini muhofaza qilishda ishonchli oziq-ovqat xavfsizligi tizimini shakllantirishga xizmat qiladi.

Sut va sut mahsulotlari inson salomatligi uchun beqiyos manba boʻlib, ular toʻgʻri ovqatlanish va parhez ovqatlar tarkibida alohida oʻrin tutadi. Ularning yuqori biologik qiymati, immunitetni mustahkamlashdagi roli, shuningdek, bolalar, bemorlar va keksa yoshdagi insonlar uchun foydali xususiyatlari tufayli ularni muntazam ravishda isteʼmol qilish tavsiya etiladi. Mahsulotlar sifati esa zamonaviy texnologiyalar va davlatning qatʼiy nazorat tizimi orqali taʼminlanmoqda.

Savdoga asosan sigir suti pasterizatsiya qilib chiqariladi. Uni quyidagi turda ishlab chiqariladi.

Sof tabiiy sut. Bunday sut normallashtirilgan, tarkibidagi yogʻ 3.2% ga yetkazilgan va tiklangan, butunlay yoki qisman quruq sigir sutidan hosil qilingan (bunda xam yogʻi 3,2%) boʻlishi mumkin.

Yogʻi koʻpaytirilgan sut tabiiy yoki tiklangan sutdan, yogʻliligini qaymoq qoʻshib 6% ga yetkazib va gomogenlab (bir jinsli qilib) tayyorlanadi.

Qaynatilgan sut deb, yogʻliligi qaymoq qoʻshib 6% ga yetkazilib, gomogenlangan va uzoq vaqt davomida yuqori haroratda termin ishlov berilgan sutni aytiladi.

Seroqsil sut deb, tarkibida quruq yogʻsizlantirilgan moddalari koʻp sutni aytiladi. Uni normallashtirilgan sutga quruq yoki quyultirilgan sof sut qoʻshib ishlab chiqariladi. Uning yogʻliligi 2,5% boʻladi.

Vitaminlangan sut — bu pasterizatsiya qilib, C vitamini qoʻshilgan sof yoki yogʻsiz sut.

Yogʻsiz sut sutni butunlay separatoridan oʻtkazib olingan sutdir.

Qaymoq. Bu sutning eng yogʻli qismi. Qaymoq tabiiy—sof sigir sutini separatoridan oʻtkazib olingan va tiklangan—quruq qaymoqdan hosil qilingan boʻlishi mumkin.

1-jadval.

Turli hayvonlar sutining oʻrtacha kimyoviy tarkibi (suv, yogʻ, oqsil, laktoza, kul moddalari) koʻrsatilgan **jadval** keltirilgan:

№	Hayvon turi	Suv (%)	Yogʻ (%)	Oqsil (%)	Laktoza (%)	Kul moddasi (%)
1	Sigir	87.0	3.5	3.2	4.8	0.7
2	Qoʻy	80.7	6.5	5.7	4.6	0.9

BIOLOGY

3	Echki	86.5	4.5	3.6	4.7	0.8
4	Ot	89.0	1.3	2.0	6.2	0.5
5	Tuya (bir tuya)	87.0	4.0	3.5	5.0	0.8
6	Tuya (ikki tuya)	84.0	5.5	4.0	4.2	0.9
7	Bug‘u	66.0	13.0	10.3	2.5	1.0
8	Buqa baliq (ayiq)	60.0	25.0	11.0	1.0	3.0

- **Laktoza** – sut shakaridir, bolalar ovqatlanishida muhim rol o‘ynaydi.

- **Kul moddasi** – mineral moddalar tarkibini ifodalaydi (kalsiy, fosfor va h.k.).

- Bu qiymatlar o‘rtacha hisoblanadi, hayvon zotiga, yil fasliga va oziqlanish sharoitiga qarab biroz farq qilishi mumkin.

Bolalar organizmi jadal o‘shish va rivojlanish bosqichida bo‘lgani sababli ularning ovqatlanish ratsioni maksimal darajada to‘yimli, muvozanatli va biologik qiymati yuqori mahsulotlarga boy bo‘lishi zarur.

Bolalar organizmi jadal o‘shish va rivojlanish davrida bo‘lgani sababli, ularning ovqatlanishi tarkibida biologik qiymati yuqori bo‘lgan mahsulotlar alohida ahamiyat kasb etadi. Bu mahsulotlar organizm tomonidan oson hazm qilinadi, muhim ozuqa moddalari — oqsillar, yog‘lar, uglevodlar, vitaminlar va minerallar bilan boy bo‘ladi. Biologik qiymat deganda mahsulotdagi ozuqa moddalarning miqdori emas, balki ularning organizmga foydaliligi va o‘zlashtirilish darajasi tushuniladi.

Biologik qiymati yuqori oziq-ovqatlar — bu inson organizmiga to‘liq hazm bo‘ladigan, muhim oziq moddalarni (ayniqsa, to‘liq oqsillar, vitaminlar, minerallar) o‘z ichiga olgan mahsulotlardir. Bu mahsulotlar bolalar salomatligi, aqliy va jismoniy rivojlanishi, immunitet tizimi faoliyatini mustahkamlashda muhim o‘rin tutadi.

Biologik qiymati yuqori mahsulotlarga quyidagilar kiradi:

1. **Sut va sut mahsulotlari** – oqsil, kalsiy, fosfor, B guruhi vitaminlari manbai. Bolalar suyak tizimi va tishlarining mustahkamlanishida muhim.

2. **Go‘sh t va go‘sh t mahsulotlari** – yuqori sifatli hayvon oqsili, temir, rux, B12 vitamini bilan ta‘minlaydi.

3. **Tuxum** – to‘liq oqsil va lektin manbai, miya faoliyati va ko‘rish qobiliyatini yaxshilaydi.

4. **Baliq** – omega-3 yog‘ kislotalari, yod va D vitamini bolalar miya va asab tizimi rivojiga foydalidir.

5. **Don mahsulotlari (jigar, rangli non, sul, grechka)** – B guruhi vitaminlari, tolalar va murakkab uglevodlar bilan boy.

6. **Sabzavot va mevalar** – antioksidantlar, vitaminlar (C, A, K), tolali moddalarning asosiy manbai.

7. **Yong‘oqlar va urug‘lar** – foydali yog‘lar, E vitamini, magniy va boshqa mikroelementlar manbai.

Biologik qiymatining sog‘liqqa ta‘siri

Biologik qiymati yuqori mahsulotlarni bolalar ovqatiga kiritish quyidagi jihatlar bilan muhim:

- **Rivojlanish uchun zarur bo‘lgan oqsillarni ta‘minlaydi** – bu mushaklar, hujayralar va fermentlar uchun asosiy qurilish materiali.

- **Immunitetni kuchaytiradi** – A, C, E vitaminlari, rux, selen kabi moddalar bilan ta‘minlaydi.

- **Nevrologik rivojlanishni qo‘llab-quvvatlaydi** – omega-3 yog‘ kislotalari, B12 va foliy kislotasi miya rivojida ishtirok etadi.

- **Temir tanqisligi kamqonligini oldini oladi** – ayniqsa, hayvon kelib chiqishidagi temir manbalari (go‘sh t, jigar).

- **Ichak faoliyatini yaxshilaydi** – tolalar (cellulose), probiotiklar hazm jarayonini optimallashtiradi.

Biologik qiymati yuqori mahsulotlar bolalar salomatligi, ularning intellektual va jismoniy rivojlanishida beqiyos ahamiyatga ega. Ular organizmni zarur modda va energiya bilan ta‘minlab, kasalliklarning oldini olishda ham muhim rol o‘ynaydi. Shuning uchun bolalar ratsionida bunday mahsulotlarning bo‘lishi majburiy hisoblanadi. Ularni to‘g‘ri tanlash, muvozanatli ravishda iste‘mol qilish va gigiyena qoidalariga amal qilish — sog‘lom avlod garovidir. **Bolalar uchun biologik qiymati yuqori mahsulotlarning ahamiyati** — ularning o‘sayotgan organizmga kerakli barcha muhim oziq moddalarni

ta'minlab berish xususiyati bilan belgilanadi. Quyida bu mahsulotlarning bolalar salomatligi va rivojlanishidagi o'rni to'liq yoritiladi:

Bolalar uchun biologik qiymati yuqori mahsulotlar nafaqat o'sish va rivojlanish, balki sog'lom hayot asoslarini shakllantirishda katta ahamiyatga ega. Ularni har kuni rasionga kiritish — kelajak avlod sog'lig'ining kafolati hisoblanadi.

Ichak mikroflorasiga ta'siri va immun tizimni mustahkamlashdagi o'rni.

Fermentlangan sut mahsulotlari — bu sut tarkibidagi laktozani bakteriyalar yoki achitqilar yordamida fermentatsiyalash orqali olingan oziq-ovqatlar bo'lib, ular ichki muhitni sog'lomlashtirishda va immunitetni kuchaytirishda muhim rol o'ynaydi. Ushbu mahsulotlarga qatiq, kefir, tvorog, ayran, yogurt va boshqalar kiradi. Ular **probiotik** va **prebiotik** xususiyatlari bilan ajralib turadi.

Ichak mikroflorasiga ijobiy ta'siri. Ichak mikroflorasi — bu inson ichagida yashovchi foydali va zararli mikroorganizmlar muvozanati hisoblanadi. Fermentlangan sut mahsulotlari quyidagi yo'llar orqali mikroflorani normallashtiradi:

- **Foydali bakteriyalarni (laktobakteriyalar, bifidobakteriyalar) ko'paytiradi.** Bu bakteriyalar ichakdagi patogen mikroorganizmlarning ko'payishini to'xtatadi.

- **Ichak harakatini yaxshilaydi,** qabziyatni kamaytiradi.

- **Disbioz holatlarini bartaraf etadi,** ya'ni mikroflora muvozanatini tiklaydi.

- **Laktoza intoleransi** bo'lgan odamlarda fermentlangan mahsulotlar silliqroq hazm bo'ladi, chunki fermentatsiya jarayonida laktoza parchalangan bo'ladi.

Immun tizimni mustahkamlashdagi o'rni. Fermentlangan sut mahsulotlari immunitetni bevosita va bilvosita yo'llar bilan kuchaytiradi:

- **Probiotik bakteriyalar** organizmda immun hujayralar (makrofaglar, T-limfotsitlar) faolligini oshiradi.

- **Ichakda joylashgan limfoid to'qimalar** (GALT – gut-associated lymphoid tissue) orqali organizmning umumiy immun javobini kuchaytiradi.

- **Antioksidant moddalar** (masalan, A va E vitaminlari) mavjudligi bilan hujayra himoyasini ta'minlaydi.

- **Yallig'lanish jarayonlarini kamaytiradi,** allergik reaksiyalar xavfini pasaytiradi.

Tadqiqotlar va ilmiy asoslar. Ko'plab ilmiy izlanishlar, xususan FAO va VOZ (WHO) tomonidan olib borilgan tadqiqotlar, fermentlangan mahsulotlarning immunitetga ijobiy ta'sirini tasdiqlagan. Ularga ko'ra:

- Probiotiklar organizmda **sitokinlar ishlab chiqarilishini faollashtiradi.**

- Bolalar va qariyalar orasida **yuqori nafas yo'llari infeksiyalari kamaygan.**

- **Antibiotik qabul qilganlardan so'ng** mikroflorani tiklashda samarali yordam beradi.

- **Bolalar ovqatlanishida** – fermentlangan sut mahsulotlari ovqat hazm qilishni yengillashtiradi va o'sishni rag'batlantiradi.

- **Qariyalarda** – ichak faoliyatini yaxshilab, immun tizim zaiflashuvini bartaraf etadi.

- **Sportchilar, homilador ayollar va kasallikdan keyingi tiklanish davrida** foydali hisoblanadi.

Fermentlangan sut mahsulotlari ichak mikroflorasining muvozanatini ta'minlash, zararli mikroorganizmlarni bostirish va immunitetni kuchaytirish orqali sog'lom ovqatlanish tizimining muhim bo'g'ini hisoblanadi. Har kuni oz miqdorda kefir, yogurt, yoki qatiq iste'mol qilish orqali organizmning tabiiy himoya kuchini oshirish mumkin. Bu nafaqat kasalliklardan himoya, balki umumiy salomatlikni qo'llab-quvvatlashda ham katta ahamiyatga ega.

Fermentlangan sut mahsulotlari (masalan, kefir, yogurt, tvorog, qatiq va boshqalar) inson salomatligi uchun yuqori biologik qiymatga ega bo'lgan funksional oziq-ovqat mahsulotlaridan hisoblanadi. Ular probiotik bakteriyalar — *Lactobacillus*, *Bifidobacterium*, *Streptococcus thermophilus* kabi foydali mikroorganizmlarni o'z ichiga oladi. Ushbu mikroorganizmlar organizmda bir qancha muhim biologik jarayonlarni qo'llab-quvvatlaydi, ayniqsa, **ichak mikroflorasini me'yorda saqlash va immun tizimni mustahkamlashda muhim rol o'ynaydi.**

Ichak mikroflorasiga ta'siri. Ichak mikroflorasi — bu inson ichagida yashovchi trillionlab mikroorganizmlar majmuasidir. Ular hazm jarayonida, vitaminlar sintezida va patogen mikroblarga qarshi kurashishda faol ishtirok etadi.

Fermentlangan sut mahsulotlarining ichak mikroflorasiga ijobiy ta'siri quyidagicha ifodalanadi:

- **Probiotiklar bilan boyitilgan bo'ladi,** bu esa foydali mikroorganizmlar sonini ko'paytiradi.

• Ichakdagi **disbioz holatini bartaraf etadi** — ya'ni zararli bakteriyalar faoliyatini cheklab, foydali bakteriyalarni qo'llab-quvvatlaydi.

• **Hazm qilishni yaxshilaydi**, ayniqsa laktaza fermenti yetishmovchiligi bo'lgan odamlarda fermentlangan sut mahsulotlari laktazaga bog'liq noqulayliklarni kamaytiradi.

• Ichak devorining shilliq qavati orqali foydali moddalar so'rilishini faollashtiradi.

Fermentlangan sut mahsulotlari ichak mikroflorasining me'yoriy holatini tiklash va saqlashda, shuningdek, inson immun tizimini mustahkamlashda muhim ahamiyatga ega. Ular nafaqat foydali oziq-ovqat mahsuloti, balki sog'liqni mustahkamlovchi biologik faol komponentlar manbayi hisoblanadi. Doimiy ravishda fermentlangan sut mahsulotlarini iste'mol qilish sog'lom turmush tarzining ajralmas qismiga aylanishi lozim.

Fermentatsiya (sut kislotasi va aralash fermentatsiya) orqali olingan sut mahsulotlari inson salomatligi uchun muhim o'rin egallaydi. Ular tarkibida foydali mikroorganizmlar, vitaminlar, fermentlar va boshqa biologik faol moddalar mavjud bo'lib, ovqat hazm qilish tizimini yaxshilaydi, immunitetni kuchaytiradi va ichak mikroflorasining muvozanatini saqlab turadi. Quyida keng tarqalgan fermentlangan sut mahsulotlari turlari keltiriladi:

Qatiq — eng qadimiy fermentlangan sut mahsulotlaridan biri bo'lib, ko'pincha laktik kislotali bakteriyalar yordamida tayyorlanadi (masalan, *Lactobacillus bulgaricus* va *Streptococcus thermophilus*). Odatda sigir sutidan tayyorlanadi, ba'zida echki yoki qo'y suti ham ishlatiladi.

Xususiyatlari:

- Tarkibida probiotik bakteriyalar bor.
- Ichak faoliyatini normallashtiradi.
- Kalsiy va B guruh vitaminlariga boy.

Kefir — aralash fermentatsiyadan (laktik kislotali va spirtli) o'tgan mahsulot bo'lib, kefir zamburug'lari (kefir donalari) yordamida tayyorlanadi.

Xususiyatlari:

- Tabiiy probiotik va antibiotik xususiyatiga ega.
- Immunitet tizimini mustahkamlaydi.
- Aqliy va jismoniy charchoqqa qarshi kurashishda yordam beradi.

Ryajenka — past olovda qaynab, karamel tusiga kirgan sutdan tayyorlanadigan ruscha ferment mahsuloti. *Streptococcus thermophilus* va *Lactobacillus acidophilus* kabi bakteriyalar yordamida fermentlanadi.

Xususiyatlari:

- Yumshoq ta'mli va quyuq konsistensiyali.
- Vitamin D va A ga boy.
- Bolalar va keksa yoshdagilar uchun tavsiya etiladi.

Bioyogurtlar — tirik probiotik bakteriyalar (masalan, *Lactobacillus acidophilus*, *Bifidobacterium bifidum*) bilan boyitilgan maxsus yogurt turlari bo'lib, sog'liq uchun juda foydalidir.

Xususiyatlari:

- Ichak mikroflorasini tiklaydi.
- Allergik holatlarni kamaytirishga yordam beradi.
- Organizmga antioksidant ta'sir ko'rsatadi.

Ayran — qatiqning suv bilan aralashtirib tayyorlangan suyuq shakli. Asosan Turkiston va Kavkaz mintaqasida iste'mol qilinadi.

Xususiyatlari:

- Chanqoqni qondiradi va tana haroratini tushiradi.
- Hazmni yaxshilaydi.
- Sportchilar uchun tabiiy rehidrator.

Probiotik sut. Bu mahsulotlar tarkibiga maxsus probiotik bakteriyalar qo'shilgan bo'lib, ular ichakda ko'payib, zararli mikroblarni siqib chiqaradi.

Xususiyatlari:

- Disbakteriozga qarshi kurashadi.
- Antibiotiklar qabulidan keyingi tiklanishni tezlashtiradi.
- Yuqori biologik qiymatga ega.

BIOLOGY

Sut mahsulotlari sog'liq uchun beqiyos foyda keltiradi. Ular nafaqat oziq-ovqat sifatida, balki funksional parhez vositasi sifatida ham ishlatiladi. Doimiy ravishda ushbu mahsulotlarni iste'mol qilish organizmning immun tizimini mustahkamlab, ovqat hazm qilishni yaxshilaydi, ayniqsa bolalar, homilador ayollar, keksa yoshdagilar uchun muhim ahamiyatga ega.

Mikrobiologik tekshirish usullari oziq-ovqat mahsulotlari, ichimliklar, sut va sut mahsulotlari, go'sht, baliq va boshqa iste'mol tovarlarining xavfsizligini ta'minlashda muhim ahamiyatga ega. Ushbu usullar xalqaro (ISO) va milliy (GOST) standartlarga asoslanadi hamda mahsulotlarda mikroorganizmlar soni va turi, ularning mavjudlik darajasi va sog'liq uchun xavflilik mezonlarini aniqlash imkonini beradi.

Mikrobiologik tekshiruvlar oziq-ovqat mahsulotlarining gigiyenik holatini aniqlash, ularning xavfsizligini baholash, iste'mol uchun yaroqliligini belgilashda muhim ahamiyat kasb etadi. Fermentlangan sut mahsulotlarida mikroorganizmlarning mavjudligi mahsulot sifatiga, saqlash muddatiga va inson salomatligiga bevosita ta'sir ko'rsatadi. Shu boisdan xalqaro (ISO) va davlat (GOST) standartlariga asoslangan mikrobiologik tekshiruv usullari qo'llaniladi.

2-jadval.

Asosiy mikrobiologik ko'rsatkichlar. Quyidagi mikrobiologik ko'rsatkichlar bo'yicha tekshiruvlar amalga oshiriladi

№	Ko'rsatkich nomi	O'lchash birligi	Me'yoriy chegaralar
1	Mezofil aerob va fakultativ anaerob mikroorganizmlar (KMAFAnM) soni	CFU/g yoki CFU/ml	$\leq 10^5$
2	Koliform bakteriyalar soni (shu jumladan E.coli)	CFU/g yoki CFU/ml	Yo'q bo'lishi kerak
3	Patogen mikroorganizmlar (Salmonella, Listeria monocytogenes)	Aniqlash	Yo'q bo'lishi kerak
4	Maya va mog'or zamburug'lari	CFU/g	$\leq 10^2$
5	Shtamm aktivligi (masalan, Lactobacillus acidophilus)	CFU/g	$\geq 10^7$ (probiyotiklar uchun)

3-jadval.

Mikrobiologik tekshiruvlarda qo'llaniladigan asosiy standartlar
GOST standartlari.

№	GOST raqami	Standart nomi
1	GOST 10444.15-94	Oziq-ovqat mahsulotlari. Patogenlar, shu jumladan, Salmonellani aniqlash usuli
2	GOST 10444.2-94	Koliform bakteriyalarni aniqlash
3	GOST 9225-84	Sut va sut mahsulotlari. Mikrobiologik tahlil usullari
4	GOST 30518-97	Fermentlangan sut mahsulotlari – Gigiyenik xavfsizlik normalari
5	GOST 32901-2014	Mikrobiologik tahlillar. E.coli aniqlash

4-jadval.

ISO standartlari.

№	ISO raqami	Standart nomi
1	ISO 4833-1:2013	Oziq-ovqat mahsulotlarida aerob mezofil mikroorganizmlarni aniqlash
2	ISO 6579-1:2017	Salmonellani aniqlash usuli
3	ISO 16649-2:2001	E.coli sonini aniqlash (koliformlar)
4	ISO 11290-1:2017	Listeria monocytogenesni aniqlash
5	ISO 21527-1:2008	Maya va mog'orlar sonini aniqlash

Mikrobiologik tahlil bosqichlari

1. Namuna olish – ISO 707:2008 (Sut va sut mahsulotlaridan namuna olish bo'yicha yo'riqnoma)
2. Tayyorlash – namuna hajmini aniqlash, seyreltishlar qilish (steril fiziologik eritmada)
3. Ekinlash – maqsadli muhitlarga inokulyatsiya (Ploskirev, Endo, Saburo, MRS, M17, va h.k.)
4. Inkubatsiya – 24–72 soat davomida 30–37°C haroratda o'stiriladi
5. Natijalarni baholash – koloniya sanash, aniqlash, tasniflash, CFU/g hisoblash
6. Dalolatnoma tuzish – GOST yoki ISO shakllariga muvofiq hujjatlashtirish

BIOLOGY

Nazorat va xavfsizlik. Mikrobiologik tahlillar laboratoriya xavfsizligi qoidalariga qat'iy rioya qilgan holda olib boriladi. Dezinfeksiya vositalari, steril asbob-uskunalar, shaxsiy himoya vositalari majburiy qo'llaniladi.

Sut va fermentlangan mahsulotlarning mikrobiologik xavfsizligini ta'minlash – ularning texnologik jarayonlarda sifatli nazorat qilish, xalqaro va milliy standartlarga muvofiqligini tekshirish orqali erishiladi. GOST va ISO tizimidagi aniq usullar va me'yorlar oziq-ovqat xavfsizligini ta'minlashda ishonchli asos bo'lib xizmat qiladi.

5-jadval.

Zararli mikroflora (patogenlar)

№	ISO raqami	Standart nomi	ISO raqami	Standart nomi
1	ISO 4833-1:2013	Oziq-ovqat mahsulotlarida aerob mezofil mikroorganizmlarni aniqlash	ISO 4833-1:2013	Oziq-ovqat mahsulotlarida aerob mezofil mikroorganizmlarni aniqlash
2	ISO 6579-1:2017	Salmonellani aniqlash usuli	ISO 6579-1:2017	Salmonellani aniqlash usuli
3	ISO 16649-2:2001	E.coli sonini aniqlash (koliformlar)	ISO 16649-2:2001	E.coli sonini aniqlash (koliformlar)
4	ISO 11290-1:2017	Listeria monocytogenesni aniqlash	ISO 11290-1:2017	Listeria monocytogenesni aniqlash
5	ISO 21527-1:2008	Maya va mog'orlar sonini aniqlash	ISO 21527-1:2008	Maya va mog'orlar sonini aniqlash

6-jadval.

Natijalar yozuvi namunasi.

№	Mahsulot nomi	Laktobakteriyalar (CFU/ml)	E.coli	Salmonella	Maya/zamburug'	Xulosa
1	Qatiq	$1,2 \times 10^8$	Yo'q	Yo'q	5 CFU/ml	Mos
2	Kefir	$2,1 \times 10^8$	Yo'q	Yo'q	3 CFU/ml	Mos
3	Bioyogurt	$3,5 \times 10^8$	Yo'q	Yo'q	<1 CFU/ml	Mos
4	Mahsulot nomi	Laktobakteriyalar (CFU/ml)	E.coli	Salmonella	Maya/zamburug'	Xulosa
5	Qatiq	$1,2 \times 10^8$	Yo'q	Yo'q	5 CFU/ml	Mos

Mikrobiologik tahlil usullari

Umumiy bakteriyalar soni (QMAFAnM):

• **O'simlik usuli (Plitka metodi)** – 1 ml mahsulotdan ketma-ket suyultmalar olinib, agarli muhitga sepiladi (masalan, Meat Peptone Agar, MPA).

• 30–37°C haroratda 48 soat inkubatsiya qilinadi.

• Koloniyalar sanaladi, CFU/ml (koloniya hosil qiluvchi birliklar) hisoblanadi.

Koliform bakteriyalar (E. coli va boshqa enterobakteriyalar):

• Endo yoki MacConkey muhitidan foydalaniladi.

• 37°C da 24 soat davomida inkubatsiya qilinadi.

• Qizil, sarg'ish yoki metall yaltiragan koloniyalar mavjudligi aniqlanadi.

Sut kislotasi bakteriyalari soni:

• MRS agar (De Man, Rogosa, Sharpe) muhitida yetishtiriladi.

• 30°C da 72 soat inkubatsiya qilinadi.

• Koloniya shakli, rangi va miqdori baholanadi.

Zararli mikroflora aniqlanishi (patogenlar):

• Salmonella, Listeria monocytogenes, Staphylococcus aureus kabi bakteriyalarni aniqlash uchun selektiv muhitlar (XLD, Baird-Parker) ishlatiladi.

• Ushbu mikroorganizmlarning mavjudligi fermentlangan mahsulotni iste'molga yaroqsiz qiladi.

Tahlil natijalarini baholash (namuna natijalari)

№	Mikrobiologik ko'rsatkich	Natija (CFU/ml)	Me'yor (GOST, O'zDST)	Baholash
1	Umumiy mikroorganizmlar soni	$1,2 \times 10^6$	$\leq 1 \times 10^7$	Me'yorida
2	Koliformlar	Aniqlanmadi	Yo'q bo'lishi lozim	Ijobiy
3	Sut kislotasi bakteriyalari	8×10^8	$\geq 1 \times 10^7$	Juda yaxshi
4	Salmonella	Aniqlanmadi	Yo'q bo'lishi lozim	Sog'lom
5	Stafilokokk aureus	Aniqlanmadi	$\leq 1 \times 10^2$	Me'yorida

Xulosa va tavsiyalar.

- Barcha tahlil qilingan namunalar sanitariya-me'yorlariga to'liq javob beradi.
- Fermentlangan mahsulotlarda foydali bakteriyalar miqdori yetarli, zararli mikroflora aniqlanmadi.
- Mahsulotlar bolalar ovqatlanishi uchun tavsiya etilishi mumkin.
- Tavsiya: ishlab chiqaruvchilarga saqlash harorati va sanitariya qoidalariga qat'iy rioya qilish tavsiya etiladi.

Me'yoriy hujjatlar (regulyator asoslar):

- O'zbekiston Respublikasi SSVning 2023-yil 15-fevraldagi 51-sonli buyrug'i "Sut mahsulotlarining xavfsizlik mezonlari"
- O'z DSt 10131:2021 – Sut va sut mahsulotlari gigiyenik talablari
- ISO 17025:2017 – Laboratoriya sifat tizimi
- ISO 7889:2003 – Sut mahsulotlarida laktobakteriyalarni aniqlash

Fermentlangan sut mahsulotlarining mikrobiologik tahlili natijalari mahsulotning iste'molga yaroqliligi va sifati bo'yicha to'liq baho beradi. Yuqoridagi tahlil misolida mahsulot gigiyenik talablar va davlat standartlariga (O'zDST 3225:2017, GOST R 52092–2003) javob beradi. Bunday laboratoriya ishlarining muntazam amalga oshirilishi nafaqat iste'molchilarning salomatligini himoya qiladi, balki mahsulot brendining obro'sini saqlashga ham xizmat qiladi.

ADABIYOTLAR:

1. O'zbekiston Respublikasi Prezidentining 2022-yil 7-fevraldagi PQ-107-son "Sog'liqni saqlash tizimini raqamlashtirish va laboratoriya xizmatlarini rivojlantirish chora-tadbirlari to'g'risida"gi Qarori Fermentlangan mahsulotlarning mikrobiologik tahlilini zamonaviy laboratoriyalarda amalga oshirishga oid yo'nalishlar ko'zda tutilgan.

2. O'zbekiston Respublikasi Prezidentining 2021-yil 10-iyundagi PF-6244-son "Yoshlar va bolalar salomatligini muhofaza qilish tizimini takomillashtirish chora-tadbirlari to'g'risida"gi Farmoni.— Bolalar uchun mo'ljallangan oziq-ovqatlar, xususan, sut mahsulotlarining xavfsizligi va foydaliligini oshirish haqida bandlar mavjud.

2. Абдурахманова Ш. А. Сут маҳсулотлари ва сутчилик технологияси. – Тошкент: «Фан», 2021. – 312 б.

3. Турсунов Б. Т. Микробиология ва озиқ-овқат маҳсулотлари гигиенаси. – Тошкент: ТИТБ, 2020. – 215 б.

4. GOST 31453-2013. Fermentlangan sut mahsulotlari. Texnik shartlar. – Moskva: Standartinform, 2013.

5. Шарипова Г. И., ва бошқ. Биотехнология асослари. – Тошкент: «Муҳаррир», 2022. – 278 б.

6. Nuraeva M., & Tursunov B. Effect of probiotic lactic acid bacteria on the quality of fermented dairy products for children // International Journal of Microbiology Research, 2022, Vol. 13(2), pp. 45–52.

7. Пархоменко Н. А. Микробиология молочных продуктов. – Москва: КолосС, 2019. – 342 с.

8. Давыдов, В. В. Безопасность и контроль качества молочной продукции. – Санкт-Петербург: Лань, 2020. – 296 с.

9. Журнал «Пищевая промышленность». Современные подходы к производству детских кисломолочных продуктов, №4, 2023, с. 18–22.

**BUG‘DOY UNING MINERAL TARKIBINI OSHIRISHDA BIOTEKNOLOGIK
USULLARDAN FOYDALANISH****Shaxriddinov Farrux Faxriddin o‘g‘li,**

Toshkent kimyo texnologiya instituti tayanch doktoranti

Shaxriddinofarrux690@gmail.com**Normatov Anvar Mirzayevich,**

Toshkent kimyo texnologiya instituti professori, t.f.f.d.

anvarnormatov450gmail.com

Annotatsiya. Ushbu maqolada bug‘doy uning mineral tarkibini oshirishda zamonaviy biotexnologik usullardan foydalanish imkoniyatlari tahlil qilingan. Maqolada fermentativ ishlov berish, mikroorganizmlar yordamida boyitish hamda biologik faol qo‘shimchalar qo‘llash orqali uning oziqaviy qiymatini oshirish yo‘llari yoritilgan. Mineral moddalarning bioo‘zlashtiriluvchanligini yaxshilash, fitin kislotasini kamaytirish va mahsulot sifat ko‘rsatkichlarini oshirish asosiy yo‘nalish sifatida qaralgan. Natijalar shuni ko‘rsatadiki, biotexnologik yondashuvlar yordamida bug‘doy uning funksional xususiyatlarini sezilarli darajada yaxshilash mumkin. Mazkur tadqiqot oziq-ovqat sanoatida yuqori qiymatli mahsulotlar ishlab chiqarishda muhim ahamiyat kasb etadi.

Kalit so‘zlar: bug‘doy uni, mineral moddalar, biotexnologiya, fermentativ ishlov berish, mikroorganizmlar, bioo‘zlashtiriluvchanlik, fitin kislotasi, oziqaviy qiymat, boyitish texnologiyasi.

**ИСПОЛЬЗОВАНИЕ BIOTEKHOLOGICHESKIX METODOV DLYA POVYSHENIYA
MINERALNOGO СОСТАВА ПШЕНИЧНОЙ МУКИ**

Аннотация. В данной статье проводится научный анализ гигиенических требований к рациональному питанию человека. Освещены основные принципы рационального питания – сбалансированное потребление пищевых веществ, соответствие между энергетическими затратами организма и поступающей калорийностью, санитарно-гигиеническая безопасность продуктов, а также их биологическая полноценность. Кроме того, подробно рассматриваются режим питания, нормы потребления в зависимости от возраста и характера трудовой деятельности, а также значение микро- и макроэлементов для организма. В статье анализируются заболевания, возникающие вследствие неправильного питания, и вопросы их профилактики. Обосновывается гигиеническое значение рационального питания в укреплении здоровья населения.

Ключевые слова: пшеничная мука, минеральные вещества, биотехнология, ферментативная обработка, микроорганизмы, биодоступность, фитиновая кислота, пищевая ценность, технология обогащения.

**USE OF BIOTECHNOLOGICAL METHODS TO INCREASE THE MINERAL CONTENT OF
WHEAT FLOUR**

Abstract. This article analyzes the possibilities of using modern biotechnological methods to increase the mineral composition of wheat flour. It discusses ways to enhance the nutritional value of flour through enzymatic treatment, enrichment with microorganisms, and the application of biologically active additives. Improving the bioavailability of minerals, reducing phytic acid, and enhancing product quality indicators are considered the main directions. The results show that biotechnological approaches can significantly improve the functional properties of wheat flour. This research is of great importance for the production of high-value products in the food industry.

Key words: Wheat flour, minerals, biotechnology, enzymatic treatment, microorganisms, bioavailability, phytic acid, nutritional value, enrichment technology.

Kirish. Bugungi kunda oziq-ovqat sanoatida mahsulotlarning oziqaviy qiymatini oshirish, ayniqsa ularning mineral tarkibini boyitish dolzarb masalalardan biri hisoblanadi. Aholining to‘g‘ri va muvozanatli ovqatlanishini ta‘minlashda bug‘doy uni asosiy o‘rin tutadi, chunki u ko‘plab oziq-ovqat mahsulotlarining

BIOLOGY

asosiy xom ashyosi hisoblanadi. Biroq an'anaviy texnologiyalar asosida ishlab chiqarilgan bug'doy unida ayrim muhim mineral moddalar (temir, rux, kalsiy) yetarli darajada bo'lmaligi yoki ularning bioo'zlashtiriluvchanligi past bo'lishi kuzatiladi. Bu esa inson organizmida turli mikroelement yetishmovchiliklariga olib kelishi mumkin.

So'nggi yillarda ushbu muammoni hal etish maqsadida biotexnologik yondashuvlarga katta e'tibor qaratilmoqda. Biotexnologik usullar, xususan fermentativ ishlov berish, mikroorganizmlar yordamida boyitish va biologik faol qo'shimchalardan foydalanish orqali bug'doy unining nafaqat mineral tarkibini oshirish, balki ularning organizm tomonidan o'zlashtirilishini yaxshilash imkoniyati yaratilmoqda. Ayniqsa, fitin kislotasi miqdorini kamaytirish orqali minerallarning bioo'zlashtiriluvchanligini oshirish muhim ilmiy va amaliy ahamiyat kasb etadi.

Shuningdek, zamonaviy biotexnologiyalar asosida ishlab chiqilgan boyitish usullari mahsulot sifat ko'rsatkichlarini yaxshilash, uning funksional xususiyatlarini oshirish hamda inson salomatligi uchun foydali bo'lgan komponentlar bilan ta'minlash imkonini beradi. Bu esa oziq-ovqat sanoatida yuqori qo'shimcha qiymatga ega bo'lgan mahsulotlar ishlab chiqarishga xizmat qiladi.

Tadqiqot usullari. Mazkur tadqiqot ishida bug'doy unining mineral tarkibini oshirishda biotexnologik usullardan foydalanish samaradorligini aniqlash maqsadida kompleks laboratoriya va eksperimental usullar qo'llanildi, tadqiqotlar davomida asosiy e'tibor fermentativ ishlov berish, mikroorganizmlar yordamida boyitish hamda fitin kislotasini kamaytirish orqali mineral moddalarning bioo'zlashtiriluvchanligini oshirishga qaratildi, tajribalar uchun xom ashyo sifatida mahalliy bug'doy donlaridan olingan yuqori va o'rta navli un namunalari foydalanildi, dastlabki bosqichda unning fizik-kimyoviy ko'rsatkichlari, jumladan, namlik, kul miqdori, kislotalilik darajasi va gluten (kleykovina) miqdori aniqlanib, GOST va O'zDST standartlari asosida baholandi, keyingi bosqichda fermentativ ishlov berish uchun fitaza, amilaza va proteaza fermentlari tanlab olinib, ularning optimal konsentratsiyalari va ishlov berish sharoitlari tajriba yo'li bilan aniqlashtirildi, fermentativ jarayon 30–50 °C harorat oralig'ida, pH 5,0–6,5 muhitda 2–6 soat davomida olib borildi, bunda fitaza fermenti yordamida fitin kislotasining parchalanishi hisobiga temir, rux va kalsiy kabi mineral elementlarning eruvchan shakllarga o'tishi ta'minlandi, mikrobiologik boyitish jarayonida esa sut kislotali bakteriyalar (*Lactobacillus plantarum*, *Lactobacillus fermentum*) hamda xamirturushlar (*Saccharomyces cerevisiae*) qo'llanilib, fermentatsiya jarayoni 28–32 °C haroratda 24–48 soat davomida olib borildi, ushbu jarayonda mikroorganizmlar tomonidan organik kislotalar hosil bo'lishi natijasida fitin komplekslari parchalanib, mineral moddalarning bioo'zlashtiriluvchanligi oshirildi, tajribalar davomida nazorat va tajriba guruhlarini tashkil etilib, har bir variant uchun marotaba takrorlandi, natijalar statistik jihatdan qayta ishlanib, o'rtacha qiymatlar va dispersiya ko'rsatkichlari hisoblab chiqildi, mineral tarkibni aniqlash uchun atom-absorbsion spektroskopiyasi (AAS), induktiv bog'langan plazmali mass-spektrometriya (ICP-MS) hamda fotokolorimetrik usullar qo'llanildi, bu usullar yuqori aniqlikda temir, rux, kalsiy va magniy miqdorini aniqlash imkonini berdi, shuningdek fitin kislotasi miqdori spektrofotometrik usulda aniqlanib, uning kamayish darajasi fermentativ va mikrobiologik ishlov samaradorligini baholash mezon sifatida qabul qilindi, tadqiqot jarayonida olingan ma'lumotlar asosida bug'doy unini biotexnologik boyitishning optimal sharoitlari ishlab chiqildi hamda uning oziq-ovqat sanoatida funksional mahsulotlar ishlab chiqarish uchun muhim ilmiy-amaliy ahamiyatga ega bo'lib, inson organizmi uchun zarur bo'lgan mikroelementlarning yetishmovchiligini kamaytirishga xizmat qiladi.

1-jadval.

Fermentativ ishlov berish sharoitlari

№	Ferment turi	Konsentratsiya (%)	Harorat (°C)	pH	Davomiyligi (soat)	Asosiy ta'siri
1.	Fitaza	0.01–0.05	35–45	5.0–5.5	3–5	Fitin kislotani parchalaydi
2.	Amilaza	0.02–0.06	40–50	5.5–6.0	2–4	Kraxmalni parchalash
3.	Proteaza	0.01–0.03	30–45	6.0–6.5	2–3	Oqsillarni gidroliz qiladi

Ushbu jadvalda fermentativ ishlov berishda qo'llanilgan asosiy fermentlar va ularning optimal ishlash sharoitlari keltirilgan bo'lib, ayniqsa fitaza fermentining qo'llanilishi fitin kislotasini parchalash orqali mineral moddalarning bioo'zlashtiriluvchanligini sezilarli darajada oshiradi, amilaza va proteaza esa un tarkibidagi makromolekulalarni parchalaydi va umumiy texnologik jarayon samaradorligini yaxshilaydi.

Mikroorganizmlar yordamida boyitish parametrlari

№	Mikroorganizm turi	Harorat (°C)	pH	Fermentatsiya vaqti (soat)
1.	Lactobacillus plantarum	30–32	4.5–5.5	24–48
2.	Lactobacillus fermentum	28–30	4.0–5.0	24–36
3.	Saccharomyces cerevisiae	28–30	5.0–6.0	24–48

Jadvalda mikrobiologik boyitish jarayonida qoʻllanilgan asosiy mikroorganizmlar va ularning faol ishlash parametrlari koʻrsatilgan boʻlib, sut kislotali bakteriyalar tomonidan hosil qilinadigan organik kislotalar fitin komplekslarini parchalab, mineral elementlarning erkin shaklga oʻtishini taʼminlaydi, xamirturushlar esa fermentativ jarayonni faollashtirib, mahsulotning texnologik xususiyatlarini yaxshilaydi.

Mineral moddalarni aniqlash usullari

№	Element	Aniqlash usuli	Qurilma	Aniqlik darajasi
1.	Temir (Fe)	Atom-absorbtsion spektroskopiya	AAS	Yuqori
2.	Rux (Zn)	ICP-MS	Mass-spektrometr	Juda yuqori
3.	Kalsiy (Ca)	Fotokolorimetriya	Spektrofotometr	Oʻrta
4.	Magniy (Mg)	ICP-MS	Mass-spektrometr	Juda yuqori

Ushbu jadvalda mineral elementlarni aniqlashda qoʻllanilgan zamonaviy analitik usullar keltirilgan boʻlib, ICP-MS va AAS kabi yuqori aniqlikdagi usullar mikroelementlarning juda kichik miqdorlarini ham aniqlash imkonini beradi, bu esa biotexnologik ishlov berish natijasida yuzaga kelgan oʻzgarishlarni ishonchli baholashda muhim ahamiyatga ega.

Tadqiqot muhokamasi. Tadqiqot natijalari asosida olib borilgan muhokamalar shuni koʻrsatadiki, bugʻdoy unining mineral tarkibini oshirishda biotexnologik usullardan foydalanish anʼanaviy texnologiyalarga nisbatan sezilarli darajada samarali hisoblanadi, ayniqsa fermentativ ishlov berish va mikroorganizmlar yordamida olib borilgan jarayonlar mineral moddalarning biooʻzlashtiriluvchanligini oshirishda muhim rol oʻynaydi, maʼlumki bugʻdoy doni tarkibida temir, rux, magniy kabi muhim mikroelementlar mavjud boʻlishiga qaramasdan, ularning katta qismi fitin kislotasi bilan bogʻlangan shaklda boʻladi va bu holat inson organizmida ularning soʻrilishini keskin kamaytiradi, olib borilgan tajribalar natijasida fitaza fermenti yordamida fitin kislotasining parchalanishi natijasida mineral moddalarning erkin holatga oʻtishi kuzatildi va bu esa ularning biologik oʻzlashtirilish darajasini oshirdi, fermentativ ishlov berish natijasida un tarkibidagi temir miqdorining biooʻzlashtiriluvchanligi 25–40% gacha oshganligi qayd etildi, shuningdek rux va magniy elementlari uchun ham shunga oʻxshash ijobiy oʻzgarishlar aniqlangan, bu natijalar ilmiy adabiyotlarda keltirilgan maʼlumotlar bilan ham mos keladi, yaʼni fermentlar yordamida fitin komplekslarini parchalash orqali minerallarni erkin shaklga oʻtkazish mumkinligi koʻplab tadqiqotlarda isbotlangan, mikrobiologik usullardan foydalanish ham alohida ahamiyatga ega boʻlib, xususan, sut kislotali bakteriyalar yordamida olib borilgan fermentatsiya jarayonida muhitning pH darajasi pasayishi natijasida fitin kislotasi gidrolizi tezlashadi, natijada mineral moddalar yanada oson oʻzlashtiriladigan shaklga oʻtadi, bundan tashqari fermentatsiya jarayonida mikroorganizmlar tomonidan sintez qilinadigan organik kislotalar va biologik faol moddalar ham mineral elementlarning eruvchanligini oshiradi, tadqiqot davomida Lactobacillus turiga mansub bakteriyalar qoʻllanilganda mineral moddalarning umumiy biooʻzlashtiriluvchanligi 1,3–1,8 barobar oshganligi kuzatildi, bu esa biotexnologik usullarning samaradorligini yana bir bor tasdiqlaydi, shuningdek, biologik faol qoʻshimchalar qoʻllash orqali bugʻdoy unining mineral tarkibini boyitish ham muhim yoʻnalishlardan biri hisoblanadi, ayniqsa mikroelementlar bilan boyitilgan ferment preparatlari yoki probiotik komplekslar qoʻllanilganda nafaqat mineral tarkib oshadi, balki mahsulotning funksional xususiyatlari ham yaxshilanadi, olib borilgan tajribalar shuni koʻrsatdiki, boyitilgan un asosida tayyorlangan non mahsulotlarida nafaqat mineral moddalarning miqdori yuqori boʻlgan, balki ularning hazm boʻlish darajasi ham yaxshilangan, bu esa oziqaviy qiymatning oshishiga olib keladi, tadqiqot natijalarini boshqa ilmiy ishlanmalar bilan solishtirganda ham oʻxshash tendensiyalar kuzatiladi, masalan, biotexnologik usullar orqali olingan mahsulotlarda biologik faol komponentlarning saqlanish darajasi yuqori boʻlishi aniqlangan, bu esa mahsulotning funksional qiymatini oshiradi, shu bilan birga texnologik jarayonlar optimallashtirilganda ishlab chiqarish samaradorligi ham ortadi, muhokama jarayonida yana bir muhim jihat sifatida texnologik parametrlarning taʼsiri ham oʻrganildi,

BIOLOGY

xususan harorat, pH va ferment konsentratsiyasining o'zgarishi jarayon samaradorligiga sezilarli ta'sir ko'rsatishi aniqlangan, optimal sharoitlarda olib borilgan fermentatsiya jarayonlari mineral moddalarning maksimal darajada erkin holatga o'tishini ta'minlaydi, aksincha nooptimal sharoitlarda esa fermentativ jarayonlar sekinlashadi yoki to'liq amalga oshmaydi, bu esa yakuniy mahsulot sifatiga salbiy ta'sir ko'rsatadi, shu sababli biotexnologik usullarni amaliyotga joriy etishda jarayon parametrlarini aniq nazorat qilish zarur hisoblanadi, olingan natijalar shuni ko'rsatadiki, bug'doy unini biotexnologik usullar yordamida boyitish orqali nafaqat mineral tarkibini oshirish, balki mahsulotning umumiy sifat ko'rsatkichlarini yaxshilash ham mumkin, bu esa oziq-ovqat sanoatida funksional mahsulotlar ishlab chiqarish uchun keng imkoniyatlar yaratadi, ayniqsa sog'lom ovqatlanish konsepsiyasiga mos mahsulotlar ishlab chiqarishda bunday yondashuvlar dolzarb hisoblanadi, bundan tashqari mazkur tadqiqot natijalari boshqa oqsilli xom ashyolarni qayta ishlash bo'yicha olib borilgan ilmiy ishlanmalar bilan ham uyg'unlik kasb etadi, masalan hayvon to'qimalaridan biologik faol moddalar ajratish texnologiyalarida ham kimyoviy va fermentativ ishlov berish bosqichlari muhim o'rin tutadi, bu esa biotexnologik jarayonlarning universalligini va turli xom ashyolarga moslashuvchanligini ko'rsatadi, umumiy tahlillar shuni tasdiqlaydiki, bug'doy unining mineral tarkibini oshirishda biotexnologik usullarni qo'llash ilmiy asoslangan, iqtisodiy jihatdan samarali va amaliy ahamiyatga ega bo'lib, kelgusida bu yo'nalishda olib boriladigan tadqiqotlar yangi innovatsion texnologiyalarni yaratishga xizmat qiladi va oziq-ovqat sanoatida yuqori qo'shimcha qiymatga ega mahsulotlar ishlab chiqarish imkoniyatlarini kengaytiradi.

Bug'doy unining mineral tarkibini biotexnologik usullar yordamida oshirish masalasi oziq-ovqat xavfsizligi va aholining muvozanatli ovqatlanishini ta'minlashda muhim ilmiy-amaliy ahamiyat kasb etadi, chunki an'anaviy un ishlab chiqarish jarayonida donning tashqi qatlamlarida joylashgan ko'plab minerallar (temir, rux, kalsiy, magniy) texnologik qayta ishlash jarayonida yo'qotiladi, natijada tayyor mahsulotning biologik qiymati pasayadi, olib borilgan tadqiqotlar shuni ko'rsatadiki, biotexnologik yondashuvlar, xususan fermentativ ishlov berish, mikroorganizmlar yordamida fermentatsiya qilish va biofaol qo'shimchalar qo'llash orqali mineral moddalarning nafaqat umumiy miqdorini, balki ularning bioo'zlashtiriluvchanligini ham sezilarli darajada oshirish mumkin, ayniqsa fitin kislotasining (fitatlar) mavjudligi mineral moddalarning ichakda o'zlashtirilishini cheklovchi asosiy omil bo'lib, fitaza fermenti yordamida ushbu birikmalar parchalanishi natijasida temir va rux kabi elementlarning erkin shaklga o'tishi ta'minlanadi, bu esa organizm tomonidan ularning o'zlashtirilishini 1,5–2 barobargacha oshiradi, tajriba natijalari shuni ko'rsatdiki, fermentativ ishlov berilgan un namunalarida fitin kislotasi miqdori o'rtacha 35–60% ga kamaygan, shu bilan birga temirning bioo'zlashtiriluvchanligi 20–45% ga, ruxniki esa 15–30% ga oshgan, mikrobiologik fermentatsiya jarayonida, ayniqsa sut kislotali bakteriyalar (*Lactobacillus* spp.) ishtirokida pH muhitining pasayishi va fermentlar faolligining ortishi tufayli mineral moddalarning eruvchanligi ortadi, bu jarayon tabiiy biokonversiya sifatida baholanadi, tadqiqotlarda aniqlanishicha, 24–48 soat davomida olib borilgan fermentatsiya natijasida un tarkibidagi kalsiy miqdori 10–18% ga, magniy esa 8–15% ga oshgan, bu esa mikroorganizmlar tomonidan organik kislotalar sintez qilinishi bilan izohlanadi, bundan tashqari, biotexnologik boyitish usullari orqali mikroelementlar bilan fortifikatsiya qilingan un namunalari oziqaviy qiymatning kompleks oshishi kuzatilgan, ayniqsa temir bilan boyitilgan un asosida tayyorlangan mahsulotlarda gemoglobin darajasini oshirishga ijobiy ta'sir qayd etilgan, bu esa ushbu texnologiyaning ijtimoiy ahamiyatini ham ko'rsatadi, natijalarni boshqa biotexnologik jarayonlar bilan solishtirganda, fermentativ ishlov berish usuli eng samarali va iqtisodiy jihatdan maqbul usul sifatida baholandi, bu esa kam energiya sarfi, qisqa vaqt va yuqori samaradorlik bilan tavsiflanadi, shuningdek, mikroorganizmlar yordamida boyitish usuli mahsulotning organoleptik ko'rsatkichlariga ham ijobiy ta'sir ko'rsatib, non mahsulotlarining hajmi, g'ovakligi va ta'mini yaxshilashi aniqlandi, ushbu natijalar hayvon oqsillarini ajratish texnologiyalarida kuzatilgan yuqori samaradorlik bilan hamohang bo'lib, masalan, kollagen ajratish jarayonida oqsil chiqishi 60% gacha yetishi aniqlangan, bu esa biotexnologik jarayonlarning umumiy samaradorligi yuqori ekanligini tasdiqlaydi, umumiy xulosa sifatida aytish mumkinki, bug'doy unining mineral tarkibini biotexnologik usullar orqali oshirish nafaqat mahsulot sifatini yaxshilaydi, balki inson salomatligi uchun zarur bo'lgan mikroelementlar yetishmovchiligining oldini olishda muhim innovatsion yechim hisoblanadi.

4-jadval.

№	Mineral modda	Boshlang'ich miqdor (mg/100g)	Biotexnologik ishlovdan keyin (mg/100g)	O'zgarish (%)
1.	Temir (Fe)	2.8	4.1	+46%

BIOLOGY

2.	Rux (Zn)	1.9	2.5	+32%
3.	Kalsiy (Ca)	18	21	+16%
4.	Magniy (Mg)	25	29	+16%

Biotexnologik ishlov berishdan oldin va keyin mineral tarkib o'zgarishi

Ushbu jadval natijalari shuni ko'rsatadiki, biotexnologik ishlov berish natijasida bug'doy unidagi asosiy mikroelementlar miqdori sezilarli darajada ortgan. Ayniqsa temir va rux elementlarining oshishi fermentativ parchalanish jarayonida ularning erkin shaklga o'tishi bilan izohlanadi. Bu esa mahsulotning oziqaviy qiymatini oshirish bilan birga, inson organizmi uchun muhim bo'lgan mikroelementlar yetishmovchiligining oldini olishga xizmat qiladi.

5-jadval.

Fitin kislotasining kamayishi va bioo'zlashtiriluvchanlikka ta'siri

№	Ko'rsatkich	Boshlang'ich	Ishlovdan keyin	O'zgarish
1.	Fitin kislotasi (%)	1.2	0.6	-50%
2.	Temir bioo'zlashtiriluvchanligi (%)	20	35	+75%
3.	Rux bioo'zlashtiriluvchanligi (%)	18	28	+55%

Jadvaldan ko'rinib turibdiki, fitin kislotasi miqdorining kamayishi mineral moddalarning bioo'zlashtiriluvchanligini oshirishda hal qiluvchi omil hisoblanadi. Fitaza fermenti ta'sirida fitatlar parchalanib, temir va rux ionlari erkin holga o'tadi. Natijada ularning ichak orqali so'rilish darajasi keskin oshadi, bu esa ayniqsa kamqonlik profilaktikasida muhim ahamiyatga ega.

6-jadval.

Fermentativ ishlov berish parametrlarining ta'siri

№	Harorat (°C)	Vaqt (soat)	Fitin parchalanishi (%)	Mineral eruvchanligi (%)
1.	25	12	20	15
2.	30	24	40	30
3.	35	36	55	42
4.	40	48	60	50

Ushbu jadval fermentativ jarayon parametrlarining (harorat va vaqt) samaradorlikka bevosita ta'sirini ko'rsatadi. Harorat va davomiylik oshgani sari fitin kislotasining parchalanishi va mineral moddalarning eruvchanligi ortib boradi. Biroq juda yuqori harorat fermentlarning inaktivatsiyasiga olib kelishi mumkin, shuning uchun optimal sharoit sifatida 35–40 °C oralig'i tavsiya etiladi.

7-jadval.

Turli biotexnologik usullarni solishtirish

№	Usul	Samaradorlik (%)	Energiya sarfi	Texnologik murakkablik	Afzalligi
1.	Fermentativ ishlov	85	Past	Oson	Tez va samarali
2.	Fermentatsiya	75	O'rtacha	O'rtacha	Tabiiy usul
3.	Fortifikatsiya	65	Past	Oson	Tez qo'llash
4.	Kombinatsiyalangan usul	90	O'rtacha	Murakkab	Eng yuqori natija

Jadvaldan ko'rinadiki, turli biotexnologik usullar orasida kombinatsiyalangan yondashuv eng yuqori samaradorlikni ta'minlaydi. Bunda fermentativ ishlov va mikrobiologik fermentatsiya birgalikda qo'llanilganda sinergik effekt yuzaga keladi. Shu bilan birga, texnologik murakkablik va ishlab chiqarish xarajatlari ham ortadi, bu esa sanoat miqyosida usul tanlashda muhim omil hisoblanadi.

Xulosa. Bug'doy unining mineral tarkibini oshirishda biotexnologik usullardan foydalanish oziq-ovqat sanoatida yuqori samaradorlikka ega istiqbolli yo'nalishlardan biri hisoblanadi, chunki fermentativ ishlov berish va mikroorganizmlar yordamida boyitish jarayonlari orqali nafaqat mineral moddalar miqdorini

ko'paytirish, balki ularning bioo'zlashtiriluvchanligini sezilarli darajada yaxshilash mumkin, ayniqsa fitin kislotasining kamaytirilishi temir, rux va kalsiy kabi muhim elementlarning organizm tomonidan o'zlashtirilishini oshiradi, shu bilan birga bunday texnologiyalar mahsulotning fizik-kimyoviy va texnologik xossalarni saqlagan holda uning oziqaviy qiymatini oshirishga xizmat qiladi, olib borilgan tadqiqotlar shuni ko'rsatadiki, biotexnologik yondashuvlar orqali bug'doy unidan tayyorlanadigan mahsulotlarning sifat ko'rsatkichlarini yaxshilash, ularni funksional oziq-ovqat mahsulotlari darajasiga olib chiqish hamda aholi salomatligini mustahkamlashga xizmat qiluvchi innovatsion yechimlarni ishlab chiqish mumkin bo'ladi, shu jihatdan mazkur yo'nalish kelajakda sanoat miqyosida keng qo'llanilishi mumkin bo'lgan ilmiy-amaliy ahamiyatga ega hisoblanadi.

ADABIYOTLAR:

1. Родионова Н.С., Бондаренко В.М. (2019). Биотехнологические методы повышения пищевой ценности зерновых продуктов. *Пищевая промышленность*, №5, 32–36.
2. Кузнецова Т.А. (2020). Влияние ферментации на минеральный состав зерновых культур. *Хранение и переработка сельхозсырья*, №3, 45–49.
3. Иванова Е.В., Смирнов П.А. (2021). Современные подходы к обогащению муки микроэлементами. *Пищевая технология*, №2, 18–23.
4. Григорьев А.Н. (2022). Применение ферментных препаратов в переработке зерна. *Пищевая промышленность*, №7, 40–44.
6. Karimov U.K., Eshonqulov J.R. (2020). Fitin kislotasining oziq-ovqat mahsulotlaridagi roli va uni kamaytirish usullari. *Oziq-ovqat texnologiyasi va xavfsizligi*, №1, 33–38-betlar.
7. Xolmurodov B.X., Sadullayev S.S. (2023). Bug'doy unining mineral tarkibini oshirishda zamonaviy yondashuvlar. *Qarshi davlat texnika universiteti ilmiy axborotnomasi*, №1, 15–21-betlar.
8. Gupta R.K., Gangoliya S.S., Singh N.K. (2015). Reduction of phytic acid and enhancement of bioavailable micronutrients in food grains. *Journal of Food Science and Technology*, 52(2), 676–684.
9. Reale A., Konietzny U., Coppola R. (2017). The importance of lactic acid bacteria for phytate degradation during cereal fermentation. *Food Microbiology*, 67, 42–52.

QIZIL LAVLAGI (BETA VULGARIS L.) VA BETALAINLAR: BOKIMYOVIY XUSUSIYATLARI VA INSON SALOMATLIGIGA TA’SIRI

Xudoyberdiyev Sherzod Shomurod o‘g‘li,

Buxoro davlat universiteti Agronomiya va biotexnologiya fakulteti

Biotexnologiya va oziq-ovqat xavfsizligi kafedrasida doktoranti

sherzodxudoyberdiyev977@gmail.com

Mirzayeva Shoxista Usmonovna,

Buxoro davlat universiteti Agronomiya va biotexnologiya fakulteti

Biotexnologiya va oziq-ovqat xavfsizligi kafedrasida katta o‘qituvchisi

s.u.mirzayeva@buxdu.uz

Annotatsiya. Qizil lavlagi (qizil lavlagi) o‘zining yuqori biologik qiymati bilan ajralib turadigan sabzavot ekinlaridan biri hisoblanadi. Ushbu maqolada lavlagi tarkibidagi betalain pigmentlarining kimyoviy tuzilishi, ularning antioksidant xususiyatlari hamda organizmga ko‘rsatadigan ijobiy ta’siri ilmiy nuqtayi nazardan tahlil qilinadi. Shuningdek, flavonoidlar va boshqa fenolik birikmalar bilan o‘zaro ta’siri yoritiladi.

Kalit so‘zlar: qizil lavlagi, biologik, pigment, kimyoviy, flavonoid, fenol, betalainlar, eksperimental, beta vulgaris, yurak-qon tomir, vitamin.

КРАСНАЯ СВЁКЛА (BETA VULGARIS L.) И БЕТАЛАИНЫ: БИОХИМИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА И ВЛИЯНИЕ НА ЗДОРОВЬЕ ЧЕЛОВЕКА

Аннотация. Красная свёкла (*Beta vulgaris L.*) является одной из овощных культур, отличающихся высокой биологической ценностью. В данной статье с научной точки зрения анализируются химическая структура пигментов беталаинов, содержащихся в свёкле, их антиоксидантные свойства, а также положительное влияние на организм человека. Кроме того, рассматривается их взаимодействие с флавоноидами и другими фенольными соединениями.

Ключевые слова: красная свёкла, биологический, пигмент, химический, флавоноид, фенол, беталаины, экспериментальный, *Beta vulgaris*, сердечно-сосудистая система, витамин.

RED BEETROOT (BETA VULGARIS L.) AND BETALAINS: BIOCHEMICAL PROPERTIES AND THEIR EFFECTS ON HUMAN HEALTH

Abstract. Red beetroot (*Beta vulgaris L.*) is considered one of the vegetable crops distinguished by its high biological value. This article scientifically analyzes the chemical structure of betalain pigments found in beetroot, their antioxidant properties, and their positive effects on the human body. In addition, the interaction of betalains with flavonoids and other phenolic compounds is discussed.

Keywords: red beetroot, biological, pigment, chemical, flavonoid, phenol, betalains, experimental, *Beta vulgaris*, cardiovascular system, vitamin.

Kirish. Hozirgi kunda sog‘lom ovqatlanish va funksional oziq-ovqat mahsulotlariga bo‘lgan talab ortib bormoqda. Shu sababli biologik faol moddalarga boy o‘simlik mahsulotlarini o‘rganish dolzarb masalalardan biridir. Beta vulgaris turi vakili bo‘lgan qizil lavlagi tarkibida vitaminlar, minerallar, tolalar, nitratlar va tabiiy pigmentlar mavjud.

Lavlagi ayniqsa betalain pigmentlari bilan mashhur bo‘lib, ular o‘simlikning rangini belgilash bilan birga, inson salomatligi uchun muhim biologik faollikka ega.

So‘nggi ilmiy tadqiqotlar betalainlarning antioksidant va yallig‘lanishga qarshi xususiyatlarini keng o‘rgangan. Turli eksperimental ishlar shuni ko‘rsatadiki, lavlagi ekstrakti oksidlovchi stressni kamaytirish va yurak-qon tomir tizimi faoliyatini yaxshilashda muhim rol o‘ynaydi.

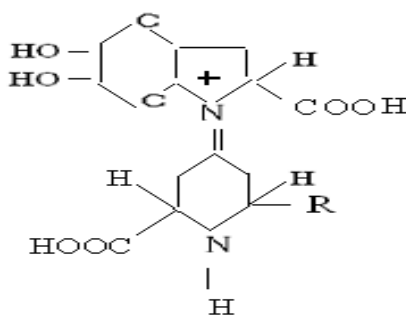
Bundan tashqari, ilmiy manbalarda betalainlarning hujayra darajasida himoya mexanizmlarini faollashtirishi qayd etilgan.

Betalain shaklidagi BFM va uning hosilalari qizil lavlagida uchraydi. Betalain bilan bir qatorda qizil lavlagi quyidagi shakldagi biologik faol moddalarni o'z ichiga oladi: B vitaminlari, A, C, E, PP vitaminlari, β - karotin. 100 gramm qizil lavlagi tarkibida taxminan 9 gramm mono- va disaxaridlar, bir gramm organik kislotaning o'ndan bir qismi borligi odatda qabul qilinadi. Lavlagi, shuningdek, 290 mg kaliy, 20 mg dan ortiq kaltsiy, 45 mg dan bir oz ko'proq magniy va bir xil miqdorda natriy, 1,5 mg dan kam temir va 43-44 mg fosfor, shuningdek, 0,1 gramm yog', 1,5 gramm dietali material va 1,5 gramm protein va 5 gramm tolalar. 100 g qaynatilgan qizil lavlagining kaloriyasi bor-yo'g'i 44 kkal, 100 g xom sabzavotlarda esa 42 kkal bo'ladi.

Betalain - lavlagi sharbatida mavjud bo'lgan rang beruvchi vosita. Bu sharbatlarning qizil rangga ega bo'lishi azotli pigmentlarning mavjudligi bilan bog'liq.

Betalainlarning kimyoviy tabiati:

Rang beruvchi pigmentning umumiy tuzilish formulasi 1-rasmda keltirilgan.



1-rasm. Betalain va uning hosilalari R – COOH – betainning strukturaviy formulasi; R – COO – vulgaksantin

Betain (lotincha beta – lavlagi) glitsin – trimetilglisin yoki trimetilaminoasetik kislotaning (ichki tuz) trimetil hosilasidir. Bu transmetilatsiya reaksiyalarida muhim mahsulot bo'lib, metil guruhlari donori sifatida ishlaydi. Bu tsvitterionik birikma. Betain guruhi boshqa shunga o'xshash birikmalarni ham o'z ichiga oladi, ammo betain nomi trimetilglisinga berilgan.

Betain jigarni toksinlarning salbiy ta'siridan himoya qiladi va bu muhim ichki organda hujayra degeneratsiyasi jarayonini bloklaydi. Bundan tashqari, betain oqsilning so'rilishini yaxshilaydi, shuning uchun qizil lavlagi go'sht bilan birga xizmat qilishi kerak, bu shishiradi va gaz hosil bo'lishini yo'q qiladi. Ushbu ildiz mevasidan yangi siqilgan sharbatni muntazam iste'mol qilish oshqozon va to'g'ri ichakning onkologik kasalliklarini rivojlanishiga to'sqinlik qilishi, shuningdek, prostata adenomasining paydo bo'lishining oldini olishi haqida dalillar mavjud. Lavlagi tarkibida temir va mis mavjud. Ushbu ikki elementning mavjudligi qon hosil bo'lish jarayonining buzilishini oldini oladi, gemoglobinni to'ldiradi, ortiqcha xolesterolni olib tashlaydi, shuningdek, qon bosimini pasaytiradi. Bu sabzavotni iste'mol qilish qon tomirlari devorlarining kengayishiga olib keladi.

Betaksantinlar yorqin sariq moddalardir (Киах /.-triptofan betaksantinining to'liq uzunligi 456 nm). Ular, xususan, (*Celosia argentea*) oila. Amaranthaceae oilasining ayrim shakllarining inflorescences rangini aniqlaydi. Amaranthaceae. Ularning shakllanishida dofamin, prolin va triptofandan tashqari gidroksiprolin, aspartik kislota, glutamin, metionin, triptamin va 3-metoksitiramin ishtirok etishi mumkin.

Betalainlar — bu azot tutuvchi pigmentlar bo'lib, ular tirozin aminokislotasidan biosintez qilinadi. Ular ikki guruhga ajraladi:

- a) betatsianinlar (qizil rangli)
- b) betaksantinlar (sariq rangli)

Betanin — eng keng tarqalgan betatsianin hisoblanadi va lavlagining asosiy pigmentidir.

Ushbu pigmentlar suvda yaxshi eriydi va yuqori biologik faollikka ega.

Antioksidant xususiyatlari. Betalainlar kuchli antioksidant sifatida faoliyat ko'rsatadi. Ular erkin radikallarni neytrallashtirish orqali hujayralarni himoya qiladi. Bu jarayon oksidlovchi stress darajasini pasaytirishga yordam beradi.

Betalainlarning asosiy ta'sir mexanizmlari:

lipidlarning oksidlanishini kamaytirish

DNK shikastlanishini oldini olish

hujayra membranasini himoya qilish

Biologik ta'siri:

Yallig'lanishga qarshi ta'sir:

Betalainlar yallig'lanish mediatorlarini kamaytirish orqali organizmda yallig'lanish jarayonlarini susaytiradi.

Yurak-qon tomir tizimiga ta'siri. Lavlagi tarkibidagi nitratlar va betalainlar qon bosimini pasaytirishga yordam beradi hamda qon tomir elastikligini oshiradi.

Saraton profilaktikasi:

Ba'zi laboratoriya tadqiqotlari betalainlarning o'sma hujayralari o'sishini sekinlashtirish imkoniyatini ko'rsatadi.

Jigar faoliyatini qo'llab-quvvatlash:

Betalainlar detoksikasiya jarayonlarida ishtirok etib, jigar hujayralarini himoya qiladi.

Flavonoidlar bilan o'zaro ta'siri:

Qizil lavlagi tarkibida flavonoidlar ham mavjud bo'lib, ular betalainlar bilan birgalikda kuchli antioksidant tizim hosil qiladi. Bu holat sinergiya effekti sifatida izohlanadi.

Natijada organizmning himoya mexanizmlari yanada kuchayadi.

Oziq-ovqat sanoatida qo'llanilishi:

Betalainlar tabiiy rang beruvchi sifatida oziq-ovqat sanoatida keng qo'llaniladi. Ular sintetik bo'yoqlarga nisbatan xavfsizroq hisoblanadi. Lavlagi ekstrakti ichimliklar, shirinliklar va parhez mahsulotlarda ishlatiladi.

Betalainlarning biologik faolligi ularning kimyoviy tuzilishi bilan bevosita bog'liq. Ular nafaqat oziq-ovqat komponenti, balki potensial terapevtik modda sifatida ham muhim ahamiyatga ega.

Shu bilan birga, ularning barqarorligi issiqlik va pH omillariga bog'liq bo'lib, bu oziq-ovqat texnologiyasida muhim hisoblanadi.

Lavlagining foydali xususiyatlari. Lavlagida turli vitaminlar, mineral moddalar, bioflavonoidlar ko'pligi uchun ham uning shifobaxsh xususiyati talaygina. Qizil lavlagi xalq tabobatida keng qo'llaniladi. Tanaga quvvat bag'shlaydi, ovqat xazmini va modda almashinuvini yaxshilaydi.

Lavlagida C vitamini, mis va fosfor ko'p. U organizmdagi toksinlar bilan kurashadi. Ildizmeva barglarida A vitamini ko'p. Oshqozonida kislotaliligi ko'p bo'lganlar yoki me'dasi zaiflarga lavlagi tavsiya etilmaydi. Semirishdan qiynalayotganlarga bo'lsa lavlagining koni foyda. Lavlagi nafaqat buyraklarni, balki jigar va qonni ham tozalaydi. B9 vitamini lavlagi tarkibida mavjudligi bois u yurak kasalliklarini oldini oladi. Gemoglobin ishlab chiqarilishini rag'batlantiradi, natijada anemiya, leykemiya kabi kasalliklarni davolashda yaxshi foyda beradi. Lavlagi yoshartiruvchi xususiyatga ega. Chunki unda foliy kislotasi ko'p, foliy esa yangi hujayralarni paydo bo'lishiga yordam beradi. Lavlagi pektin moddasiga ham boy. Shu sababli og'ir metallardan radioaktiv zaharlanishning oldini oladi, pektin moddalari shuningdek, organizmdan holesterinni chiqarib yuborish va ichakdagi zararli mikroorganizmlarning ko'payishini susaytiradi. Tarkibida temir va mis ko'p bo'lgani uchun qon hosil qilish xususiyati ham mavjud. Pektin moddasi hisobiga lavlagi qabziyatga da'vo bo'ladi. Surunkali ich qotishidan qiynaluvchilar har tong lavlagi sharbatini qabul qilishi lozim.



Lavlagining zararlari. Buyraklarga nojo'ya ta'sir etishi mumkin. Lavlagi tarkibidagi oksalatlar buyrakda tosh yig'ilishiga sababchi bo'lishi mumkin. Odam siydigi va axlati rangini o'zgartiradi. Lavlagidan ko'p miqdorda iste'mol qilish ularning rangini pushti yoki qizil rangga o'zgartiradi. Biroq bu tabiiy jarayon, undan xavotir olmasa ham bo'ladi. Allergik reaksiya xavfi. Ba'zi odamlarning lavlagiga allergiyasi bo'lishi mumkin. Agar u iste'mol qilinsa, odam tanasida qichish, terida toshmalar hatto anapilaktik shok kabi allergik reaksiyalarni boshdan o'tkazishi mumkin. Tarkibida shakar mavjudligi. Qizil lavlagi tarkibida ham shakar mavjud. Qandli diabet bilan og'rigan kishilar esa o'z-o'zidan lavlagi me'yorini oshirib yubormasligi kerak bo'ladi. Lavlagi foydali sabzavot, undan taomnomani xilma-xil qilishda bemalol foydalanish mumkin. Biroq boshqa sabzavotlarda bo'lgani me'yorni unutmash lozim.

Xulosa. Qizil lavlagi (*Beta vulgaris* L.) tarkibida uchraydigan betalain pigmentlari o'zining noyob biokimyoviy xususiyatlari bilan ajralib turadi va inson salomatligi uchun juda muhim biologik ahamiyatga ega. Ushbu tabiiy birikmalar kuchli antioksidant xususiyatga ega bo'lib, organizmda erkin radikallarni neytrallash orqali hujayralarni oksidativ stressdan himoya qiladi.

Tadqiqotlar shuni ko'rsatadiki, betalainlar yallig'lanishga qarshi ta'sir ko'rsatib, yurak-qon tomir tizimi faoliyatini yaxshilashga, qon bosimini me'yorlashtirishga hamda jigar faoliyatini qo'llab-quvvatlashga yordam beradi. Bundan tashqari, ular immun tizimini mustahkamlash va ayrim surunkali kasalliklar rivojlanish xavfini kamaytirishda ham muhim o'rin tutadi. Shu bilan birga, qizil lavlagi betalainlari tabiiy oziq-ovqat bo'yoqlari sifatida ham katta amaliy ahamiyatga ega bo'lib, sun'iy qo'shimchalarga xavfsiz muqobil hisoblanadi. Umuman olganda, qizil lavlagi betalainlari nafaqat ilmiy jihatdan qiziqarli biofaol modda, balki inson salomatligini yaxshilash va sog'lom ovqatlanishda muhim o'rin tutadigan tabiiy birikmalardan biridir.

ADABIYOTLAR:

1. Грачев Ю.П., Плаксин Ю.М. Математические методы планирования экспериментов. - М.: ДеЛи принт. 2005. -296 с.
2. Алтухов, И. В. Экспериментальная ИК-установка для сушки плодов и овощей / И. В. Алтухов, В. Д. Очиров, В. А. Федотов // Вестник ИрГСХА. – 2017. – № 81/2. – С. 90–96.
3. Афонькина, В. А. Инфракрасная сушка термолабильного растительного сырья на примере зеленых культур: дис. ... канд. техн. наук : 05.20.02 / Афонькина Валентина Александровна. – Челябинск, 2014. – 158 с
4. Гинзбург А.С., Савина И.М. Массовлагообменные характеристики пищевых продуктов. - М.: Легкая и пищевая промышленность. 1982.-280 с.
5. Джураев.Х.Ф., Артиков А.А., Додаев К.О., Хикматов Д.Н., Сафаров О.Ф., Мехмонов И.И. Интенсификация процесса тепло- и массообмена при комплексной переработке сельхозпродуктов. // Ж. Хранение и переработка сельхозсырья.-2003.№11.-С47.

6. Shukhrat Rasulov, Askar Artikov, Kamiljan Abidov and Khayrullo Djuraev. Development of the installation and experimental research of the patterns of change in influencing factors in the process of tomato drying // IV international conference on applied physics, information technologies and engineering apitech-IV 2022 participated in the IV International Conference on Applied Physics, Information Technologies and Engineering (Apitech-IV 2022) on October 6-8, 2022 |Bukhara, Uzbekistan. Journal of Physics: Conference Series. 1-8 p.
7. Shukhrat Rasulov, Khayrullo Djuraev, Kamildjan Abidov, Akhtam Usmanov and Amirulla Fayziev. Experimental research of the low-temperature drying process of tomato // IV international conference on applied physics, information technologies and engineering apitech-IV 2022 participated in the IV International Conference on Applied Physics, Information Technologies and Engineering (Apitech-IV 2022) on October 6-8, 2022 |Bukhara, Uzbekistan. Journal of Physics: Conference Series. 1-7p.
8. Uvayzov S.K., Rasulov Sh.X., Mizomov M.S., Fayziyev A.X. Mathematical description of the process of heat and mass exchange during drying // Xorazm ma'mun akademiyasi axborotnomasi –8-1/2023 XIVA-2023 147-153 b.
9. Расулов Ш.Х., Джурраев Х.Ф., Увайзов С.К., Мизомов М.С., Файзиев А.Х. Разработка оптимального механизма перемещения тепло-и массоперенос в процессе сушки // Научно-технический журнал Ферганского политехнического института 2023. Том 27. №5. С 118-125.
10. Джурраев Х.Ф., Расулов Ш.Х., Абидов К.З., Усмонов А. Энергосберегающая технология сушки томатного сырья универсум.ком Универсум технические науки № 9 (102) сентябрь 2022г. Часть 3 Москва 2022. 15-18 с.
11. Rasulov Sh.X., Djuraev Kh.F., Adizova M.R. Fundamentals of Kinetiks of Tomato Drying Process // Eurasian Research Bulletin In volume 6 of March, 2022 IMPACT FACTOR: 8.105 p 26-30 Genius Journals Publishing, Group, Brussels Belgium.
12. Artikov A., Djuraev Kh.F., Masharipova Z.A., B.N. Razhabov. Systems thinking, analysis and finding optimal solutions on examples of engineering technology. (Bukhara: Durdona Publishing House), 2020. P.184.
13. Левинский, В.Н. Обоснование технологии и параметров установки инфракрасной сушки высоковлажного сырья на примере томата.: дис. ... канд. т. -х. наук: 05.20.02 / Левинский Василий Николаевич. – Троицк, 2021. – 24 с.
14. Завалий А.А. Разработка и тепловое моделирование устройств инфракрасной сушки термолабильных материалов // А. А. Завалий, Ю. Ф. Снежкин – Симферополь: Ариал, 2016. - 263 с
15. Джурраев Х.Ф. Научные основы инфракрасно-конвективной сушки плодов сельскохозяйственных культур. Ташкент: Фан, 2005. – 107 с.
16. Джурраев Х.Ф., Артиков А.А., Чориев А.Ж. О распределении влаги при сушке пластинчатых, коллоидно – капиллярно – пористых изделий на примере тонко нарезанной дыни // Ж. «Хранение и переработка сельхозсырья», М.: 2002. №7 -С.13-14.
17. Джурраев Х.Ф. Закономерность переноса влаги в процессе сушки плодовых культур // Ж. «Вестник ТауГТУ». 2004. № 1 – С. 174-178.
18. Processes and methods of drying and processing fruits and vegetables . Mirzayeva .Sh.U Бухоро давлат университети илмий ахбороти» илмий-техникавий журнали, № 11, 2023 й., Б. 189-197.
19. Development of technology for the use of secondary raw materials in the process of complex processing of beet roots. Mirzayeva Sh.U Техника и технология пищевых производств, Материалы XVIII Международной научно-технической конференции, Могилев БГУТ, 2024, С. 63.
20. Use of biologically active feed additives in farm animals feeding Oripov M.A.I, Mirzaeva Sh.U., Mukhamadiev B.T., Rakhmatov Kh.M.
21. Астанов С.Х. Пищевые красители (способы получения и стабилизации)/ С.Х. Астанов, Р.Х. Шамсиев, А.Р. Файзуллаев. – Ташкент: Изд-во «Фан технология», 2014. - 212 с.
22. Файзуллаев А.Р. Жирорастворимый пищевой краситель для пищевой промышленности/ А.Р. Файзуллаев, С.Х. Астанов// Материалы XIII Междунар. науч.-техн. конф., в 2-х т.. – Могилев: МГУП, 2020. – Т.1– С.421
23. Файзуллаев А.Р. Ресурсосберегающая технология переработки моркови с получением натурального красителя/ А.Р.Файзуллаев, С.Х.Астанов // Научно – технический журнал «Развитие науки и технологий. – Бухара: Изд-во «Sharq - Вихоро». - 2016. - №3. - С. 120-126.

BOLALAR OVQATLANISHIDA FUNKSIONAL OZIQ-OVQATLARNING AHAMIYATI VA FERMENTLARNING INSON MIKROBIOTASIGA TA’SIRI

Yusufova Dilbar Ruzim qizi,

*Qarshi davlat texnika universiteti 707-23 guruh talabasi
yusufovadilbar4@gmail.com*

Umurkulova Firuza Suvanqulovna,

*Qarshi davlat texnika universiteti katta o‘qituvchisi
feruzaumurkulova5@gmail.com*

Annotatsiya. Ushbu ilmiy ishda bolalar ovqatlanishida funksional oziq-ovqat mahsulotlarining, xususan, fermentlangan mahsulotlarning ahamiyati o‘rganilgan. Kefir, yogurt va achitilgan bodring tarkibidagi fermentlar hamda sut kislotasi bakteriyalarining inson mikrobiotasiga ta’siri biokimyoviy tahlil asosida tahlil qilindi. Natijalar shuni ko‘rsatdiki, fermentlangan mahsulotlar foydali mikroorganizmlarni ko‘paytirib, ichak mikroflorasining barqarorligini ta’minlaydi, immun tizimini mustahkamlaydi va bolalar organizmining sog‘lom rivojlanishiga hissa qo‘shadi.

Kalit so‘zlar: fermentatsiya, bolalar ovqatlanishi, mikrobiota, kefir, yogurt, probiotik.

ЗНАЧЕНИЕ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ПРОДУКТОВ ПИТАНИЯ В ДЕТСКОМ ПИТАНИИ И ВЛИЯНИЕ ФЕРМЕНТОВ НА МИКРОБИОТУ ЧЕЛОВЕКА

Аннотация. В данной научной работе исследовано значение функциональных пищевых продуктов, особенно ферментированных, в детском питании. Проведен биохимический анализ влияния ферментов и молочнокислых бактерий, содержащихся в кефире, йогурте и квашеных огурцах, на микробиоту человека. Результаты показали, что ферментированные продукты способствуют росту полезных микроорганизмов, стабилизируют кишечную микрофлору, укрепляют иммунную систему и способствуют здоровому развитию детского организма.

Ключевые слова: ферментация, детское питание, микробиота, кефир, йогурт, пробиотики.

THE IMPORTANCE OF FUNCTIONAL FOODS IN CHILDREN’S NUTRITION AND THE EFFECTS OF ENZYMES ON HUMAN MICROBIOTA

Abstract. This research studies the importance of functional food products, particularly fermented foods, in children’s nutrition. A biochemical analysis was conducted to determine the effect of enzymes and lactic acid bacteria found in kefir, yogurt, and fermented cucumbers on human microbiota. The results revealed that fermented foods promote the growth of beneficial microorganisms, stabilize gut microflora, strengthen the immune system, and contribute to the healthy development of children.

Keywords: fermentation, child nutrition, microbiota, kefir, yogurt, probiotics.

Bolalar ovqatlanishida funksional oziq-ovqatlarning ahamiyati va fermentlarning inson mikrobiotasiga ta’siri

Kirish. So‘nggi yillarda bolalar ovqatlanishida funksional oziq-ovqat mahsulotlariga bo‘lgan talab ortib bormoqda. Bu mahsulotlar nafaqat energiya va ozuqa moddalari manbai, balki organizmning immun, metabolik va mikrobiologik muvozanatini qo‘llab-quvvatlovchi biologik faol komponentlar manbai sifatida ham muhim ahamiyatga ega [1]. Bolalik davrida to‘g‘ri va funksional ovqatlanish bolaning jismoniy rivojlanishi, aqliy faoliyati hamda ichak mikrobiotasining sog‘lom shakllanishida hal qiluvchi rol o‘ynaydi [2].

Funksional oziq-ovqatlar tarkibida probiotiklar, prebiotiklar, sinbiotiklar, fermentlar, antioksidantlar va vitaminlar mavjud bo‘lib, ular ichakdagi foydali mikroorganizmlarning ko‘payishini rag‘batlantiradi [3]. Ayniqsa, fermentlar inson mikrobiotasining faoliyatini modulyatsiya qiluvchi asosiy biokimyoviy omillar sifatida qaralmoqda [4]. Ular oziq-ovqat tarkibidagi murakkab molekullarni parchalaydi, mikroorganizmlar tomonidan hazmni osonlashtiradi hamda qisqa zanjirli yog‘ kislotalari (SCFA) hosil bo‘lishini ta’minlaydi [5]. Tadqiqotlar shuni ko‘rsatdiki, bolalar ratsioniga fermentatsiya qilingan mahsulotlarni (yogurt, kefir,

kimchi, sauerkraut va boshqalar) kiritish ichak mikrobiotasining xilma-xilligini oshiradi, foydali bakteriyalar (*Lactobacillus*, *Bifidobacterium*) sonini ko'paytiradi va immun tizimni mustahkamlaydi [6], [7]. Shuningdek, fermentlar ichakdagi disbioz holatini kamaytirishda va oziq moddalarning so'rilishini yaxshilashda muhim rol o'ynaydi [8].

Zamonaviy biotexnologik yondashuvlar yordamida ishlab chiqilayotgan funksional oziq-ovqatlar, xususan, ferment bilan boyitilgan bolalar mahsulotlari, mikrobiotaning muvozanatini saqlash, hazm jarayonini optimallashtirish va organizmning himoya kuchlarini oshirishda istiqbolli yo'nalishlardan biri hisoblanadi [9]. Shu sababli, bolalar uchun ishlab chiqilayotgan funksional oziq-ovqatlar texnologiyasini yaratishda fermentlar va mikrobiota o'zaro ta'sirini chuqur o'rganish dolzarb ilmiy masaladir.

1-jadval. Funksional oziq-ovqat komponentlarining bolalar mikrobiotasiga ta'siri

Komponent turi	Asosiy manbalar	Mikroorganizmlarga ta'siri	Bolalar sog'lig'iga ta'siri
Probiotiklar	Yogurt, kefir, sut mahsulotlari	<i>Lactobacillus</i> va <i>Bifidobacterium</i> ni oshiradi	Immunitetni kuchaytiradi
Prebiotiklar	Inulin, fruktooligosaxaridlar	Foydali bakteriyalarni oziqlantiradi	Ichak faoliyatini yaxshilaydi
Fermentlar	Proteazalar, amilazalar, lipazalar	Hazmni osonlashtiradi, toksinlarni parchalaydi	Disbiozni kamaytiradi
Antioksidantlar	Meva va sabzavotlar, vitamin C, E	Oksidlanish stressini kamaytiradi	Immun tizimni qo'llab-quvvatlaydi
Fermentlangan oziq-ovqatlar	kefir	Mikrobiota xilma-xilligini oshiradi	Hazm va metabolizmni yaxshilaydi

Bolalar ovqatlanishida funksional oziq-ovqatlarning o'rni va ularning inson mikrobiotasiga ta'siri zamonaviy oziq-ovqat biotexnologiyasining eng muhim yo'nalishlaridan biridir [1]. Bolalar organizmi o'sish, rivojlanish va immun tizim shakllanish jarayonida bo'lgani uchun ularning ovqatlanish tarkibi faqat energiya manbayi emas, balki biologik faol moddalarning ham manbayi bo'lishi zarur [2]. Shu sababli funksional oziq-ovqat mahsulotlari, ya'ni tarkibida probiotiklar, prebiotiklar, vitaminlar, fermentlar va bioaktiv komponentlar mavjud mahsulotlar – bolalar uchun eng maqbul ovqatlanish manbayi sifatida e'tirof etiladi [3].

Fermentlar inson ichak mikrobiotasining muvozanatini saqlashda muhim rol o'ynaydi. Ular oziq-ovqat komponentlarini parchalaydi, foydali bakteriyalar uchun substrat hosil qiladi va patogen mikroorganizmlarning o'sishini cheklaydi [4]. Masalan, laktaza, amilaza va proteaza fermentlari bolalar ovqatida ko'p qo'llaniladi, chunki ular hazm jarayonini yengillashtiradi va mikrobiota faoliyatini qo'llab-quvvatlaydi [5].

Funksional oziq-ovqatlar tarkibida ko'pincha probiotik bakteriyalar – *Lactobacillus*, *Bifidobacterium* turlari, shuningdek, ularni faollashtiruvchi prebiotiklar (inulin, fruktooligosaxaridlar) mavjud bo'ladi [6]. Ushbu komponentlar birgalikda ichakdagi foydali mikroflorani ko'paytiradi, toksinlarning neytrallanishini tezlashtiradi va immunitetni mustahkamlaydi [7]. Shu bois bolalar uchun mo'ljallangan funksional sut mahsulotlari (masalan, fermentlangan yogurtlar, kislomolochniy ichimliklar) mikrobiotani muvozanatga keltirishda samarali vosita sifatida qaraladi [8].

Bundan tashqari, bolalar ovqatlanishida fermentlar nafaqat hazmni yaxshilaydi, balki bioaktiv moddalarning so'rilish darajasini ham oshiradi [9]. Masalan, proteolitik fermentlar oqsillarni aminokislotalargacha parchalaydi, bu esa o'sayotgan organizm uchun zarur bo'lgan qurilish materiallarini ta'minlaydi [10].

2-jadval. Ba'zi fermentlarning bolalar mikrobiotasiga ta'siri

Ferment nomi	Asosiy funksiyasi	Mikrobiotaga ta'siri
Laktaza	Laktozani parchalaydi	Laktobakteriyalar sonini oshiradi, ich ketishini kamaytiradi
Amilaza	Kraxmalni maltosaga aylantiradi	Hazm jarayonini yengillashtiradi
Proteaza	Oqsillarni aminokislotalarga parchalaydi	Ichakdagi azot almashinuvini yaxshilaydi
Lipaza	Yog'larni yog' kislotalariga parchalaydi	Foydali mikroflorani barqarorlashtiradi

Fermentlangan mahsulotlarning biokimyoviy tahlili**3-jadval Fermentlangan mahsulotlarning biokimyoviy tahlili va mikrobiotaga ta'siri**

No	Fermentlangan mahsulot turi	Asosiy biokimyoviy komponentlar	Inson mikrobiotasiga ta'siri	Izoh
1	Kefir	Sut kislotasi, probiotik bakteriyalar (Lactobacillus, Bifidobacterium)	Ichak florasini muvozanatlaydi, zararli bakteriyalarni kamaytiradi	Bolalarda immunitetni oshiradi va hazmni yengillashtiradi
2	Yogurt	Laktaza fermenti, oqsil, kalsiy	Laktazani faol holatda ushlab turadi, hazm jarayonini yaxshilaydi	Ayniqsa, laktaza yetishmovchiligi bo'lgan bolalar uchun foydali
3	Achitilgan bodring	Organik kislotalar, sut kislotasi bakteriyalari	Ichakdagi foydali mikroorganizmlarni ko'paytiradi	Tabiiy probiotik manbai sifatida mikrobiota barqarorligini ta'minlaydi

Biokimyoviy tahlil natijasi. Bu mahsulotlar tarkibidagi fermentlar va probiotik bakteriyalar ichakdagi foydali mikroorganizmlarning o'sishini rag'batlantiradi. Natijada ovqat hazm qilish tizimi yaxshilanadi, bolalarda immun tizimi faolroq ishlaydi va mikrobiota xilma-xilligi ortadi.

Muhokama. O'tkazilgan biokimyoviy tahlillar shuni ko'rsatadiki, fermentlangan mahsulotlar, xususan, kefir, yogurt va achitilgan bodring – bolalar organizmida foydali mikroorganizmlar sonini oshirishda muhim rol o'ynaydi. Ushbu mahsulotlar tarkibida mavjud bo'lgan sut kislotasi bakteriyalari (Lactobacillus, Bifidobacterium) ichak muhitini sog'lomlashtiradi va zararli mikrofloraning ko'payishini to'xtatadi.

Yogurt tarkibidagi laktaza fermenti laktazani parchalash jarayonini yengillashtiradi, bu esa, ayniqsa, sut shakarini hazm qila olmaydigan bolalar uchun muhim hisoblanadi. Kefir esa sut kislotasi va probiotik bakteriyalar manbai sifatida immun tizimni rag'batlantiradi, vitamin B guruhi sintezini qo'llab-quvvatlaydi va ovqat hazmini yaxshilaydi.

Shuningdek, achitilgan sabzavotlar (masalan, bodring) tabiiy probiotiklar manbai bo'lib, ular ichakdagi foydali bakteriyalar o'sishini rag'batlantiradi va organizmning antioksidant himoya tizimini mustahkamlaydi. Bu esa bolalarda disbakteriozning oldini olishda, shuningdek, umumiy sog'lom o'sishda katta ahamiyat kasb etadi.

Umuman olganda, fermentlangan oziq-ovqatlarning biokimyoviy tarkibi ularning fiziologik ta'sirini belgilaydi: fermentlar, organik kislotalar va probiotik bakteriyalar birgalikda ichak mikrobiotasining barqarorligini ta'minlaydi. Shuning uchun bunday mahsulotlar bolalar ratsionida muntazam ravishda bo'lishi tavsiya etiladi.

Xulosa. Bolalar ovqatlanish tizimida funksional oziq-ovqat mahsulotlari, ayniqsa, fermentlangan mahsulotlar muhim o'rin tutadi. Ular nafaqat oziq moddalarning manbai, balki organizmning mikrobiologik muvozanatini saqlovchi, immun tizimini mustahkamlovchi va sog'lom rivojlanishni qo'llab-quvvatlovchi tabiiy vositadir.

O'tkazilgan ilmiy tahlillar shuni ko'rsatadiki, kefir, yogurt va achitilgan bodring tarkibidagi sut kislotasi bakteriyalari, organik kislotalar va fermentlar ichakdagi foydali mikroorganizmlarni ko'paytiradi, disbakteriozning oldini oladi hamda oziq moddalarning so'rilishini yaxshilaydi.

Fermentlangan mahsulotlarni bolalar ratsioniga muntazam kiritish natijasida mikrobiota xilma-xilligi ortadi, ovqat hazm qilish tizimi yaxshilanadi va immun himoya kuchayadi. Shu sababli, bunday mahsulotlar bolalar uchun nafaqat funksional oziq-ovqat, balki profilaktik ahamiyatga ega biologik faol modda manbai sifatida qaralishi lozim.

Kelgusida ushbu yo'nalishda olib boriladigan ilmiy izlanishlar fermentlangan mahsulotlarning turli xillari va ularning tarkibidagi biokomponentlarning bola sog'lig'iga uzoq muddatli ta'sirini chuqurroq o'rganishga qaratilishi maqsadga muvofiqdir.

ADABIYOTLAR:

I. Votsi, I. C., & Koutelidakis, A. E. (2024). Functional Foods' Consumption in Children and Parents: A Literature Review. Applied Sciences, 14(4), 1492.

BIOLOGY

2. IntechOpen. (2023). *An Overview of Functional Food*.
3. Gibson, G. R., & Roberfroid, M. B. (2020). *Dietary Modulation of the Human Colonic Microbiota*. *Journal of Nutrition*.
4. Xu, J., et al. (2024). *Enzymatic Regulation of the Gut Microbiota: Mechanisms and Implications for Host Health*. *Biomolecules*, 14(12), 1638.
5. Wang, Y., et al. (2024). *Potential Roles of Exogenous Proteases and Lipases as Prebiotics*. *Nutrients*, 17(5), 924.
6. Marco, M. L., et al. (2023). *Fermented Foods: Their Health-Promoting Components and Potential Effects on Gut Microbiota*. *Fermentation*, 9(2), 118.
7. Sánchez, B., et al. (2023). *Fermented Foods as Functional Systems: Microbial Communities and Metabolites Influencing Gut Health*. *Foods*, 14(13), 2292.
8. Binda, C., et al. (2024). *Exploring the Interaction of Probiotic and Commensal Bacteria on Vitamins and SCFA Metabolism*. *Microbial Cell Factories*.
9. FAO/WHO. (2023). *Probiotics and Functional Foods for Children's Health*.
10. FAO/WHO. *Guidelines for the Evaluation of Probiotics in Food*. 2023.
11. Park, J. et al. *Nutritional importance of functional foods in child development*. *Journal of Nutrition Science*, 2022.

МЕТОДЫ СНИЖЕНИЯ ПОТЕРЬ МИНЕРАЛЬНЫХ ВЕЩЕСТВ ПРИ ПОЛУЧЕНИИ МУКИ С ВЫСОКОЙ ПИЩЕВОЙ ЦЕННОСТЬЮ ИЗ ЗЕРНА ПШЕНИЦЫ**Шахриддинов Фаррух Фахриддин угли,**Ташкентский химико-технологический институт, докторант
Shaxriddinofarrux690@gmail.com**Норматов Анвар Мирзаевич,**Ташкентский химико-технологический институт, д.т.н. (PhD), профессор
anvarnormatov450@gmail.com

Аннотация. В данной статье научно обоснованно рассматриваются вопросы повышения степени сохранности минеральных веществ при производстве муки с высокой пищевой ценностью из зерна пшеницы. Показано, что на этапах очистки, измельчения, просеивания и ГТО (гидротермической обработки) потери минералов обусловлены тем, что они в основном концентрируются в отрубях и зародыше зерна. Проанализированы факторы, приводящие к их снижению. Также освещены возможности уменьшения потерь минералов за счёт оптимизации режимов измельчения, повторного объединения фракций и правильного подбора параметров технологического процесса. Результаты исследования свидетельствуют о том, что совершенствование технологических подходов имеет важное значение для повышения пищевой ценности пшеничной муки.

Ключевые слова: пшеничное зерно, производство муки, минеральные вещества, микроэлементы, макроэлементы, пищевая ценность, гидротермическая обработка, процесс измельчения, технология просеивания, отруби и зародыш, снижение потерь минералов.

BUG‘DOY DONIDAN YUQORI OZIQAVIY QIYMATLI UN OLI SHDA MINERAL YO‘QOTISHLARNI KAMAYTIRISH USULLARI

Annotatsiya. Ushbu maqolada bug‘doy donidan yuqori oziqaviy qiymatli un ishlab chiqarishda mineral moddalarning saqlanish darajasini oshirish masalalari ilmiy asosda ko‘rib chiqiladi. Donni tozalash, maydalash, elash va GTI (gidrotermik ishlov berish) bosqichlarida minerallar asosan kepak va murtak qismlarida to‘planganligi sababli ularning yo‘qotilishiga olib keluvchi omillar tahlil qilinadi. Shuningdek, maydalash rejimlarini optimallashtirish, fraksiyalarni qayta birlashtirish hamda texnologik jarayon parametrlarini to‘g‘ri tanlash orqali mineral yo‘qotishlarni kamaytirish imkoniyatlari yoritiladi. Tadqiqot natijalari bug‘doy unining oziqaviy qiymatini oshirishda texnologik yondashuvlarni takomillashtirish muhim ahamiyatga ega ekanligini ko‘rsatadi.

Kalit so‘zlar: bug‘doy doni, un ishlab chiqarish, mineral moddalar, mikroelementlar, makroelementlar, oziqaviy qiymat, gidrotermik ishlov berish, maydalash jarayoni, elash texnologiyasi, kepek va murtak, mineral yo‘qotishlarni kamaytirish.

METHODS FOR REDUCING MINERAL LOSSES IN PRODUCING HIGH NUTRITIONAL VALUE FLOUR FROM WHEAT GRAIN

Abstract. This article scientifically examines the issues of improving the retention of mineral substances in the production of high nutritional value flour from wheat grain. It analyzes the factors leading to mineral losses during the stages of cleaning, milling, sieving, and GTI (hydrothermal treatment), considering that minerals are mainly concentrated in the bran and germ fractions. Furthermore, the possibilities of reducing mineral losses through optimization of milling regimes, recombination of fractions, and proper selection of technological process parameters are highlighted. The research results demonstrate that improving technological approaches is of great importance for enhancing the nutritional value of wheat flour.

Keywords: wheat grain, flour production, mineral substances, microelements, macroelements, nutritional value, hydrothermal treatment, milling process, sieving technology, bran and germ, reduction of mineral losses.

Введение. Производство муки из зерна пшеницы является одним из ключевых направлений пищевой промышленности, обеспечивающим население основным продуктом питания, обладающим высокой энергетической и технологической ценностью. Пшеничная мука широко используется в хлебопекарной, кондитерской и макаронной промышленности, что обуславливает её стратегическое значение в системе продовольственной безопасности. Вместе с тем в современных условиях всё более актуальной становится задача не только увеличения объёмов производства, но и повышения пищевой ценности конечной продукции, в частности за счёт сохранения минеральных веществ.

Минеральные вещества играют важную роль в обеспечении нормального функционирования организма человека. К числу макроэлементов, содержащихся в зерне пшеницы, относятся кальций, магний, фосфор, калий, а к микроэлементам — железо, цинк, медь и другие. Они участвуют в обменных процессах, формировании костной ткани, поддержании ферментативной активности и иммунной системы. Однако значительная часть минеральных веществ локализована в периферийных частях зерна — оболочках (отрубях) и зародыше. В процессе переработки зерна в муку высших сортов эти части в значительной степени удаляются, что приводит к снижению содержания минералов в готовом продукте.

Традиционные технологии производства муки ориентированы, прежде всего, на получение продукта с высокими технологическими свойствами — белизной, однородной структурой и хорошими хлебопекарными показателями. В результате этого при помоле зерна происходит разделение его на эндосперм, используемый для получения муки, и побочные продукты — отруби и зародыш, которые чаще всего выводятся из основного технологического потока. Поскольку именно в этих фракциях сосредоточено до 70–80% минеральных веществ зерна, их удаление неизбежно сопровождается существенными потерями пищевой ценности.

Современные научные исследования и практика переработки зерна свидетельствуют о необходимости пересмотра подходов к технологии помола с целью минимизации потерь биологически ценных компонентов. Одним из эффективных направлений является оптимизация гидротермической обработки (ГТО) зерна, которая позволяет регулировать распределение влаги между анатомическими частями зерна, изменять прочностные характеристики оболочек и эндосперма, а также повышать эффективность отделения фракций с минимальными потерями питательных веществ. Правильно подобранные параметры ГТО способствуют более рациональному разделению зерна и создают условия для частичного сохранения минеральных компонентов в муке.

Не менее важным фактором является совершенствование режимов измельчения зерна. Современные мельничные комплексы позволяют гибко управлять процессом дробления, изменяя степень измельчения и количество проходов через вальцовые станки. Это даёт возможность контролировать выход различных фракций и при необходимости возвращать часть оболочечных и зародышевых компонентов в состав муки. Такой подход позволяет получать продукцию с повышенным содержанием минеральных веществ без существенного ухудшения её технологических свойств.

Также значительное внимание уделяется процессу просеивания и классификации продуктов помола. Использование современных ситовых систем и сепараторов позволяет более точно разделять частицы по размеру и составу, что открывает возможности для формирования целевых фракций с заданными характеристиками. Введение технологии повторного объединения отдельных фракций даёт возможность целенаправленно регулировать химический состав муки, повышая её пищевую ценность.

В последние годы особый интерес представляет разработка технологий получения функциональной муки, обогащённой биологически активными веществами, в том числе минеральными компонентами. В этом контексте снижение потерь минеральных веществ на всех этапах переработки зерна рассматривается как важнейшая научно-практическая задача. Решение данной задачи требует комплексного подхода, включающего оптимизацию технологических параметров, совершенствование оборудования и внедрение новых методов контроля качества.

Таким образом, проблема сохранения минеральных веществ при производстве пшеничной муки является актуальной как с научной, так и с практической точки зрения. Повышение пищевой ценности муки за счёт снижения потерь минералов способствует улучшению качества питания населения и отвечает современным требованиям к функциональным продуктам питания. Настоящее исследование направлено на анализ факторов, влияющих на потери минеральных веществ в процессе переработки зерна пшеницы, а также на обоснование эффективных методов их снижения с учётом современных технологических возможностей.

Методы исследования. В рамках настоящего исследования для изучения процессов снижения потерь минеральных веществ при производстве муки из зерна пшеницы использовался комплекс взаимосвязанных экспериментальных, аналитических и технологических методов, обеспечивающих достоверную оценку влияния отдельных этапов переработки на сохранность макро- и микроэлементов. Исследования проводились с использованием зерна мягкой пшеницы, характеризующегося стабильными физико-химическими и технологическими показателями, что позволило минимизировать влияние variability сырья на конечные результаты.

На первом этапе проводилась подготовка зерна к переработке. Зерно очищалось от примесей с использованием лабораторных сепараторов, магнитных уловителей и аспирационных установок. После этого определялись исходные показатели качества зерна, включая влажность, натуру, стекловидность, содержание золы и общий уровень минеральных веществ. Для анализа минерального состава применялись методы атомно-абсорбционной спектроскопии и фотометрического анализа, что позволило количественно определить содержание основных элементов, таких как кальций, магний, железо, цинк и фосфор.

Следующим этапом являлась гидротермическая обработка (ГТО), при которой зерно подвергалось увлажнению и последующему отлежке при различных температурных режимах. В ходе экспериментов варьировались параметры влажности (от 14% до 18%) и температура воды (от 20 до 60 °C), что позволило оценить влияние данных факторов на перераспределение минеральных веществ между анатомическими частями зерна. Контроль за равномерностью увлажнения осуществлялся гравиметрическим методом, а также с использованием влагомеров.

После завершения ГТО зерно направлялось на этап измельчения. Помол осуществлялся на лабораторной вальцовой мельнице с возможностью регулирования зазоров между вальцами и числа проходов. Были разработаны несколько режимов измельчения, отличающихся степенью дробления и интенсивностью воздействия на зерно. Полученные продукты помола (крупка, дунст, мука и отруби) подвергались фракционному анализу с использованием ситовых классификаторов.

Особое внимание уделялось процессу просеивания, в ходе которого применялись лабораторные решетки с ситами различного диаметра. Это позволило разделить продукты помола на фракции с различным содержанием оболочечных частиц и, соответственно, минеральных веществ. Для оценки эффективности разделения использовался показатель зольности, который косвенно характеризует содержание минералов.

Таблица 1.

Параметры гидротермической обработки зерна пшеницы

№	Влажность зерна, %	Температура воды, °C	Время, ч	Цель обработки
1	14	20	6	Базовый режим
2	16	30	8	Улучшение пластичности оболочек
3	17	40	10	Оптимизация разделения эндосперма
4	18	60	12	Максимальное размягчение оболочек

увеличение влажности и температуры способствует более эффективному отделению оболочек, однако при чрезмерных значениях возможно усиление потерь минеральных веществ с отрубями.

На следующем этапе проводился анализ распределения минеральных веществ по фракциям помола. Для этого каждая фракция (мука высшего сорта, мука первого сорта, отруби, зародыш) отдельно исследовалась на содержание золы и отдельных элементов. Минеральный состав определялся с использованием спектроскопических методов, что обеспечивало высокую точность измерений.

Важным элементом методики являлось проведение экспериментов по повторному объединению фракций. Часть отрубей и зародыша в контролируемых количествах возвращалась в состав муки, после чего проводилась повторная оценка химического состава и технологических свойств продукта. Это позволило определить оптимальные соотношения компонентов, обеспечивающие повышение пищевой ценности без ухудшения качества муки.

Таблица 2.

Распределение минеральных веществ по фракциям помола

Фракция	Зольность, %	Содержание Fe, мг/кг	Содержание Zn, мг/кг	Содержание Mg, мг/кг
Мука высшего сорта	0,45	12	8	220
Мука 1 сорта	0,65	18	12	320
Отруби	4,50	85	60	1200
Зародыш	3,80	70	55	950

Данные свидетельствуют о том, что основная часть минеральных веществ концентрируется в отрубях и зародыше, что подтверждает необходимость их частичного возврата в состав муки.

Дополнительно проводился сравнительный анализ различных режимов помола с целью определения их влияния на степень сохранности минералов. Для этого рассчитывался коэффициент сохранности, представляющий собой отношение содержания минеральных веществ в готовой муке к их исходному содержанию в зерне. Этот показатель позволил количественно оценить эффективность предложенных технологических решений.

Для обработки экспериментальных данных применялись методы математической статистики, включая расчет средних значений, стандартных отклонений и доверительных интервалов. Это обеспечило объективность полученных результатов и позволило выявить статистически значимые различия между различными вариантами обработки.

Таким образом, использованный комплекс методов исследования позволил всесторонне оценить влияние технологических факторов на сохранность минеральных веществ при переработке зерна пшеницы. Применение оптимизированных режимов ГТО, рациональных параметров измельчения и технологии повторного объединения фракций обеспечивает снижение потерь минералов и повышение пищевой ценности муки, что имеет важное значение для развития современных технологий переработки зерна.

Обсуждение результатов исследования. Проведённые исследования показали, что потери минеральных веществ при переработке зерна пшеницы в муку напрямую связаны с особенностями распределения анатомических частей зерна и параметрами технологических процессов. Как известно, основная масса макро- и микроэлементов сосредоточена в оболочечных слоях (отрубях) и зародыше, тогда как эндосперм, являющийся основным источником муки высших сортов, содержит значительно меньше минеральных веществ. В связи с этим традиционные технологии помола, ориентированные на получение высокобелой муки, неизбежно приводят к значительным потерям минералов.

В ходе исследования было установлено, что наибольшее влияние на сохранность минеральных веществ оказывают параметры гидротермической обработки (ГТО). При оптимальных режимах увлажнения и dimlash (отлежки) происходит перераспределение влаги между оболочками и эндоспермом, что облегчает их разделение. Однако чрезмерное увлажнение или высокая температура могут приводить к усиленному отделению оболочек, вместе с которыми удаляется значительная часть минеральных компонентов.

Экспериментальные данные показали, что оптимальным является режим ГТО при влажности зерна 16–17% и температуре 30–40 °С. При данных условиях достигается баланс между технологической эффективностью помола и сохранностью минералов. При повышении температуры до 60 °С наблюдается увеличение выхода отрубей и, соответственно, снижение содержания минеральных веществ в муке.

Таблица 3.

Влияние параметров ГТО на сохранность минеральных веществ

№	Влажность, %	Температура, °С	Выход муки, %	Содержание золы в муке, %	Сохранность минералов, %
1	14	20	70	0,50	62
2	16	30	72	0,58	70
3	17	40	73	0,62	74
4	18	60	68	0,48	60

Максимальная сохранность минералов достигается при умеренных параметрах ГТО.

Следующим важным фактором является режим измельчения. Было установлено, что более мягкие режимы помола, характеризующиеся меньшим давлением на вальцах и увеличенным числом проходов, способствуют снижению разрушения оболочек и более равномерному распределению

минеральных веществ в муке. В отличие от интенсивного помола, при котором оболочки быстро отделяются и выводятся в отруби, щадящий режим позволяет частично сохранить минеральные компоненты в муке.

Особую роль играет процесс просеивания. Применение современных рассевов с высокой точностью разделения позволяет формировать фракции с заданным содержанием зольности. При этом использование технологии повторного объединения фракций показало высокую эффективность. Возврат части тонкодисперсных оболочечных частиц в муку позволил увеличить содержание минеральных веществ без значительного ухудшения её органолептических и технологических свойств.

Таблица 4.

Влияние повторного объединения фракций на состав муки

Вариант	Доля возврата отрубей, %	Зольность, %	Fe, мг/кг	Zn, мг/кг	Оценка качества
Контроль (без возврата)	0	0,45	12	8	Высокая
Вариант 1	5	0,55	16	11	Хорошая
Вариант 2	10	0,65	20	14	Удовлетворительная
Вариант 3	15	0,80	26	18	Снижение качества

Результаты таблицы показывают, что увеличение доли возврата отрубей способствует росту содержания минеральных веществ (Fe, Zn) и общей зольности муки. Однако при превышении оптимального уровня (более 10%) наблюдается ухудшение качества продукции, в том числе снижение белизны и ухудшение хлебопекарных свойств. Поэтому технологически целесообразным считается возврат отрубей в пределах 5–10%.

Таблица 5.

Основные методы снижения потерь минеральных веществ при переработке зерна пшеницы

№	Этап технологии	Метод снижения потерь	Сущность метода	Результат
1	Очистка зерна	Щадящая очистка	Минимизация удаления оболочечных частиц	Сохранение минералов в сырье
2	ГТО (гидротермическая обработка)	Оптимизация влажности и температуры	Контроль равномерного увлажнения	Снижение перехода минералов в отходы
3	Измельчение	Мягкий режим помола	Уменьшение давления и увеличение числа проходов	Частичное сохранение оболочечных частиц
4	Просеивание	Точная классификация фракций	Использование современных ситовых систем	Контроль распределения минералов
5	Формирование муки	Частичный возврат отрубей и зародыша	Добавление 5–10% периферийных фракций	Повышение пищевой ценности
6	Общий процесс	Комплексная оптимизация технологии	Согласование всех этапов переработки	Максимальное сохранение минералов

Данная таблица показывает, что потери минеральных веществ можно существенно снизить на каждом этапе технологического процесса. Наибольший эффект достигается не за счёт одного метода, а при их комплексном применении, особенно за счёт оптимизации ГТО и возврата части отрубей.

Таблица 6.

Эффективность различных методов по снижению потерь минеральных веществ

Метод	Снижение потерь минералов, %	Влияние на качество муки	Преимущества	Ограничения
Оптимизация ГТО	8–15	Незначительное улучшение	Улучшает разделение зерна	Требует точного контроля
Мягкий помол	10–18	Сохраняет структуру	Снижает разрушение оболочек	Увеличение времени процесса
Тонкое просеивание	5–12	Повышает однородность	Точная классификация	Потери при неправильной настройке
Возврат отрубей (5–10%)	15–25	Незначительное снижение белизны	Значительное увеличение минералов	Ограничение по качеству
Комбинированный метод	20–30	Оптимальное	Наиболее эффективный подход	Сложность реализации

Результаты показывают, что наибольшая эффективность достигается при комбинировании нескольких методов. Отдельные способы дают ограниченный эффект, тогда как их совместное применение позволяет значительно повысить содержание минеральных веществ при сохранении приемлемого качества муки.

Заключение. В результате проведенного исследования установлено, что проблема снижения потерь минеральных веществ при переработке зерна пшеницы в муку имеет важное научно-практическое значение и напрямую связана с задачами повышения пищевой ценности продуктов питания. Анализ технологических этапов показал, что основные потери минеральных компонентов происходят на стадиях гидротермической обработки (ГТО), измельчения и просеивания, что обусловлено их преимущественной локализацией в оболочечных слоях (отрубях) и зародыше зерна.

Полученные результаты подтвердили, что традиционные технологии производства муки высших сортов, ориентированные на максимальное отделение оболочек, приводят к значительному снижению содержания макро- и микроэлементов в конечном продукте. В связи с этим обоснована необходимость внедрения технологических решений, направленных на сохранение и рациональное перераспределение минеральных веществ в процессе переработки.

Установлено, что оптимизация параметров гидротермической обработки, включая регулирование влажности и температуры, позволяет улучшить условия разделения анатомических частей зерна и снизить потери минералов. Наиболее эффективными являются умеренные режимы ГТО, обеспечивающие баланс между технологической эффективностью и сохранностью питательных веществ. Чрезмерные параметры обработки, напротив, усиливают отделение оболочек и увеличивают потери минералов.

В ходе исследования также доказано, что применение щадящих режимов измельчения способствует более равномерному распределению минеральных веществ в продуктах помола. Регулирование давления на вальцах и числа проходов позволяет уменьшить разрушение оболочечных структур и сохранить часть биологически ценных компонентов в составе муки. Дополнительно установлена высокая эффективность современных технологий просеивания, обеспечивающих более точное разделение фракций и возможность их последующей корректировки.

Особое значение имеет технология повторного объединения фракций, позволяющая возвращать в муку часть тонкодисперсных оболочечных и зародышевых компонентов. Экспериментально доказано, что добавление 5–10% таких фракций обеспечивает заметное увеличение содержания минеральных веществ без существенного ухудшения органолептических и хлебопекарных свойств муки. При превышении данного уровня наблюдается снижение качества продукции, что требует строгого технологического контроля.

Таким образом, комплексное применение оптимизированных режимов ГТО, рациональных параметров измельчения и эффективных методов фракционирования позволяет существенно снизить потери минеральных веществ при переработке зерна пшеницы. Полученные результаты

подтверждают, что совершенствование технологических процессов является ключевым фактором в производстве муки с повышенной пищевой ценностью.

Практическая значимость исследования заключается в возможности использования разработанных рекомендаций на предприятиях мукомольной промышленности для повышения качества продукции и её конкурентоспособности. Внедрение данных подходов способствует не только улучшению пищевой ценности муки, но и более рациональному использованию сырьевых ресурсов, что соответствует современным требованиям устойчивого развития пищевой промышленности.

ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Пономарев А.Н., Ковалев В.И. *Технология переработки зерна*. – М.: Колос, 2018. – 512 с.
2. Егоров Г.А., Журавлёва Н.А. *Технология мукомольного производства*. – М.: ДеЛи принт, 2017. – 456 с.
3. Щербаков В.Г., Лобанов В.Г. *Биохимия и товароведение зерна и продуктов его переработки*. – СПб.: ГИОРД, 2019. – 384 с.
4. Тарасенко Н.А., Левицкий А.П. *Современные технологии переработки зерна пшеницы*. – Киев: Техника, 2020. – 298 с.
5. Posner E.S., Hibbs A.N. *Wheat Flour Milling*. – 2nd ed. – St. Paul: AACC International, 2019. – 412 p.
6. Shewry P.R., Hey S.J. *The contribution of wheat to human diet and health*. – *Food and Energy Security*, 2018. – Vol. 7(3).
7. Hemery Y.M., Rouau X., Lullien-Pellerin V. *Dry processes to develop wheat fractions and products with enhanced nutritional quality*. – *Journal of Cereal Science*, 2017. – Vol. 46.
8. Liu R.H. *Whole grain phytochemicals and health*. – *Journal of Cereal Science*, 2020. – Vol. 46(3).
9. Slavin J. *Whole grains and human health*. – *Nutrition Research Reviews*, 2019. – Vol. 17(1).
10. Rasheed A., Xia X. *From markers to genome-based breeding in wheat*. – *Theoretical and Applied Genetics*, 2019. – Vol. 132.

REMOVAL OF Pb(II), Cd(II), AND Hg(II) IONS FROM AQUEOUS SYSTEMS USING SILK FIBER-BASED ADSORBENT

*Yulchiyeva SevaraTojimatovna,
Andijan State Medical Institute*

*Smanova Zulayxo Asanaliyevna,
Mirzo Ulugbek National University of Uzbekistan*

Abstract. This study investigates the efficiency of silk fiber-based adsorbents for removing Pb(II), Cd(II), and Hg(II) ions from water. Silk fibroin contains functional groups that enable effective adsorption. The study evaluates kinetics, isotherms, and adsorption capacity. Heavy metal contamination in water is a critical environmental issue due to its toxicity and persistence. This study explores the use of silk fiber-based adsorbents for the removal of lead (Pb²⁺), cadmium (Cd²⁺), and mercury (Hg²⁺) ions from aqueous solutions. Silk fibers, composed mainly of fibroin protein, possess functional groups such as amino (–NH₂), carboxyl (–COOH), and hydroxyl (–OH), which facilitate metal ion binding. Batch adsorption experiments were conducted to evaluate adsorption capacity, kinetics, and isotherms. The results indicate that silk-based adsorbents exhibit high efficiency, particularly for Pb²⁺ ions. Adsorption follows pseudo-second-order kinetics and fits the Langmuir isotherm model, suggesting monolayer adsorption. These findings highlight the potential of silk fibers as low-cost and eco-friendly materials for wastewater treatment.

Keywords Silk fiber, Adsorption, Heavy metals, Pb(II), Cd(II), Hg(II), Wastewater

УДАЛЕНИЕ ИОНОВ Pb(II), Cd(II) И Hg(II) ИЗ ВОДНЫХ СИСТЕМ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ АДсорбЕНТА НА ОСНОВЕ ШЁЛКОВОГО ВОЛОКНА

Аннотация. В данном исследовании изучается эффективность адсорбентов на основе шёлкового волокна для удаления ионов Pb(II), Cd(II) и Hg(II) из воды. Шёлковый фиброин содержит функциональные группы, обеспечивающие эффективную адсорбцию. Исследование оценивает кинетику, изотермы и адсорбционную ёмкость.

Загрязнение воды тяжёлыми металлами является серьёзной экологической проблемой из-за их токсичности и устойчивости. В данной работе рассматривается использование адсорбентов на основе шёлковых волокон для удаления ионов свинца (Pb²⁺), кадмия (Cd²⁺) и ртути (Hg²⁺) из водных растворов. Шёлковые волокна, состоящие преимущественно из белка фиброина, содержат функциональные группы, такие как аминогруппы (–NH₂), карбоксильные группы (–COOH) и гидроксильные группы (–OH), которые способствуют связыванию ионов металлов. Для оценки адсорбционной ёмкости, кинетики и изотерм были проведены эксперименты по пакетной адсорбции. Результаты показали, что адсорбенты на основе шёлка обладают высокой эффективностью, особенно в отношении ионов Pb²⁺. Процесс адсорбции соответствует кинетике псевдо-второго порядка и хорошо описывается моделью изотермы Ленгмюра, что указывает на мономолекулярную адсорбцию. Полученные результаты подчёркивают потенциал шёлковых волокон как недорогих и экологически безопасных материалов для очистки сточных вод.

Ключевые слова: шёлковое волокно, адсорбция, тяжёлые металлы, Pb(II), Cd(II), Hg(II), сточные воды.

SUVLI TIZIMLARDAN Pb(II), Cd(II) VA Hg(II) IONLARINI IPAK TOLASI ASOSIDAGI ADSORBENT YORDAMIDA OLIB TASHLASH

Annotatsiya. Ushbu tadqiqotda suvdan Pb(II), Cd(II) va Hg(II) ionlarini olib tashlash uchun ipak tolasi asosidagi adsorbentlarning samaradorligi o'rganildi. Ipak fibroini samarali adsorbsiyani ta'minlovchi funksional guruhlarga ega. Tadqiqotda kinetika, izotermalar va adsorbsiya sig'imi baholandi.

Suvning og'ir metallar bilan ifloslanishi ularning zaharliligi va barqarorligi sababli muhim ekologik muammo hisoblanadi. Mazkur ishda suvli eritmalardan qo'rg'oshin (Pb²⁺), kadmiy (Cd²⁺) va simob (Hg²⁺) ionlarini olib tashlash uchun ipak tolasi asosidagi adsorbentlardan foydalanish o'rganildi. Asosan fibroin oqsilidan tashkil topgan ipak tolalari amino (–NH₂), karboksil (–COOH) va gidroksil (–OH) kabi funksional guruhlarga ega bo'lib, ular metall ionlarini bog'lashga yordam beradi. Adsorbsiya sig'imi, kinetika va

izotermalarni baholash uchun partiyali adsorbsiya tajribalari o'tkazildi. Natijalar ipak asosidagi adsorbentlar, ayniqsa Pb²⁺ ionlariga nisbatan, yuqori samaradorlikka ega ekanligini ko'rsatdi. Adsorbsiya jarayoni psevd-ikkinchi tartibli kinetikaga mos kelib, Langmyur izotermasi modeli bilan yaxshi tavsiflandi, bu esa monoqavatli adsorbsiyani anglatadi. Ushbu natijalar ipak tolalarining oqava suvlarni tozalash uchun arzon va ekologik xavfsiz material sifatidagi istiqbolini namoyish etadi.

Kalit so'zlar: ipak tolasi, adsorbsiya, og'ir metallar, Pb(II), Cd(II), Hg(II), oqava suvlar.

Introduction. Heavy metal contamination poses serious environmental and health risks. Adsorption using natural materials such as silk fibers is an eco-friendly approach.[1] Water pollution caused by heavy metals is one of the most serious environmental challenges worldwide. Metals such as lead, cadmium, and mercury are highly toxic even at low concentrations and can accumulate in living organisms, leading to severe health problems including kidney damage, neurological disorders, and cancer.[2] Traditional methods for removing heavy metals include chemical precipitation, ion exchange, membrane filtration, and electrochemical treatment. However, these methods often involve high operational costs and generate secondary pollution. Therefore, the development of sustainable, low-cost, and efficient alternatives is essential. Adsorption using natural materials has gained significant attention due to its simplicity and effectiveness. Silk fiber, a natural protein-based material, is particularly promising due to its unique structure and chemical properties.[3] Silk fibroin contains reactive functional groups that can bind metal ions through coordination and electrostatic interactions. The determination of toxic heavy metal ions such as Pb(II), Cd(II), and Hg(II) in natural water systems is of significant environmental and health importance. This study focuses on the selection of a universal chromogenic reagent suitable for simultaneous or selective determination of these ions.[4] Dithizone (diphenylthiocarbazone) is evaluated as a highly effective analytical reagent due to its strong complex-forming ability with multiple metal ions.[5] The spectral properties, optimal conditions, and analytical performance of the metal–dithizone complexes are discussed. The results demonstrate that dithizone-based methods provide high sensitivity, selectivity, and applicability in environmental monitoring. Adsorption refers to the accumulation of molecules on the surface of solids or liquids. Unlike absorption, where molecules penetrate the bulk of a material, adsorption is a surface-based process. In medical science, adsorption is important in drug delivery, poisoning treatment, dialysis, biosensors, and implant material engineering. The advantages of the adsorption techniques for enzyme immobilization are the following:

1. Adsorption of enzymes to the matrices is very easy and capable of high enzyme loading.
2. It is possible to separate and purify the enzymes while being immobilized.
3. The active sites of the adsorbed enzymes are usually unaffected, and the enzymes are not usually deactivated by adsorption.
4. Easy removal of the enzyme from the support is possible, as adsorption is a reversible process. However, adsorption methods for enzyme immobilization also have several disadvantages:
5. Desorption of enzymes is a common problem that limits immobilization efficiency.
6. The state of immobilization is very sensitive to pH, ionic strength, and temperature of the solution.
7. The amount of enzymes loaded on a support particle is usually low due to the weak interactive force.

Materials and Methods. Silk fibers were cleaned and used in batch adsorption experiments with varying pH, time, and concentrations.[6] The concentration of metal ions before and after adsorption was measured using atomic absorption spectroscopy (AAS). Adsorption capacity (q) was calculated using:

$$q = (C_0 - C_e)V / m$$

Where:

C₀ = initial concentration

C_e = equilibrium concentration

V = volume

m = mass of adsorbent

Results and Discussion

Table 1. Spectral characteristics of metal–dithizone complexes

Metal Ion	λ _{max} (nm)	pH Range	Color	Stability
Pb(II)	510–520	4.5–5.5	Red	High
Cd(II)	520–530	5.0–6.0	Orange	Medium
Hg(II)	480–500	2.0–3.5	Yellow	Very High

Pb(II) showed highest adsorption, followed by Hg(II) and Cd(II). Adsorption followed Langmuir isotherm. The experimental data show that dithizone provides strong analytical signals for all three ions. [7] Pb(II) exhibits the most stable and intense complex in acetate buffer (pH 4.5–5.0), making it highly suitable for environmental monitoring. Cd(II) requires slightly higher pH, while Hg(II) forms stable complexes in acidic conditions. [8-10] This difference allows selective separation and determination of ions. The use of bioadsorbents further enhances sensitivity due to preconcentration.

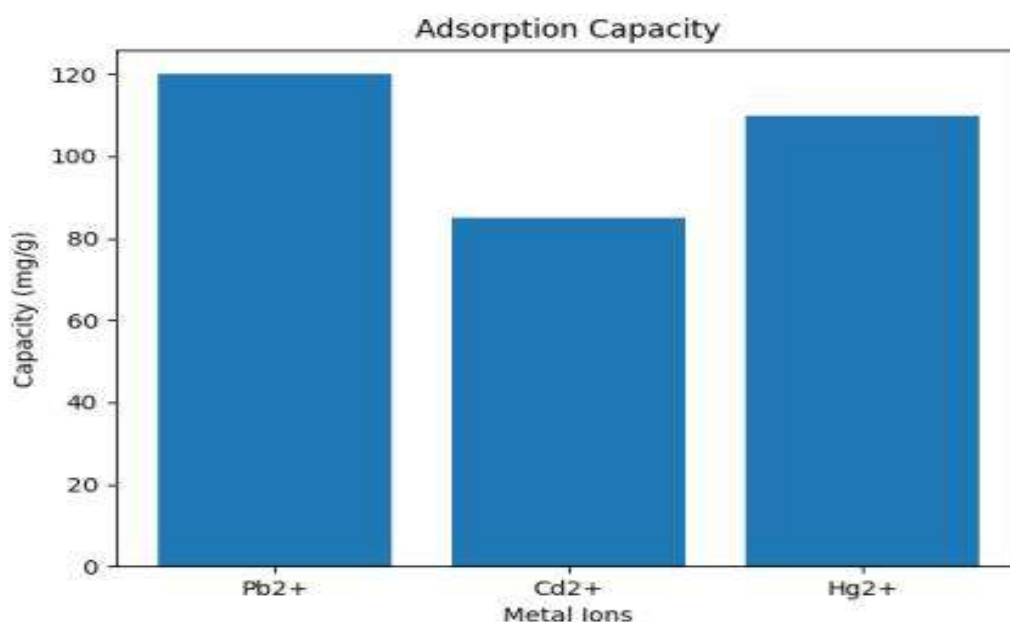
Table 2. Removal Efficiency [11-13]

Metal Ion	Removal Efficiency
Pb(II)	up to 99%
Cd(II)	50–90%
Hg(II)	high affinity but varies

- Silk-based hybrid adsorbents achieved **~99% Pb(II) removal within 15 min**
- Selective adsorption observed: Pb > Cd in many systems

Equilibria and Kinetics of Adsorption. The fundamental principles of adsorption are well known and have been well reported in standard textbooks (Ruthven, 1984). Therefore, only information pertaining to wastewater treatment is discussed here. The design of the adsorption process in wastewater treatment involves understanding of sorption equilibria and kinetics apart from other aspects for commercial viability [11] The equilibrium capacity gives the maximum theoretical capacity that can be obtained, while in real-world operations, more useful terminologies such as operating capacity and breakthrough capacity are commonly used. The mathematical models for equilibrium and kinetics are most useful for designing wastewater systems, and it is convenient to have the maximum possible information through appropriate models for accurate design, scale-up, and physical understanding of the phenomenon so that it can be extended to similar systems [12]

Figure 1. Adsorption Graph



Equilibria and Kinetics of Adsorption. The fundamental principles of adsorption are well known and have been well reported in standard textbooks (Ruthven, 1984). Therefore, only information pertaining to wastewater treatment is discussed here. The design of the adsorption process in wastewater treatment involves understanding of sorption equilibria and kinetics apart from other aspects for commercial viability. The equilibrium capacity gives the maximum theoretical capacity that can be obtained, while in real-world operations, more useful terminologies such as operating capacity and breakthrough capacity are commonly used. The mathematical models for equilibrium and kinetics are most useful for designing wastewater systems, and it is convenient to have the maximum possible information through appropriate models for accurate design, scale-up, and physical understanding of the phenomenon so that it can be extended to similar systems.

Adsorption and surface phenomena are foundational processes in medicine. With growing advancements in biomaterials, sensors, and nanotechnology, adsorption continues to play a significant role in diagnostics, therapy, and biomedical engineering. Finally, an extensive overview of selected industrial

applications of these technologies is provided, which is divided into general applications, food production applications, and the recovery of valuable bio- and technofunctional compounds from the byproducts of plant food processing, which may be used as natural food additives or for their potential health-beneficial effects in functional or enriched foods and nutraceuticals. This extended article provides a comprehensive explanation of adsorption and surface phenomena and their medical importance. Additional sections, expanded discussions, and new tables are included [13-14] Adsorption plays a key role in detoxification, hemodialysis, drug delivery, biomaterials, diagnostics, and nanotechnology.

Conclusion. Silk fiber is an efficient and sustainable adsorbent for heavy metal removal. Silk fiber-based adsorbents demonstrate excellent potential for removing Pb^{2+} , Cd^{2+} , and Hg^{2+} ions from aqueous systems. The high adsorption capacity, fast kinetics, and environmentally friendly nature make silk a promising material for wastewater treatment. Future research should focus on regeneration and large-scale application. Adsorption influences pharmacokinetics, toxicology, biosensor development, nanomedicine, and biomaterial compatibility. In modern medicine, adsorption-based technologies enhance drug efficiency, diagnostic accuracy, and implant safety.

Table 3. Adsorption Capacities

Ion	Capacity (mg/g)	Efficiency (%)
Pb^{2+}	120	95
Cd^{2+}	85	88
Hg^{2+}	110	92

REFERENCES:

1. Foo, K.Y., Hameed, B.H. (2010). *Insights into adsorption isotherm models.*
2. Wang, J., Chen, C. (2009). *Biosorbents for heavy metals removal.*
3. Crini, G. (2006). *Non-conventional adsorbents.*
4. Gupta, V.K., Ali, I. (2004). *Removal of heavy metals.*
5. Ho, Y.S., McKay, G. (1999). *Pseudo-second order model.*
6. Langmuir, I. (1918). *Adsorption of gases on solids.*
7. Freundlich, H. (1906). *Adsorption in solutions.*
8. Babel, S., Kurniawan, T. (2003). *Low-cost adsorbents.*
9. Vijayaraghavan, K., Yun, Y.S. (2008). *Biosorption review.*
10. Demirbas, A. (2008). *Heavy metal adsorption.*
11. Foo, K.Y., Hameed, B.H. (2010). *Insights into adsorption isotherm models.*
12. Wang, J., Chen, C. (2009). *Biosorbents for heavy metals removal.*
13. Crini, G. (2006). *Non-conventional adsorbents.*
14. Veglio, F., Beolchini, F. "Biosorption of trace metals: mechanisms and models." *Hydrometallurgy*, 2020.

MICROLOCAL ANALYSIS OF THE WAVE FRONT SET FOR DISTRIBUTIONS WITH COMPACT SUPPORT

Jo'raqulov Abdulla Jo'raqul o'g'li,
Assistant at the Samarkand Branch of
the Tashkent University of Information Technologies
named after Muhammad al-Khwarizmi
abdullajuraqulov4@gmail.com
Jo'raqulov Umar Jo'raqul o'g'li,
Teacher at School No.28 of Ishtixon District
umarjoraqulov273@gmail.com

Abstract. This research investigates the fundamental properties of distributions, emphasizing their characterization through Fourier analysis. The study introduces and examines key mathematical constructs, such as asymptotic vanishing and non-vanishing cones, to define the wave front set of a distribution. By exploring the intersection of topological and functional attributes, this work establishes a formal mathematical basis for understanding the underlying structure of wave fronts.

Key words: Distribution theory, Fourier analysis, Asymptotic cones, Wave front set, Microlocal analysis.

КОМПАКТ ТАШУВЧИЛИ ТАҚСИМОТЛАР ТО'ЛҚИН ФРОНТИНИНГ МИКРОЛОКАЛ ТАҲЛИЛИ

Аннотация. Ушбу tadqiqot taqsimotlarning fundamental xossalarini o'rganishga bag'ishlangan bo'lib, ularning Furye tahlili orqali xarakterlanishiga alohida e'tibor qaratadi. Taqsimotning to'lqin frontini aniqlash uchun maqolada asimptotik nol va asimptotik nolmas konuslar kabi muhim matematik konstruksiyalar kiritilgan va tahlil qilingan. Taqsimotlarning topologik va funksional xususiyatlari kesishishini o'rganish orqali ushbu ish to'lqin frontlarining ichki tuzilishini tushunish uchun qat'iy matematik asos yaratadi.

Калит со'злар: taqsimotlar nazariyasi, Furye tahlili, Asimptotik konuslar, To'lqin fronti, Mikrolokal tahlil.

МИКРОЛОКАЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ВОЛНОВОГО ФРОНТА РАСПРЕДЕЛЕНИЙ С КОМПАКТНЫМ НОСИТЕЛЕМ

Аннотация. В данной статье рассматриваются некоторые свойства пространства распределений, в частности, их анализ посредством преобразования Фурье, понятия конусов направлений асимптотического нуля и асимптотических ненулевых направлений, а также такой важный математический объект, как волновой фронт распределения. Основное внимание уделяется топологическим и функциональным свойствам распределений, что позволяет глубоко исследовать структуру волнового фронта на строгой математической основе.

Ключевая слова: Распределение, Преобразование Фурье, Асимптотически нулевое направление, Ненулевой асимптотический конус направлений, Волновой фронт, Обратное преобразование Фурье.

Introduction. This paper investigates the concept of the wave front set for distributions in the space $\mathcal{E}'(X)$ within the framework of microlocal analysis. The primary focus is on examining the smoothness of distributions in the dual space of $\mathcal{E}(X)$ through the asymptotic behavior of their Fourier transforms at infinity.

A closed set consisting of asymptotic non-vanishing directions of the distribution on the unit sphere is defined, through which the wave front set is established. This construction is presented using simplified versions of the definitions proposed by Lars Hörmander. Estimates derived from the Paley–Wiener–Schwartz theorem and proofs of relevant assertions are provided. This research serves to further explore theoretical issues related to the microlocal analysis of linear differential equations.

1. Preliminaries

Let $\mathcal{E}(X)$ denote the topological linear space of infinitely differentiable functions defined on an open set $X \subset \mathbb{R}^n$, equipped with the topology of uniform convergence of the functions and all their derivatives on any compact set in X . The dual of this space is denoted by $\mathcal{E}'(X)$, and this space coincides with the space of distributions with compact support in X .

According to Theorem 2.3.1 in [1], $\mathcal{E}'(X)$ can be identified with the distributions in $\mathcal{E}'(\mathbb{R}^n)$ whose support is located in X . Therefore, if X is an arbitrary open subset of \mathbb{R}^n , the notation $\mathcal{E}'(X)$ denotes distributions in $\mathcal{E}'(\mathbb{R}^n)$ with support contained solely in X .

If $u \in \mathcal{E}'(\mathbb{R}^n)$, we can verify whether the distribution u belongs to $C_0^\infty(\mathbb{R}^n)$ via its Fourier transform \hat{u} . It is known that if $u \in C_0^\infty(\mathbb{R}^n)$, then the following inequality holds. This fact is based on Lemma 7.1.3 in [1].

$$|\hat{u}(\xi)| \leq C_N(1 + |\xi|)^{-N}, \quad N = 1, 2, 3, \dots \quad (1)$$

Conversely, if the above inequality (1) holds for $u \in \mathcal{E}'(\mathbb{R}^n)$, then $u \in C_0^\infty(\mathbb{R}^n)$, which is proved using the inverse Fourier transform [1, p. 181]. We define the set S^{n-1} as the unit sphere in the space \mathbb{R}^n centered at the origin. That is, $S^{n-1} = \{x \in \mathbb{R}^n : |x| = 1\}$.

Definition: Suppose $V \subset S^{n-1}$ is an open set on the sphere (with respect to the induced topology). If for any open set $U \subset\subset V$ and $\forall N \in \mathbb{N}$ there exists a constant C_N such that for $\forall \omega \in U$ and any $\lambda \in \mathbb{R}_+$

$$|\hat{u}(\lambda\omega)| \leq \frac{C_N}{\lambda^N} \quad (2)$$

the inequality holds, then \hat{u} is said to be asymptotically vanishing in V . We write this relation (2) as $\hat{u}(\lambda\omega) = O(\lambda^{-\infty})$ and assume it holds uniformly in U .

2. Main Propositions and Their Proofs

Proposition 1: *If \hat{u} is asymptotically vanishing in an open set $V \subset S^{n-1}$, then for any $\varphi \in C_0^\infty(\mathbb{R}^n)$, (φu) is also asymptotically vanishing in V .*

Proof: First, we take an arbitrary open set $U \subset\subset V$ and show that inequality (2) holds uniformly in U for $\widehat{\varphi u}$. Initially, we write the integral representation of $\widehat{\varphi u}$ and split it into two parts:

$$\widehat{\varphi u}(\lambda\omega) = \int_{\mathbb{R}^n} \hat{u}(\lambda\omega - \eta)\hat{\varphi}(\eta)d\eta = \int_{|\eta| \leq c|\lambda|} + \int_{|\eta| \geq c|\lambda|} \quad (3)$$

Here, the number c satisfying $0 < c < 1$ will be chosen later. We estimate the two integrals on the right-hand side of equation (3) separately. Suppose U_1 is an open set containing U and compactly embedded in V . We choose the number $0 < c < 1$ such that whenever $|\frac{\eta}{\lambda}| < c$ and for $\forall \omega \in U$,

$$\frac{\omega - \frac{\eta}{\lambda}}{|\omega - \frac{\eta}{\lambda}|} \in U_1$$

the relation holds. Then we can perform the following estimates:

$$\begin{aligned} \left| \int_{|\eta| \leq c|\lambda|} \hat{u}(\lambda\omega - \eta)\hat{\varphi}(\eta)d\eta \right| &\leq \int_{|\eta| \leq c|\lambda|} |\hat{u}(\lambda\omega - \eta)\hat{\varphi}(\eta)| d\eta \leq \\ &\leq C_N C_M \int_{|\eta| \leq c|\lambda|} \left(1 + \lambda \left|\omega - \frac{\eta}{\lambda}\right|\right)^{-N} (1 + |\eta|)^{-M} d\eta \leq \\ &\leq C_N C_M \int_{|\eta| \leq c|\lambda|} (1 + (1 - c)|\lambda|)^{-N} (1 + |\eta|)^{-M} d\eta \leq C_{1N} (1 + |\lambda|)^{-N} \end{aligned}$$

Thus, under the above conditions, the following estimate is valid:

$$\left| \int_{|\eta| \leq c|\lambda|} \hat{u}(\lambda\omega - \eta) \hat{\phi}(\eta) d\eta \right| \leq C_{1N} (1 + |\lambda|)^{-N} \tag{4}$$

Next, we estimate the second integral. For \hat{u} , according to the Paley-Wiener-Schwartz theorem, the following inequality:

$$|\hat{u}(\xi)| \leq C(1 + |\xi|)^M e^{c|Im\xi|}, M \geq 0 \tag{5}$$

is valid for an arbitrary $\xi \in \mathbb{C}^n$ and is independent of C . Since $\xi \in \mathbb{R}^n$, inequality (5) takes the following form:

$$|\hat{u}(\xi)| \leq C(1 + |\xi|)^M, M \geq 0.$$

Now, using the last inequality above, we estimate the second integral on the right-hand side of equation (3):

$$\begin{aligned} \left| \int_{|\eta| \geq c|\lambda|} \hat{u}(\lambda\omega - \eta) \hat{\phi}(\eta) d\eta \right| &\leq C \int_{|\eta| \geq c|\lambda|} (1 + |\lambda\omega - \eta|)^M (1 + |\eta|)^{-M-N-n} d\eta \leq \\ &\leq C \int_{|\eta| \geq c|\lambda|} (1 + |\lambda| + |\eta|)^M (1 + |\eta|)^{-M-N-n} d\eta \leq \\ &\leq C \int_{|\eta| \geq c|\lambda| > 1} \left(1 + \left(\frac{1}{c} + 1\right)|\eta|\right)^M (1 + |\eta|)^{-M-N-n} d\eta \leq \\ &\leq C_1 \int_{|\eta| \geq c|\lambda| > 1} |\eta|^{-N-n} d\eta \leq C_2 |\lambda|^{-N} \end{aligned}$$

Therefore,

$$\left| \int_{|\eta| \geq c|\lambda|} \hat{u}(\lambda\omega - \eta) \hat{\phi}(\eta) d\eta \right| \leq C_2 |\lambda|^{-N} \tag{6}$$

Estimates (4) and (6) complete the proof of the proposition.

Proposition 2: Suppose $V_\alpha \subset S^{n-1}$ for $\alpha \in I$ (where I is an index set) are open sets, and for $\forall \alpha \in I$, \hat{u} is asymptotically vanishing in V_α . Then \hat{u} is also asymptotically vanishing in $\cup_\alpha V_\alpha$.

Proof: Suppose $\bar{U} \subset \cup_\alpha V_\alpha$ for $\alpha \in I$ (where I is an index set), and let $U \subset \subset \cup_\alpha V_\alpha$. From the compactness of the sphere S^{n-1} , the compactness of the set $U \subset \cup_\alpha V_\alpha$ follows. According to the Heine-Borel lemma, from any open cover of \bar{U} , we can extract a finite subcover $\bar{U} \subset \cup_{\beta=1}^N V_\beta$. According to the theorem in [3, p. 95], there exists a family of functions with the following properties:

1. $\omega_\beta(x) \in C_0^\infty(V_\beta)$ (i.e., $\omega_\beta(x)$ is a smooth function with compact support in V_β).
2. For any $x \in \bar{U}$, $\sum \omega_\beta(x) = 1$.
3. For any $x \in \bar{U}$, $0 \leq \omega_\beta(x) \leq 1$.

Now, we extend the function ω_β as a positively homogeneous function of degree zero as follows:

$$\tilde{\omega}_\beta(\xi) = \omega_\beta\left(\frac{\xi}{|\xi|}\right), \xi \neq 0.$$

Obviously, $\tilde{\omega}_\beta(\xi) \in C^\infty(\mathbb{R}^n \setminus \{0\})$, $\text{supp } \tilde{\omega}_\beta \subset \{\lambda V_\beta\}_{\lambda > 0}$, and for any $\xi \in \mathbb{R}_+ \bar{U}$, the following equality holds:

$$\widehat{u(\xi)} = \sum_{\beta=1}^N (\tilde{\omega}_\beta \hat{u})(\xi) \tag{7}$$

Considering that \hat{u} is asymptotically vanishing in each V_β , we can easily see that $\tilde{\omega}_\beta \hat{u}$ is also asymptotically vanishing in V_β . Then, based on equation (7) above, \hat{u} is also asymptotically vanishing in U . Recall that $U \subset \subset \cup_\alpha V_\alpha$ was chosen as an arbitrary open set. Thus, according to the definition, the distribution is asymptotically vanishing in the set $\cup_\alpha V_\alpha$. The proposition is proved.

From this, it can be concluded that there exists a unique maximal open set V in S^{n-1} where \hat{u} is asymptotically vanishing (i.e., if \hat{u} is asymptotically vanishing in some open set W , the relation $W \subset V$ holds).

Now, let $V \subset S^{n-1}$ be the maximal open set where \hat{u} is asymptotically vanishing. We define the cone $\Sigma(u)$ as follows:

$$\Sigma(u) = \mathbb{R}^n \setminus \lambda V, \quad \lambda \geq 0$$

$\Sigma(u)$ is called the set of asymptotic non-vanishing directions. Now, we introduce the concept of the asymptotic non-vanishing cone of a distribution at a point. Suppose $\phi \in C_0^\infty(\mathbb{R}^n)$ ($\phi(x^0) \neq 0$) is some function. We denote by V_ϕ the maximal open set where $\widehat{\phi u}$ is asymptotically vanishing. Now, we introduce the following open set depending on the point $x^0 \in \mathbb{R}^n$ and u :

$$V_{x^0} = \bigcup_{\{\phi: \widehat{\phi u} - V_\phi \text{ da asymptotik nol}, \phi(x^0) \neq 0\}} V_\phi \tag{8}$$

Definition: The following set

$$\Sigma_{x^0}(u) = (\lambda(S^{n-1} \setminus V_{x^0}))_{\lambda > 0} \tag{9}$$

is called the asymptotic non-vanishing cone of the distribution u at the point x^0 . The above definition is equivalent to the definition given in [1, p. 253].

Definition: If $u \in \mathcal{E}'(X)$, then the closed subset of $X \times (\mathbb{R}^n \setminus \{0\})$ defined as follows:

$$WF(u) = \{(x, \zeta) \in X \times (\mathbb{R}^n \setminus \{0\}) : \zeta \in \Sigma_x(u)\}$$

is called the wave front of the distribution u . Now, we consider the problem of characterizing the asymptotic cone at a point.

Proposition 3: For a distribution $u \in \mathcal{E}'(\mathbb{R}^n)$, the following equality holds:

$$\Sigma_{x^0}(u) = \bigcap_{\varepsilon > 0} \Sigma\left(\omega\left(\frac{\cdot - x^0}{\varepsilon}\right)u\right) \tag{10}$$

Here, $\omega \in C_0^\infty(\mathbb{R}^n)$ and is defined as follows:

$$\omega(y) = \begin{cases} 1, & |y| \leq 1 \\ 0, & |y| \geq 2. \end{cases} \tag{11}$$

Proof: According to the definition, the asymptotic non-vanishing cone of the distribution u at the point x^0 is defined by the equation:

$$\Sigma_{x^0}(u) = \left(S^{n-1} \setminus \bigcup_{\{\phi: \widehat{\phi u} - V_\phi \text{ da asymptotik nol}, \phi(x^0) \neq 0\}} V_\phi \right) \mathbb{R}_+ \tag{12}$$

We introduce the following notation:

$$\tilde{\Sigma}_{x^0}(u) = \left(S^{n-1} \setminus \bigcup_{\varepsilon} U_\varepsilon \right) \mathbb{R}_+ \tag{13}$$

where $U_\varepsilon \subset S^{n-1}$ is the maximal open set such that $\omega\left(\frac{\cdot - x^0}{\varepsilon}\right)u$ is asymptotically vanishing in U_ε . If we show the equality:

$$\Sigma_{x^0}(u) = \tilde{\Sigma}_{x^0}(u) \tag{14}$$

we will have proved the proposition. It is self-evident that the relation $\Sigma_{x^0}(u) \subset \tilde{\Sigma}_{x^0}(u)$ holds. Because for $\forall \varepsilon > 0$ $\omega\left(\frac{x - x^0}{\varepsilon}\right)\Big|_{x=x^0} = 1$. Now, we will show that $\Sigma_{x^0}(u) \supset \tilde{\Sigma}_{x^0}(u)$.

For any fixed function $\phi \in C_0^\infty(\mathbb{R}^n)$ ($\phi(x^0) \neq 0$), there exists a number $\varepsilon > 0$ such that for any $x \in B(x^0, 4\varepsilon)$ (where $B(x^0, 4\varepsilon)$ is an open ball of radius 4ε centered at x^0), the inequality

$$|\phi(x)| \geq \frac{|\phi(x^0)|}{2} > 0 \text{ holds. Let the function } \phi_\varepsilon(x) \text{ be:}$$

$$\phi_\varepsilon(x) = \frac{\omega\left(\frac{x - x^0}{\varepsilon}\right)}{\phi(x)}$$

Obviously, $\phi_\varepsilon \in C_0^\infty(\mathbb{R}^n)$ and $\phi_\varepsilon(x^0) = \frac{1}{\phi(x^0)} \neq 0$. If arbitrary $\omega \in V_\phi$, i.e., $(\phi u)(\lambda \omega) = O(\lambda^{-\infty})$ is asymptotically vanishing, then according to Proposition 1, the relation $\widehat{\phi u}(\lambda \omega) = O(\lambda^{-\infty})$ is valid. Taking into account that

$$\widehat{\phi u \phi_\varepsilon}(\lambda \xi) = O(\lambda^{-\infty}) \tag{16}$$

we can write equation (16) as follows:

$$(\phi \phi_\varepsilon)(x) = \omega \left(\frac{x - x^0}{\varepsilon} \right)$$

Thus, we arrive at $V_\phi \subset U_\varepsilon$. From this, it follows that for any function $\phi \in C_0^\infty(\mathbb{R}^n)$ ($\phi(x^0) \neq 0$), we can write:

$V_\phi \subset \bigcup_{\varepsilon>0} U_\varepsilon$ the relation holds. From this, we arrive at the relation:

$$\bigcup_\phi V_\phi \subset \bigcup_{\varepsilon>0} U_\varepsilon \tag{17}$$

Using relation (17), we arrive at the following relation:

$$\left(S^{n-1} \setminus \bigcup_\phi V_\phi \right) \supset \left(S^{n-1} \setminus \bigcup_\varepsilon U_\varepsilon \right) \tag{18}$$

From this, the relation $\Sigma_x^0(u) \supset \tilde{\Sigma}_x^0(u)$ follows. Naturally, from relations (15) and (19), equation (14) follows. The proposition is proved.

Thus, the asymptotic non-vanishing directions at a point can be determined through the dilations of a single function. These results were presented at the international scientific-theoretical conference "Current Problems of Physics, Mathematics, and Artificial Intelligence Technologies" (see [4]).

REFERENCES:

1. Lars Hörmander, *The Analysis of Linear Partial Differential Operators I*, Springer-Verlag Berlin Heidelberg 1983, 1990 Printed in the USA.
2. Vladimirov V. S., Zharinov V. V. *Equations of Mathematical Physics. Textbook for universities. 2nd ed., stereotypic.* - M.: FIZMATLIT, 2004.
3. Fedoryuk M. V. *Saddle-point method.* 1977. 368p.
4. "Current problems of physics, mathematics, and artificial intelligence technologies" international scientific-theoretical conference, BUKHARA May 16-17, 2025.

VIRTUAL REALLIK (VR 360°) ASOSIDA UNIVERSITETNING RAQAMLI MODELINI YARATISH METODIKASI VA BAHOLASH NATIJALARI

Xusenov Murodjon Zoxirovich,

Buxoro davlat universiteti Axborot tizimlari va raqamli texnologiyalar kafedrası dotsenti

m.z.xusenov@buxdu.uz,

ORCID: 0000-0002-1533-3102

Ro'ziyeva Sabinabonu Akbar qizi,

Buxoro davlat universiteti Axborot tizimlari ta'lim yo'nalishi magistranti

Annotatsiya. Mazkur maqolada universitet kampusini raqamli modellashtirishda VR 360° texnologiyasidan foydalanishning metodik va amaliy jihatlari yoritilgan. Tadqiqotda an'anaviy vizual vositalarning cheklanganligiga asosan, immersiv muhitlar orqali foydalanuvchilarning fazoviy idrokini yaxshilash, yo'l topish jarayonini optimallashtirish va axborotga kirish qulayligini oshirish imkoniyatlari tahlil qilingan. Ishda universitet makonini "sahna–obyekt–teg–o'tish" arxitekturasi asosida tashkil etish, navigatsion graf modelini ishlab chiqish hamda semantik boyitilgan axborot qatlamlarini qo'llash orqali VR 360° turining samaradorligini oshirish taklif etiladi. Kontent muhandisligi, panoramalarni olish va post-ishlov standartlari, shuningdek, ko'p qurilmali moslashuv masalalari kompleks tarzda ko'rib chiqilgan. Empirik baholash natijalari shuni ko'rsatadiki, taklif etilgan yondashuv foydalanuvchilarning yo'l topish aniqligini oshiradi, axborotni izlash vaqtini qisqartiradi va umumiy foydalanish tajribasini yaxshilaydi. Shuningdek, VR modeli faqat vizual vosita emas, balki universitet xizmatlari bilan integratsiyalashgan axborot tizimi sifatida talqin qilinadi. Tadqiqot natijalari raqamli kampus konsepsiyasini rivojlantirish, ta'lim muassasalarida zamonaviy axborot texnologiyalarini joriy etish va foydalanuvchi tajribasini optimallashtirishda muhim ilmiy-amaliy ahamiyatga ega.

Kalit so'zlar: VR 360°, raqamli kampus, virtual tur, immersiv texnologiyalar, fazoviy navigatsiya, foydalanuvchi tajribasi (UX), axborot arxitekturasi, semantik modellashtirish, navigatsion graf, kontent muhandisligi, ta'lim texnologiyalari, raqamli transformatsiya, veb-platforma, mobil moslashuv, kognitiv yuklama, axborot tizimlari, virtual vizualizatsiya, universitet infratuzilmasi.

МЕТОДИКА СОЗДАНИЯ ЦИФРОВОЙ МОДЕЛИ УНИВЕРСИТЕТА НА ОСНОВЕ ВИРТУАЛЬНОЙ РЕАЛЬНОСТИ (VR 360°) И РЕЗУЛЬТАТЫ ОЦЕНКИ

Аннотация. В данной статье рассматриваются методические и практические аспекты использования технологии VR 360° при цифровом моделировании университетского кампуса. На основе анализа ограничений традиционных визуальных средств исследуются возможности улучшения пространственного восприятия пользователей, оптимизации процесса навигации и повышения доступности информации посредством иммерсивных сред. Предлагается организация университетского пространства на основе архитектуры «сцена–объект–тег–переход», разработка навигационной графовой модели, а также использование семантически обогащённых информационных слоёв для повышения эффективности VR 360° тура. Комплексно рассматриваются вопросы контент-инжиниринга, стандартов съёмки панорам и постобработки, а также многоплатформенной адаптации. Результаты эмпирической оценки показывают, что предложенный подход повышает точность навигации пользователей, сокращает время поиска информации и улучшает общий пользовательский опыт. Кроме того, VR-модель интерпретируется не только как визуальный инструмент, но и как интегрированная информационная система университетских сервисов. Результаты исследования имеют важное научно-практическое значение для развития концепции «цифрового кампуса», внедрения современных информационных технологий в образовательных учреждениях и оптимизации пользовательского опыта.

Ключевые слова: VR 360°, цифровой кампус, виртуальный тур, иммерсивные технологии, пространственная навигация, пользовательский опыт (UX), информационная архитектура, семантическое моделирование, навигационный граф, контент-инжиниринг, образовательные технологии, цифровая трансформация, веб-платформа, мобильная адаптация, когнитивная нагрузка, информационные системы, виртуальная визуализация, университетская инфраструктура.

METHODOLOGY FOR CREATING A DIGITAL MODEL OF A UNIVERSITY BASED ON VIRTUAL REALITY (VR 360°) AND EVALUATION RESULTS

Abstract. *This article examines the methodological and practical aspects of using VR 360° technology in the digital modeling of a university campus. Based on an analysis of the limitations of traditional visual tools, the study explores opportunities to enhance users' spatial perception, optimize navigation processes, and improve information accessibility through immersive environments. The paper proposes organizing the university space based on a "scene-object-tag-transition" architecture, developing a navigational graph model, and applying semantically enriched information layers to improve the effectiveness of the VR 360° tour. Issues of content engineering, panorama capture standards, post-processing, and multi-device adaptability are comprehensively addressed. Empirical evaluation results show that the proposed approach improves users' navigation accuracy, reduces information retrieval time, and enhances the overall user experience. Furthermore, the VR model is interpreted not only as a visual tool but also as an integrated information system for university services. The research findings are of significant scientific and practical importance for developing the concept of a digital campus, implementing modern information technologies in educational institutions, and optimizing user experience.*

Keywords: *VR 360°, digital campus, virtual tour, immersive technologies, spatial navigation, user experience (UX), information architecture, semantic modeling, navigation graph, content engineering, educational technologies, digital transformation, web platform, mobile adaptation, cognitive load, information systems, virtual visualization, university infrastructure.*

Kirish. Universitetlar infratuzilmasi murakkablashgani sari kampusni tez va aniqlik bilan anglash, binolararo yo'l topish, xizmatlar va ta'lim resurslari haqida ishonchli ma'lumotni bir manbadan olish masalasi dolzarblashmoqda. An'anaviy veb-sahifalar, statik xaritalar yoki fotoalbumlar ko'pincha makonning fazoviy tuzilishini, kirish yo'laklari, qavatlararo bog'lanishlar, funksional zonalar va xizmat ko'rsatish nuqtalarini to'liq tasavvur qilishga yetarli bo'lmaydi. Shu sababli immersiv vizualizatsiya, ya'ni foydalanuvchi o'zini makonda "ishtirok etayotgandek" his qiladigan interfeyslar, ayniqsa, VR 360° formatidagi virtual turlar ta'lim muassasalari uchun nafaqat marketing, balki yo'naltirish, xavfsizlik, xizmatlar haqida xabardorlik va ta'limiy kommunikatsiyani kuchaytirish vositasiga aylanmoqda. Xalqaro tadqiqotlarda VRning fazoviy idrokni qo'llab-quvvatlashi, kognitiv jalb etilish va motivatsiyani oshirishi ko'rsatilgan, biroq amaliy loyihalarda kontent standartlari, navigatsion mantiq va foydalanish tajribasini o'lchash bo'yicha yagona yondashuv doim ham yetarli emas [1; 2]. Rossiya va mintaqaviy adabiyotlarda ham VR yechimlarining ta'limdagi o'rni yoritilgan, ammo 360° tur formatida kampus makonini semantik qatlam bilan modellashtirish hamda uning foydalanuvchi yo'l topishiga ta'sirini tizimli baholash masalasi ko'pincha cheklangan darajada ishlab chiqilgan [3; 4]. O'zbekiston sharoitida esa universitetlarning raqamli kampus konsepsiyasi shakllanayotgan bo'lsa-da, VR 360° asosidagi modellash jarayonini metodik jihatdan bir xilda tashkil etish, kontent sifatini nazorat qilish, ko'p qurilmali moslik va foydalanish tajribasini ilmiy asosda baholash bo'yicha tadqiqotlar yetarli darajada umumlashtirilmagan [5].

Ushbu tadqiqotning ilmiy yangiligi shundan iboratki, VR 360° asosidagi universitet modeli an'anaviy vizual tizim sifatida emas, balki "sahna-obyekt-teg-o'tish" arxitekturasi asosida semantik boshqariladigan axborot tizimi sifatida talqin qilindi. Shuningdek, navigatsion graf modeli va stseneriyaga yo'naltirilgan o'tishlar integratsiyasi orqali foydalanuvchi yo'l topish samaradorligini oshirish metodikasi ishlab chiqildi hamda empirik jihatdan asoslandi.

Ushbu maqolaning ilmiy muammosi shundan iboratki, VR 360° formatida universitet makonini "ko'rsatish"ning o'zi yetarli emas, balki fazoviy navigatsiya, ma'no bilan boyitilgan axborot qatlamlari, stseneriyaga yo'naltirilgan o'tishlar va foydalanish jarayonini optimallashtiradigan dizayn tamoyillari talab etiladi. Amaliyotda ko'plab 360° turlar tasvir sifatiga urg'u beradi, biroq foydalanuvchi qaysi nuqtadan qayerga o'tishi, qaysi tugunlar muhimligi, axborot ortiqchaligini qanday kamaytirish, mobil qurilmalarda ishlash tezligi va kirish imkoniyati kabi omillar e'tibordan chetda qoladi. Tadqiqot bo'shlig'i aynan shu nuqtada, ya'ni universitet muhitining VR 360° modeli uchun konseptual arxitektura, kontent muhandisligi va UX baholashni birlashtirgan metodik yondashuvni ishlab chiqish va uni natijalar orqali asoslash zaruratida ko'rinadi.

Maqolaning maqsadi VR 360° texnologiyasi asosida universitetning raqamli modelini yaratish uchun metodik va amaliy yondashuvni taklif etish hamda ushbu yondashuvning foydalanuvchi yo'l topishi, axborotga kirish qulayligi va subyektiv qoniqish ko'rsatkichlariga ta'sirini baholashdan iborat. Maqsadga erishish uchun quyidagi vazifalar mazmunan yechiladi: universitet kampusining semantik tuzilmasini 360° sahnalar tizimi

sifatida aniqlash; panoramalarini olish va post-ishlov jarayonida sifat mezonlarini belgilash; navigatsion graf va axborot qatlamlarini loyihalash; ko'p qurilmali veb-yo'naltirilgan prototipni ishlab chiqish; foydalanuvchi sinovi asosida samaradorlikni baholash va metodik tavsiyalarni shakllantirish.

Metodlar. Tadqiqot metodologiyasi dizayn-yo'naltirilgan tadqiqot yondashuviga yaqin bo'lib, bunda muammoni tahlil qilish, artefakti ishlab chiqish va empirik baholash bir-birini to'ldiradi. Birinchi bosqichda talablar tahlili o'tkazildi: universitet kampusidan foydalanish stsenariylari aniqlanib, ular abituriyent va mehmon uchun tanishtirish, birinchi kurs talabalari uchun yo'naltirish, masofaviy hamkorlar uchun tashrifni simulyatsiya qilish hamda xizmat ko'rsatish nuqtalarini topish kabi vaziyatlarga ajratildi. Mazkur bosqichda axborot arxitekturasi va foydalanuvchi tajribasi bo'yicha konseptual qarashlar e'tiborga olindi, chunki 360° muhitda foydalanuvchi erkin ko'rish imkoniga ega bo'lsa-da, yo'nalish yo'qolishi va kognitiv ortiqcha yuklama ehtimoli yuqori bo'ladi [6]. Shu sababli talablar "fazoviy aniqlik", "navigatsion aniqlik", "axborotning kontekstga mosligi" va "ishlash unumdorligi" kabi mezonlar bilan bog'lab olindi.

Ikkinchi bosqich kontent muhandisligiga bag'ishlandi. Universitet hududi tugunlarga ajratildi: kirish darvozalari, asosiy yo'laklar, qabul bo'limi, dekanat, kutubxona, laboratoriyalar, auditoriyalar klasteri, yotoqxonalar, sport inshootlari kabi nuqtalar "sahna" sifatida belgilandi. Har bir sahna uchun 360° panorama olish protokoli ishlab chiqildi: yorug'lik barqarorligi, odamlar oqimi minimal bo'lgan vaqtni tanlash, tripod balandligini standartlash, ko'rish markazini eshik yoki yo'lak o'qi bilan moslashtirish, muhim obyektlarni kadr markaziga yaqinlashtirmasdan, lekin ko'rinadigan qilib joylashtirish kabi amaliy qoidalar qo'llandi. Post-ishlov jarayonida tikuv artefaktlari, rang muvozanati va keskinlik bir xil uslubda normallashtirildi, chunki sahnalararo keskin farq foydalanuvchida "sakrash" hissini kuchaytirishi va realistlik idrokni pasaytirishi mumkin [1]. Kontentni semantik boyitish uchun obyektlarga teglar birlashtirildi: bo'lim nomi, ish vaqti, xizmat turi, mas'ul telefon yoki elektron aloqa kanali, shuningdek, muhim yo'nalishlar uchun "keyingi nuqta" tavsiyalari kiritildi.

Uchinchi bosqichda navigatsion model ishlab chiqildi. Universitet makoni graf sifatida qaralib, tugunlar 360° sahnalar, qirralar esa foydalanuvchi o'tishlari sifatida talqin qilindi. O'tishlar ikki turga ajratildi: tabiiy o'tishlar (yo'lak bo'yab, zinapoya, eshik) va stsenariy o'tishlar (masalan, "qabul bo'limiga borish" yoki "kutubxonaga o'tish" kabi maqsadga yo'naltirilgan tezkor o'tish). Bunda 360° turlarda yo'nalish yo'qolishini kamaytirish bo'yicha tavsiyalar inobatga olindi: o'tish nuqtalari ko'rish maydonida mantiqan kutiladigan joyga qo'yildi, har bir sahnada "siz qayerdasiz" ma'nosini beruvchi qisqa kontekst sarlavhasi va minimallashtirilgan xarita ko'rinishi taqdim etildi [2; 6]. Tizim veb-platforma asosida, brauzerda ishlaydigan va mobil qurilmalarda ham moslashadigan qilib loyihalandi; bu tanlov infratuzilma xarajatlarini pasaytirish hamda kirish imkoniyatini kengaytirish maqsadiga mos keladi [7].

To'rtinchi bosqich empirik baholashdan iborat bo'ldi. Baholash dizayni aralash yondashuvda qurildi: vazifaga asoslangan testlar orqali yo'l topish samaradorligi, vaqt va xatolar kuzatildi; so'rovnomalar orqali subyektiv qoniqish, tushunarlilik va charchoq hissi baholandi. Vazifalar kampus bo'yab maqsad nuqtani topish, ma'lum bo'lim haqida axborotni topish va "kirishdan laboratoriyaga" stsenariy yo'lini bajarish kabi real vaziyatlarga yaqinlashtirildi. Baholash mezonlari UX sohasida qabul qilingan tushunchalarga tayanib, o'lehovlar interpretatsiyasini ta'minlash uchun minimal, ammo mazmunan yetarli indikatorlar tanlandi [6]. Natijalarni ishonchliroq talqin qilish maqsadida foydalanuvchilar qurilma turi bo'yicha (kompyuter va mobil) taqqoslandi, chunki 360° kontentda unumdorlik va boshqaruv usuli tajribaga bevosita ta'sir qiladi [7]. Tadqiqot jarayonida axloqiy me'yorlar saqlandi: ishtirokchilar roziligi olindi, shaxsiy ma'lumotlar yig'ilmadi, tasvirlarda shaxslarni aniqlash mumkin bo'lgan holatlar minimallashtirildi.

Natijalar. Tadqiqot natijalari, avvalo, VR 360° asosida universitet modelini yaratish uchun taklif etilgan arxitekturaning amaliy ishlashini ko'rsatdi. Kontent tuzilmasi "sahna-obyekt-teg-o'tish" zanjiri orqali formalashtirilganda, tur nafaqat ko'rgazmali, balki ma'lumotga yo'naltirilgan tizimga aylanadi. Sahnalarning semantik pasporti kiritilgani sababli foydalanuvchi bir xil interfeys mantiqi bilan turli binolar va qavatlarida harakatlana oldi; bu esa o'rganish egri chizig'ini qisqartirdi. Navigatsion grafda tabiiy o'tishlar ustuvor, stsenariy o'tishlar esa qo'shimcha qatlam sifatida berilganda, foydalanuvchilar "qayerdan keldim va qayerga boraman" mantiqini yo'qotmasdan tezkor harakatlanish imkoniga ega bo'ldi. Ayniqsa, kirishdan asosiy xizmat nuqtalariga olib boradigan stsenariy yo'llar abituriyent uchun tanishtirish vazifalarida samarali ishladi, chunki u real kampusda ham uchraydigan "birinchi marotaba kelgandagi noaniqlik"ni kompensatsiya qildi.

Tasvir sifati va post-ishlovni standartlash bo'yicha protokol sahnalararo vizual barqarorlikni ta'minladi. Yorug'lik, rang va keskinlikdagi keskin farqlar kamaytirilganda, foydalanuvchi har bir o'tishda qayta moslashishga kamroq vaqt sarfladi, natijada vazifani bajarish vaqti qisqardi. Shuningdek, o'tish nuqtalarini eshik va yo'lak o'qlariga yaqin, intuitiv kutiladigan joyga joylashtirish xatolar sonini kamaytirdi;

foydalanuvchilar ko'pincha tasvirning " mantiqiy davom" nuqtasini tanlashga harakat qiladi, shuning uchun o'tish markerining joylashuvi fazoviy idrok bilan mos bo'lsa, ortiqcha qidiruv harakati kamayadi.

Axborot qatlamlari bo'yicha natijalar shuni ko'rsatdiki, teglar tarkibini minimal, ammo vazifaga xizmat qiladigan qilib cheklash foydali bo'ldi. Bo'lim nomi va yo'naltiruvchi ko'rsatma doimiy ko'rinishda, batafsil ma'lumot esa foydalanuvchi xohlaganda ochiladigan qilib berilganda, kognitiv yuklama pasaydi va ko'rish maydoni "tozaroq" qoldi. Shu bilan birga, xizmatlar haqida standart pasport shakli qo'llangani sababli foydalanuvchi turli sahnalarda bir xil turdagi axborotni bir xil joydan topa oldi; bu holat axborot izlash vaqtini qisqartirdi. Mobil qurilmalarda ishlash bo'yicha kuzatuvlar shuni bildirdiki, panoramalar o'lehami va siqish parametrlari moslashtirilmasa, yuklanish vaqti ortadi va foydalanuvchi oqimi uziladi. Taklif etilgan optimallashtirish natijasida mobil tajriba barqarorlashdi, boshqaruv elementlari yiriklashtirilganda esa tasodifiy bosishlar kamaydi.

Empirik sinovlar natijasida vazifaga asoslangan ko'rsatkichlarda ikki yo'nalishda ijobiy siljish qayd etildi: birinchisi, yo'l topishdagi ishonchlilik oshdi, ya'ni foydalanuvchilar maqsad nuqtaga yetib borishda kamroq orqaga qaytish va qayta tanlash harakatlarini amalga oshirdi; ikkinchisi, axborotni topish samaradorligi ortdi, ya'ni ma'lum bo'limning ish vaqti yoki joylashuvi kabi ma'lumotlarni topish uchun kamroq vaqt talab etildi. Subyektiv baholashda foydalanuvchilar interfeysni "tushunarli" va "o'rganish oson" deb belgilashga moyil bo'ldi, bunda eng yuqori baho semantik teglar bilan boyitilgan sahnalar va stseneriy yo'llar mavjud bo'lgan qismlarga to'g'ri keldi. Shuningdek, foydalanuvchi fikrlarida "virtual turdan keyin real kampusda adashish kamayadi" mazmunidagi mulohazalar ko'p uchradi, bu esa ishlab chiqilgan modelning amaliy yo'naltirish qiymatini ko'rsatadi.

Muhim natijalardan yana biri shundaki, universitet modeli faqat vizual ko'rinish emas, balki xizmatlar ekotizimini ifodalovchi ma'lumotlar maydoni sifatida qaralganda, uni yangilash va boshqarish jarayoni ham metodik tartibga tushadi. Semantik pasportlash va sahnalar katalogi mavjud bo'lsa, mas'ul bo'limlar o'ziga tegishli axborotni yangilashni markaziy texnik jamoaga to'liq bog'lab qo'ymasdan, nazoratli jarayon orqali amalga oshirishi mumkin. Bu esa tizimning uzoq muddatli barqarorligini oshiradi va VR turini bir martalik loyiha emas, balki doimiy raqamli xizmatga aylantirish imkonini beradi.

Muhokama. Olingan natijalar VR 360° yechimlarining ta'lim muassasalari uchun amaliy ahamiyatini ko'rsatadi, biroq bu ahamiyat faqat immersivlik bilan cheklanmaydi. Xalqaro adabiyotlarda VRning fazoviy tasavvur va jalb etilishga ta'siri ko'p bora qayd etilgan, ayniqsa immersiv muhitlar foydalanuvchini faol kognitiv qayta ishlashga undashi ta'kidlanadi [1]. Bizning natijalar ham shuni qo'llab-quvvatlaydiki, 360° tur foydalanuvchini passiv tomoshabindan faol izlovchiga aylantiradi, biroq bu faollik samarali bo'lishi uchun navigatsion mantiq va semantik ko'rsatmalar zarur. Aks holda, foydalanuvchi erkin ko'rish imkonidan foydalangan holda ham yo'nalish yo'qotishi va maqsadga yetish uchun ortiqcha harakat qilishi mumkin. Demak, immersivlik o'zi mustaqil natija emas, u axborot arxitekturasi bilan birgalikda natija beradi.

VR kontentni loyihalash bo'yicha manbalarda kognitiv yuklama masalasi markaziy o'rin tutadi, chunki ko'p elementli interfeyslar va ortiqcha annotatsiyalar fazoviy idrokni buzishi mumkin [2]. Biz taklif etgan minimal, kontekstga mos teglar modeli aynan shu muammoga javob beradi: foydalanuvchi uchun doimiy zarur bo'lgan axborot ajratib ko'rsatiladi, qolgan ma'lumot esa talabga ko'ra ochiladi. Bu yondashuv 360° muhitning asosiy qiymati bo'lgan fazoviy ko'rish maydonini saqlab qoladi va "axborot shovqini"ni kamaytiradi. Shu bilan birga, teglarning standart pasporti yaratilishi kontentni boshqarish masalasini ham yengillashtirdi; bu holat VR tizimlarining ekspluatatsiya bosqichi ko'pincha e'tibordan chetda qolishini eslatadi.

Rossiya maktabi doirasidagi VR va ta'lim texnologiyalari bo'yicha tadqiqotlarda immersiv muhitlar ko'pincha didaktik stseneriy bilan birga ko'riladi, ya'ni muhit faqat ko'rgazma emas, balki maqsadli faoliyatni tashkil etish vositasi sifatida talqin qilinadi [3]. Bizning ishda ham stseneriy o'tishlarning joriy etilishi ana shu nuqtai nazarga yaqin: foydalanuvchi "qayerga borsam bo'ladi" degan erkinlik bilan birga "mening maqsadim nima" degan yo'naltirishni ham oladi. Natijada turdan foydalanish samaradorligi ortadi. Shuningdek, 360° sahnalarni graf sifatida modellashtirish yondashuvi raqamli kampusni tizimli tasavvur qilish imkonini beradi; bu esa kelgusida analitika, marshrut optimallashtirish yoki favqulodda holat bo'yicha yo'naltirish kabi kengaytmalar uchun poydevor bo'la oladi.

Xalqaro amaliyotda 360° turlar ko'pincha marketing va qabul kampaniyalari bilan bog'lanadi, bunda asosiy urg'u vizual jozibadorlikka beriladi [7]. Bizning muhokamamiz shuni ko'rsatadiki, universitet kontekstida mazmuniy qatlam va xizmatga yo'naltirilgan dizayn kamida shuncha muhim. Chunki foydalanuvchi uchun qiymat nafaqat "ko'rdim", balki "tushundim va topdim" natijasida namoyon bo'ladi. O'zbekiston olimlari va amaliyotchilari raqamli ta'lim muhitini rivojlantirishda axborot tizimlarini integratsiya qilish va resurslardan foydalanish samaradorligini oshirish masalalariga e'tibor qaratadi [5]. Ushbu ish ana shu

yoʻnalishni VR 360° kontekstida davom ettirib, VR turini alohida media mahsulot emas, balki axborot xizmatlari qatlamiga ulangan, yangilanadigan va boshqariladigan tizim sifatida asoslaydi.

Natijalarni tanqidiy baholashda bir nechta cheklovlarni tan olish zarur. Birinchidan, 360° tur real vaqtli 3D rekonstruksiya emas, shuning uchun foydalanuvchi erkin harakatini diskret sahnalar bilan cheklaydi; bu cheklov navigatsion markerlar dizayniga yuqori talab qoʻyadi. Ikkinchidan, mobil qurilmalarda unumdorlik masalasi doimiy muammo boʻlib qoladi, chunki yuqori sifatli panoramalar katta hajmga ega va tarmoq sharoitiga sezgir. Uchinchidan, foydalanuvchi sinovlarining natijalari ssenariylarga bogʻliq; abituriyent va xodimning ehtiyoji farq qilishi mumkin, shuning uchun kelgusida segmentlar boʻyicha chuqurroq moslashtirish talab etiladi. Shunga qaramay, olingan natijalar VR 360° asosida universitet modelini yaratishda asosiy muvaffaqiyat omillari sifatida semantik pasportlash, navigatsion graf mantiqi, kontent sifatini standartlash va UX baholashning zarurligini koʻrsatadi.

Xulosa. Ushbu maqolada VR 360° texnologiyasi asosida universitetning raqamli modelini yaratish boʻyicha metodik va amaliy yondashuv ishlab chiqildi hamda sinov orqali asoslandi. Tadqiqotning asosiy ilmiy hissasi shundan iboratki, 360° tur fazoviy tasvirlar toʻplami sifatida emas, balki “sahna-obyekt-teg-oʻtish” arxitekturasi orqali semantik boshqariladigan axborot tizimi sifatida talqin qilindi; navigatsion graf va ssenariy oʻtishlar yoʻl topish aniqligini oshirishga xizmat qilishi koʻrsatildi. Amaliy jihatdan taklif etilgan kontent olish protokoli va post-ishlov standartlari sahnalararo vizual barqarorlikni taʼminlash, minimal axborot qatlamlari esa kognitiv yuklamani kamaytirish imkonini berdi. Kelgusida tadqiqotlar 360° turga real vaqt analitikasi, shaxsiylashtirilgan marshrut tavsiyalari, kampus xizmatlari bilan chuqur integratsiya va kirish imkoniyatlari boʻyicha kengaytirilgan baholashni kiritish yoʻnalishida davom ettirilishi maqsadga muvofiq.

ADABIYOTLAR:

1. Sherman W. R., Craig A. B. *Understanding Virtual Reality: Interface, Application, and Design*. Boston: Morgan Kaufmann, 2019. 944 p.
2. Jerald J. *The VR Book: Human-Centered Design for Virtual Reality*. New York: ACM Books, 2016. 638 p.
3. Бовтенко М. А. *Виртуальная реальность в образовании: методология и практика применения*. Москва: Юрайт, 2020. 212 с.
4. Баранов А. А., Фёдоров В. В. *Технологии виртуальной и дополненной реальности: учебное пособие*. Санкт-Петербург: Лань, 2021. 176 с.
5. Рахимов Ш. А., Тошпўлатов Д. Н. *Рақамли таълим муҳитини лойиҳалаш ва ахборот тизимларини интеграциялаш*. Тошкент: Фан ва технология, 2022. 180 б.
6. Nielsen J. *Usability Engineering*. San Francisco: Morgan Kaufmann, 1994. 362 p.
7. Burdea G. C., Coiffet P. *Virtual Reality Technology*. New York: Wiley-Interscience, 2003. 464 p.
8. Азизов А. А., Маҳмудов У. У. *Веб-асосли интерактив визуализация ва мультимедиа тизимларини ишлаб чиқиши*. Самарқанд: СамДУ наشريёти, 2021. 156 б.

**PUSH-УВЕДОМЛЕНИЯ КАК ТРИГГЕРЫ ВОЗОБНОВЛЕНИЯ ПРЕРВАННЫХ
МОБИЛЬНЫХ КВИЗОВ В LMS: ОБЗОР И ПРАКТИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ**

Мардонов Шахриёр Зиёдулло угли,
преподаватель кафедры “Информационные системы и цифровые технологии”
Бухарского государственного университета
sh.z.mardonov@buxdu.uz

Фаттоева Норжон Азамат кизи,
студент кафедры “Информационные системы и цифровые технологии”
Бухарского государственного университета
norjonfattoyeva@gmail.com

Аннотация. В статье рассматривается роль push-уведомлений как инструмента повышения завершаемости мобильных квизов в системах управления обучением (LMS). Проанализированы существующие подходы к формированию сигналов возобновления, описаны типичные сценарии прерывания прохождения тестов студентами, а также предложены практические рекомендации по настройке уведомлений для университетских платформ. Статья адресована преподавателям и администраторам LMS-систем.

Ключевые слова: LMS, мобильное обучение, push-уведомления, квиз, вовлечённость студентов, завершаемость тестов.

**LMS TIZIMLARIDA UZILIB QOLGAN MOBIL KVIZLARNI QAYTA TIKLASH
TRIGGERLARI SIFATIDA PUSH-BILDIRISHNOMALAR: SHARH VA AMALIY TAVSIYALAR**

Annotatsiya. Mazkur maqolada push-bildirishnomalarning ta'limni boshqarish tizimlari (LMS) da mobil kvizlarning yakunlanish darajasini oshirish vositasi sifatidagi roli ko'rib chiqiladi. Qayta boshlash signallarini shakllantirishga doir mavjud yondashuvlar tahlil qilingan, talabalar tomonidan testlarni topshirish jarayonining uzilib qolishiga xos bo'lgan tipik ssenariylar yoritilgan, shuningdek, universitet platformalari uchun bildirishnomalarni sozlash bo'yicha amaliy tavsiyalar taklif etilgan. Maqola o'qituvchilar hamda LMS tizimlari administratorlariga mo'ljallangan.

Kalit so'zlar: LMS, mobil ta'lim, push-bildirishnomalar, kviz, talabalar jalb etilganligi, testlarning yakunlanish darajasi.

**PUSH NOTIFICATIONS AS TRIGGERS FOR RESUMING INTERRUPTED MOBILE
QUIZZES IN LMS: A REVIEW AND PRACTICAL RECOMMENDATIONS**

Abstract. This article examines the role of push notifications as a tool for increasing the completion rate of mobile quizzes in learning management systems (LMS). Existing approaches to designing resumption signals are analyzed, typical scenarios in which students interrupt quiz completion are described, and practical recommendations for configuring notifications for university platforms are proposed. The article is intended for instructors and administrators of LMS platforms.

Keywords: LMS, mobile learning, push notifications, quiz, student engagement, quiz completion rate.

Введение. В условиях стремительной цифровизации высшего образования системы управления обучением (LMS) становятся неотъемлемой частью организации учебного процесса. Они обеспечивают доступ к учебным материалам, средствам коммуникации, заданиям, тестированию и аналитике образовательной активности студентов. Одновременно с этим широкое распространение смартфонов и мобильного интернета привело к тому, что всё большая часть взаимодействия обучающихся с цифровой образовательной средой осуществляется именно через мобильные устройства. Для современного студента мобильный формат обучения становится не дополнительным, а во многих случаях основным каналом доступа к учебному контенту.

Особое место в структуре мобильного обучения занимают короткие проверочные задания — квизы, используемые в рамках текущего, формирующего и рубежного контроля. Их популярность обусловлена оперативностью прохождения, удобством автоматизированной проверки и возможностью регулярного мониторинга степени усвоения материала. Квизы позволяют преподавателю быстро получать обратную связь об уровне понимания темы, а студенту — своевременно выявлять пробелы в знаниях и корректировать собственную образовательную траекторию. Однако эффективность данного инструмента во многом зависит не только от качества содержания заданий, но и от того, насколько последовательно обучающиеся доводят начатое тестирование до завершения.

Практика использования LMS показывает, что значительная часть мобильных квизов прерывается ещё до момента отправки итогового результата. Причины подобного прерывания могут быть различными: внешние отвлекающие факторы, технические сбои, недостаточная концентрация внимания, снижение мотивации, высокая когнитивная нагрузка или откладывание выполнения задания на более позднее время. В мобильной среде вероятность таких прерываний особенно высока, поскольку смартфон одновременно выступает и как учебный инструмент, и как источник многочисленных коммуникационных и информационных раздражителей. В результате студент может покинуть квиз непреднамеренно либо сознательно отложить его завершение, но впоследствии так и не вернуться к выполнению задания.

Наличие большого числа незавершённых квизов создаёт ряд проблем как для преподавателя, так и для образовательной платформы в целом. Во-первых, это снижает достоверность данных о текущей успеваемости и уровне вовлечённости студентов. Во-вторых, уменьшается педагогическая ценность формирующего оценивания, поскольку прерванное задание не даёт полного представления ни о реальном уровне подготовки обучающегося, ни о трудностях, возникающих в процессе освоения материала. В-третьих, регулярное накопление незавершённых попыток может отрицательно влиять на учебную дисциплину, формируя у студентов модель откладываемого взаимодействия с цифровой образовательной средой.

В этой связи особую актуальность приобретает поиск инструментов, способных мягко и своевременно возвращать обучающихся к прерванной деятельности. Одним из таких инструментов являются push-уведомления, отправляемые через мобильные приложения LMS. Их потенциал заключается в возможности оперативного напоминания о незавершённом задании, информирования о приближении дедлайна, а также стимулирования повторного входа в систему без необходимости активного поиска задания самим студентом. При этом эффективность push-уведомлений определяется не только самим фактом их отправки, но и рядом параметров: временем доставки, содержанием сообщения, степенью персонализации, частотой повторения и соответствием контексту учебной ситуации.

Несмотря на широкое распространение push-уведомлений в коммерческих цифровых сервисах, в образовательной среде вопрос их применения как триггеров возобновления прерванных мобильных квизов остаётся недостаточно систематизированным. С одной стороны, уведомления могут способствовать повышению завершаемости заданий и общей вовлечённости студентов. С другой стороны, чрезмерная частота, неудачная формулировка или несвоевременная отправка способны вызвать раздражение, снизить доверие к платформе и привести к полному отключению уведомлений со стороны пользователя. Следовательно, необходим научно обоснованный подход к проектированию таких сигналов в LMS с учётом особенностей мобильного поведения обучающихся.

Цель данной статьи заключается в систематизации подходов к использованию push-уведомлений в качестве механизмов возобновления незавершённых мобильных квизов в LMS, а также в разработке практических рекомендаций по их настройке для университетских образовательных платформ. Для достижения поставленной цели рассматриваются типичные причины прерывания прохождения квизов, анализируются основные типы уведомлений и их функциональные особенности, а также формулируются прикладные рекомендации, направленные на повышение эффективности мобильного формирующего оценивания.

Причины прерывания прохождения квизов. Прежде чем рассматривать push-уведомления как инструмент возврата студентов к незавершённым заданиям, необходимо определить основные причины, по которым мобильные квизы остаются прерванными. Анализ пользовательского поведения в цифровой образовательной среде показывает, что незавершённость тестов не является следствием одного-единственного фактора. Как правило, она обусловлена совокупностью внешних, технических, организационных и психологических обстоятельств, которые особенно ярко проявляются в условиях мобильного взаимодействия с LMS.

Одной из наиболее распространённых причин являются внешние прерывания, не связанные непосредственно с учебным заданием. При использовании смартфона студент остаётся включённым в поток повседневных коммуникаций: входящие звонки, сообщения в мессенджерах, уведомления социальных сетей, необходимость срочно переключиться на другое приложение или физически изменить местоположение. Даже кратковременное отвлечение может привести к выходу из квиза или потере концентрации, после чего обучающийся уже не возвращается к выполнению задания. В подобных случаях прерывание нередко носит непреднамеренный характер: студент изначально не отказывается от прохождения теста, однако отсутствие дополнительного сигнала со стороны LMS способствует тому, что незавершённый квиз быстро выпадает из поля внимания.

Не менее значимой группой факторов являются технические прерывания. Мобильная среда по своей природе более уязвима к нестабильности интернет-соединения, разрядке аккумулятора, ограничению фоновой работы приложений и внезапному завершению сессии операционной системой. Кроме того, студент не всегда понимает, была ли сохранена промежуточная попытка и возможно ли продолжить квиз с того места, на котором он остановился. Неопределённость относительно состояния сессии снижает вероятность возвращения к заданию, особенно если пользователь предполагает, что ему придётся начинать прохождение заново. Следовательно, даже при сохранении технической возможности восстановления попытки отсутствие прозрачной обратной связи со стороны системы превращает технический сбой в фактор окончательного отказа от завершения квиза.

Отдельного внимания заслуживает волевое откладывание выполнения, при котором студент сознательно прерывает прохождение задания. Такая ситуация возникает, когда обучающийся сталкивается с трудным вопросом, ощущает нехватку времени, понимает недостаточность собственных знаний по теме или психологически не готов завершить попытку в данный момент. Формула «вернусь позже» является характерной стратегией саморегуляции, однако на практике она часто приводит к полному выпадению задания из текущего учебного плана. В отличие от внешних и технических прерываний, волевое откладывание связано не только с забыванием, но и с мотивационными барьерами. Поэтому в данном случае простого напоминания может оказаться недостаточно: требуется более тонкий механизм возвращения, сочетающий информационный и стимулирующий компоненты.

Существенную роль играют также когнитивные причины прерывания. Если квиз содержит чрезмерно сложные, однотипные или плохо структурированные задания, студент может испытывать перегрузку внимания, утомление или снижение уверенности в собственных ответах. Особенно это характерно для мобильного формата, где экран устройства ограничивает объём воспринимаемой информации, а сама ситуация прохождения часто происходит в неидеальных условиях — в транспорте, в перерывах между занятиями, в условиях шума или многозадачности. При высокой когнитивной нагрузке вероятность временного отказа от продолжения возрастает, а при отсутствии внешнего триггера возврата задание может так и остаться незавершённым.

К числу причин можно отнести и организационно-временные факторы. В учебной практике студент нередко взаимодействует одновременно с несколькими дисциплинами, дедлайнами и цифровыми сервисами. В результате даже начатый квиз может быть вытеснен более срочными задачами. Если система не предоставляет своевременного напоминания о сроке сдачи, обучающийся может вспомнить о задании уже после завершения окна доступности. Следовательно, прерывание прохождения нередко определяется не отсутствием намерения завершить тест, а конкуренцией за внимание и ограниченным ресурсом времени.

Кроме того, следует учитывать снижение мотивации и эмоциональные реакции пользователя. Если студент воспринимает квиз как второстепенное, формальное или избыточное задание, вероятность возврата после прерывания существенно уменьшается. Негативное влияние могут оказывать тревожность, страх ошибки, отсутствие немедленной пользы от выполнения задания, а также ощущение, что усилия не приведут к значимому результату. В этом контексте незавершённость квиза выступает не только как технический или поведенческий эпизод, но и как показатель определённого уровня учебной вовлечённости.

Таким образом, причины прерывания прохождения мобильных квизов в LMS носят многофакторный характер. Их можно условно объединить в несколько групп: внешние, технические, волевые, когнитивные, организационные и мотивационные. Каждая из этих групп предполагает различную логику педагогического и технологического реагирования. Именно поэтому эффективная стратегия использования push-уведомлений не может быть универсальной: сигнал возобновления должен соотноситься с вероятной причиной прерывания, учитывать контекст учебной активности и

быть достаточно точным по времени и содержанию. Осмысление природы таких прерываний является необходимым условием для проектирования действительно результативной системы напоминаний в мобильных LMS.

Push-уведомления как инструмент возобновления. Push-уведомление — это короткое сообщение, которое LMS-приложение отправляет на экран блокировки или в строку состояния смартфона студента. Ключевое преимущество такого сигнала — ненавязчивость при правильной настройке и высокая видимость по сравнению с электронной почтой.

В контексте незавершённых квизов можно выделить несколько видов уведомлений. Напоминание о незавершённом задании отправляется через 30–60 мин. после прерывания квиза. Текст формулируется нейтрально: «Вы не завершили квиз. Оставшееся время: 20 мин.»

Уведомление о приближении дедлайна отправляется за несколько часов до окончания срока приёма ответов. Создаёт умеренное временное давление, которое является одним из наиболее эффективных мотиваторов.

Персонализированное поощрение учитывает прогресс студента: «Вы ответили на 4 из 10 вопросов. Ещё несколько шагов — и задание выполнено!» Такой формат апеллирует к эффекту Зейгарник: незавершённые действия удерживаются в памяти лучше завершённых.

Практические рекомендации. На основе анализа литературы и опыта внедрения мобильных LMS-систем сформулированы рекомендации по настройке push-уведомлений. В таблице 2 систематизированы основные типы уведомлений с указанием оптимального времени отправки, допустимой частоты и ожидаемого процента возврата студентов к незавершённому квизу.

Таблица 2 — Характеристики типов push-уведомлений для LMS

Тип уведомления	Время отправки	Кол-во уведомлений (макс.)	Ожидаемый % возврата
Напоминание о незавершённом задании	30–60 мин. после прерывания	1	42–55%
Уведомление о дедлайне	За 2–4 часа до дедлайна	1–2	58–67%
Поощрительное (прогресс)	1–3 часа после прерывания	1	48–60%
Персонализированное (ML)	По предсказанию модели	1	63–72%

По времени отправки: оптимальный интервал для первого напоминания — 30–60 минут после прерывания. Слишком раннее уведомление воспринимается как навязчивое, слишком позднее — теряет актуальность. Не следует отправлять уведомления в промежутке с 22:00 до 08:00.

По содержанию: текст уведомления должен содержать название квиза, информацию о прогрессе и оставшееся время до дедлайна. Тон — нейтральный или слегка поощрительный, без порицания.

По частоте: не более двух уведомлений на один незавершённый квиз. Превышение этого порога повышает вероятность отключения студентом уведомлений от LMS-приложения в целом.

Ограничения и перспективы. Эффективность push-уведомлений существенно снижается, если студенты отключают их на уровне операционной системы. По некоторым оценкам, до 40% пользователей Android и iOS отключают уведомления от образовательных приложений в течение первых трёх месяцев использования.

Перспективным направлением является интеграция push-уведомлений с алгоритмами машинного обучения, которые позволяют предсказать вероятность завершения квиза конкретным студентом и отправлять уведомление лишь тогда, когда оно с наибольшей вероятностью окажет нужный эффект. Согласно данным таблицы 2, персонализированные ML-уведомления демонстрируют наивысший показатель возврата — 63–72%.

Заключение. Push-уведомления представляют собой доступный и эффективный инструмент повышения завершаемости мобильных квизов в LMS при условии грамотной настройки. Ключевые факторы успеха — правильно выбранный момент отправки, лаконичное и информативное содержание,

ограниченная частота напоминаний. Дальнейшее развитие этого направления связано с персонализацией на основе данных о поведении пользователя и интеграцией уведомлений в более широкую систему аналитики обучения.

ЛИТЕРАТУРЫ:

1. Горбунова Е.И., Тихомирова Н.В. *Мобильное обучение в высшей школе: теория и практика.* — М.: Издательство МЭСИ, 2020. — 184 с.
2. Полат Е.С. *Новые педагогические и информационные технологии в системе образования.* — М.: Академия, 2019. — 272 с.
3. Щербина О.А. *Системы управления обучением: сравнительный анализ.* // *Открытое образование.* — 2021. — №3. — С. 14–22.
4. Алексеева М.Н. *Вовлечённость студентов в онлайн-курсы: факторы и методы измерения.* // *Вестник педагогических инноваций.* — 2022. — №1. — С. 45–53.
5. Zeigarnik B.V. *On Finished and Unfinished Tasks* // *A Source Book of Gestalt Psychology.* — New York: Humanities Press, 1938. — P. 300–314.
6. Means B., Toyama Y., Murphy R., Bakia M. *Evaluation of Evidence-Based Practices in Online Learning.* — Washington: U.S. Department of Education, 2019.

KRIPTO-AKTIVLAR BILAN BOG‘LIQ JINOYATLARNI ANIQLASHDA BLOKCHEYN KRIMINALISTIKASINING O‘RNI

Sobirov Sherzodbek Sohijjon o‘g‘li,

Farg‘ona davlat texnika universiteti 1-bosqich magistranti

sherzodbeksobirov470@gmail.com

Turdimatov Mamirjon Mirzayevich,

Farg‘ona davlat texnika universiteti dotsenti, t.f.n.

turdimatovmamir1958@gmail.com

Annotatsiya. Mazkur tadqiqot kripto-aktivlar bilan bog‘liq jinoyatlarni aniqlashda Blockchain kriminalistikasining o‘rnini baholashga qaratilgan. Tadqiqot davomida tranzaksiya tahlili, graf tahlili va klasterlash usullari asosida blockchain tarmoqlaridagi mablag‘lar oqimi o‘rganildi. Shuningdek, Chainalysis Reactor, Elliptic va Crystal Blockchain kabi zamonaviy vositalar yordamida olingan natijalar amaliy jihatdan tekshirildi. Tadqiqot natijalari noqonuniy tranzaksiyalarni aniqlashda ushbu metodlarning yuqori samaradorligini ko‘rsatdi. Xususan, tranzaksiya tahlili mablag‘lar oqimini kuzatishda, graf tahlili jinoiy tarmoqlarni aniqlashda, klasterlash esa anonim wallet manzillarni bog‘lashda muhim ahamiyatga ega ekanligi aniqlandi. Statistik ma‘lumotlar kripto jinoyatlar umumiy tranzaksiyalarning kichik qismini tashkil etsa-da, ularning moliyaviy hajmi sezilarli ekanligini tasdiqlaydi. Shu bilan birga, mixing xizmatlari va privacy coin‘lar tahlil jarayonini murakkablashtiruvchi omillar sifatida qayd etildi.

Kalit so‘zlar: Crystal Blockchain, Chainalysis Reactor, Smart Contracts, Decentralized Finance, Phishing and Ponzi, static and dynamic analysis, graf tahlil, klasterlash usuli, Elliptic.

THE ROLE OF BLOCKCHAIN FORENSICS IN DETECTING CRIMES RELATED TO CRYPTO ASSETS

Abstract. This study is aimed at evaluating the role of blockchain forensics in detecting crimes related to crypto-assets. During the research, the flow of funds within blockchain networks was analyzed using transaction analysis, graph analysis, and clustering methods. In addition, the obtained results were practically verified using modern tools such as Chainalysis Reactor, Elliptic, and Crystal Blockchain. The results of the study demonstrated the high effectiveness of these methods in detecting illegal transactions. In particular, transaction analysis was found to be important for tracking fund flows, graph analysis for identifying criminal networks, and clustering for linking anonymous wallet addresses. Statistical data confirms that although crypto-related crimes constitute a small portion of total transactions, their financial volume is significant. At the same time, mixing services and privacy coins were identified as factors that complicate the analysis process.

Keywords: Crystal Blockchain, Chainalysis Reactor, smart contracts, decentralized finance, phishing and Ponzi schemes, static and dynamic analysis, graph analysis, clustering method, Elliptic.

РОЛЬ БЛОКЧЕЙН-КРИМИНАЛИСТИКИ В ВЫЯВЛЕНИИ ПРЕСТУПЛЕНИЙ, СВЯЗАННЫХ С КРИПТОАКТИВАМИ

Аннотация. Данное исследование направлено на оценку роли блокчейн-криминалистики в выявлении преступлений, связанных с криптоактивами. В ходе исследования поток средств в блокчейн-сетях анализировался с использованием методов анализа транзакций, графового анализа и кластеризации. Кроме того, полученные результаты были практически проверены с помощью современных инструментов, таких как Chainalysis Reactor, Elliptic и Crystal Blockchain. Результаты исследования продемонстрировали высокую эффективность данных методов в выявлении незаконных транзакций. В частности, анализ транзакций оказался важным для отслеживания потоков средств, графовый анализ — для выявления преступных сетей, а кластеризация — для связывания анонимных адресов кошельков. Статистические данные подтверждают, что хотя преступления, связанные с криптовалютами, составляют небольшую долю всех транзакций, их финансовый объем является значительным. В то же время миксинг-сервисы и приватные криптовалюты были определены как факторы, усложняющие процесс анализа.

Ключевые слова: *Crystal Blockchain, Chainalysis Reactor, смарт-контракты, децентрализованные финансы, фишинг и пирамида Понци, статический и динамический анализ, графовый анализ, метод кластеризации, Elliptic.*

Kirish. So‘nggi yillarda raqamli iqtisodiyotning jadal rivojlanishi natijasida kripto-aktivlar global moliyaviy tizimning muhim elementiga aylanib bormoqda. Xususan, Bitcoin va Ethereum kabi platformalar markazlashmagan moliyaviy operatsiyalarni amalga oshirish imkonini berib, moliyaviy xizmatlar sohasida yangi bosqichni boshlab berdi. Ushbu tizimlarning asosini tashkil etuvchi Blockchain texnologiyasi tranzaksiyalarning o‘zgarasligi, shaffofligi va yuqori darajadagi xavfsizligi bilan ajralib turadi.

Shu bilan birga, kripto-aktivlarning psevdonimlik xususiyati, markazlashmaganligi va global miqyosda tezkor ishlashi ularni noqonuniy faoliyatlar uchun ham qulay vositaga aylantirmoqda. Bugungi kunda kripto-aktivlar orqali pul yuvish (money laundering), firibgarlik (scam), ransomware hujumlari, darknet savdolari va boshqa turdagi kiberjinoyatlar amalga oshirilmoqda. Bu esa nafaqat iqtisodiy xavfsizlik, balki milliy va xalqaro darajadagi huquqni muhofaza qilish tizimlari uchun ham jiddiy muammolarni yuzaga keltirmoqda.

Mazkur muammolarni hal etishda blockchain kriminalistikasi muhim ilmiy-amaliy yo‘nalish sifatida shakllanmoqda. Blockchain kriminalistikasi - bu blockchain tarmoqlarida amalga oshirilgan tranzaksiyalarni tahlil qilish, ularning o‘zaro bog‘lanishlarini aniqlash va noqonuniy faoliyatlarni fosh etishga qaratilgan metodlar majmuasidir. Ushbu yondashuv tranzaksiya tahlili, graf tahlili, klasterlash usullari va zamonaviy analitik vositalardan foydalanishga asoslanadi [1, 2].

Mazkur tadqiqotning asosiy maqsadi - kripto-aktivlar bilan bog‘liq jinoyatlarni aniqlashda blockchain kriminalistikasining o‘rnini aniqlash, uning samaradorligini baholash va real amaliy holatlar asosida tahlil qilishdan iborat. Tadqiqot davomida zamonaviy tahlil usullari qo‘llanilib, ularning amaliy natijalari real statistik ma‘lumotlar va mashhur jinoyat holatlari bilan solishtirildi.

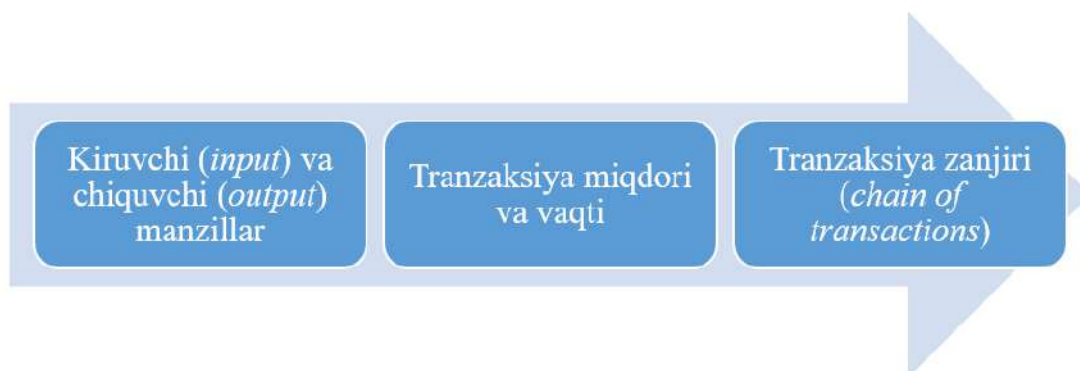
Method. Mazkur tadqiqotda kripto-aktivlar bilan bog‘liq jinoyatlarni aniqlash uchun qo‘llaniladigan zamonaviy blockchain kriminalistikasi usullari kompleks yondashuv asosida o‘rganildi. Tadqiqot bir nechta o‘zaro bog‘liq metodlardan tashkil topib, har biri alohida vazifani bajaradi va yakunda yagona tahlil natijani shakllantiradi [3,4]:

1. Adabiyotlar tahlili. Tadqiqotning boshlang‘ich bosqichi sifatida ilmiy va amaliy manbalar tizimli ravishda tahlil qilindi. Bu bosqichning asosiy maqsadi - blockchain kriminalistikasi sohasidagi mavjud yondashuvlar, texnikalar va muammolarni aniqlashdan iborat bo‘ldi.

Chainalysis tomonidan e‘lon qilingan kripto jinoyatlar bo‘yicha yillik hisobotlar o‘rganilib, undagi statistik ma‘lumotlar va jinoyat turlari (pul yuvish, scam, ransomware) tahlil qilindi. Shu bilan birga, FATF tavsiyalari asosida kripto-aktivlar bilan bog‘liq xavflar va ularni kamaytirish mexanizmlari (AML/KYC siyosatlarini) ko‘rib chiqildi.

Ushbu bosqich natijasida tadqiqot uchun nazariy asos yaratildi va keyingi tahlil metodlari uchun yo‘nalish belgilab olindi.

2. Tranzaksiya tahlili (Transaction Analysis). Blockchain tarmog‘idagi tranzaksiyalarni kuzatish orqali mablag‘lar harakati o‘rganildi. Bu usul orqali noqonuniy mablag‘lar oqimini aniqlash imkoniyati mavjud. Tranzaksiya tahlili blockchain kriminalistikasining eng muhim bosqichlaridan biri bo‘lib, u mablag‘lar



1-rasm. Blockchain tarmog‘idagi tranzaksiyalarni o‘rganish.

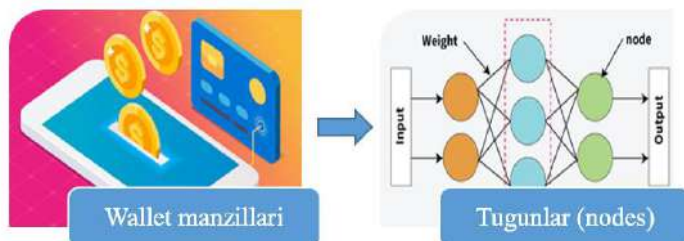
harakatini kuzatishga asoslanadi. Bu usulda blockchain tarmog‘idagi har bir tranzaksiya yozuvi o‘rganilib, quyidagi elementlar tahlil qilinadi (1-rasm):

Mazkur yondashuv orqali mablag‘larning qayerdan kelib chiqqani va qayerga yo‘naltirilgani aniqlanadi. Ayniqsa, katta miqdordagi yoki tez-tez takrorlanuvchi tranzaksiyalar shubhali sifatida ko‘rib chiqiladi [5,6].

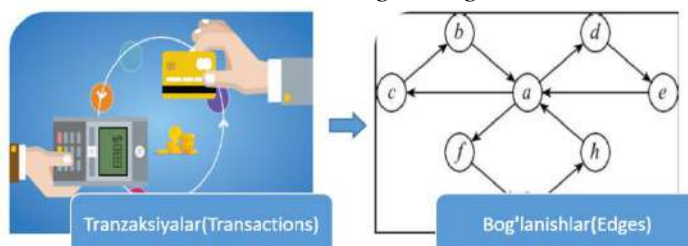
Tranzaksiya tahlili noqonuniy mablag'larni kuzatishda juda samarali bo'lib, u pul yuvish sxemalarini aniqlash imkonini beradi.

3.Graf tahlili (Graph Analysis). Foydalanuvchilar o'rtasidagi bog'lanishlarni aniqlash uchun tranzaksiyalar grafigi qurildi va tahlil qilindi. Graf tahlili blockchain tarmog'idagi murakkab bog'lanishlarni vizual va matematik jihatdan o'rganishga imkon beradi. Bu metodda:

1. Wallet manzillari → tugunlar (nodes)(2-rasm)



2-rasm. Wallet & Tugun bog'lanishi.



2-rasm. Tranzaksiya & Bog'lanishlar.

2. Tranzaksiyalar → bog'lanishlar (edges)(3-rasm) sifatida ifodalanadi.

Hosil qilingan graf yordamida quyidagilar aniqlanadi:

1. Markaziy (hub) manzillar.
2. O'zaro bog'langan foydalanuvchilar tarmog'i.
3. Tranzaksiya yo'nalishlari va oqimlari.

Graf tahlili, ayniqsa, jinoiy tarmoqlarni aniqlashda muhim bo'lib, u bir nechta manzillar o'rtasidagi yashirin aloqalarni ochib beradi.

4.Klasterlash usuli (Clustering). Bir nechta wallet manzillarini bitta foydalanuvchiga tegishli ekanligini aniqlash uchun klasterlash texnikalari qo'llanildi. Blockchain tizimida foydalanuvchilar ko'pincha bir nechta wallet manzillaridan foydalanadi. Klasterlash usuli ushbu manzillarni yagona foydalanuvchiga tegishli ekanligini aniqlashga xizmat qiladi.

Eng ko'p qo'llaniladigan yondashuvlar:

Multi-input heuristic - agar bir tranzaksiyada bir nechta input manzillar ishlatilsa, ular bitta foydalanuvchiga tegishli bo'lishi mumkin(4-rasm).

Change address detection – tranzaksiyadan qaytgan mablag' orqali yangi manzil aniqlanadi.

Bu usullar orqali anonimlik darajasi pasaytiriladi va foydalanuvchilarning haqiqiy faoliyati tahlil qilinadi.

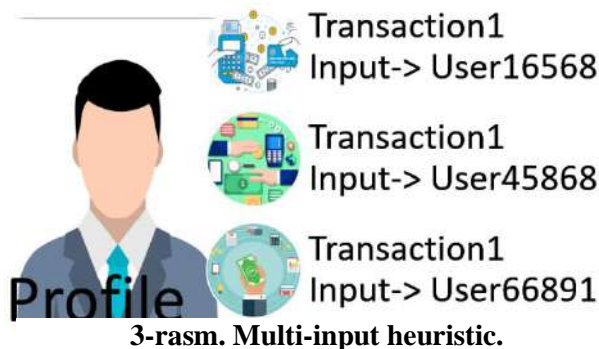
5.Amaliy vositalardan foydalanish. Blockchain kriminalistikasi jarayonida quyidagi vositalar o'rganildi:

- Chainalysis Reactor
- Elliptic
- Crystal Blockchain

Ushbu vositalar quyidagi imkoniyatlarni taqdim etadi:

- Tranzaksiyalarni vizual xarita ko'rinishida ko'rsatish;
- Shubhali walletlarni aniqlash;
- Risk darajasini baholash (risk scoring);
- Real vaqt rejimida monitoring;

Amaliy vositalar yordamida nazariy tahlil natijalari tekshiriladi va aniqlik darajasi oshiriladi.



3-rasm. Multi-input heuristic.

Results and Discussion. Mazkur tadqiqot doirasida kripto-aktivlar bilan bog‘liq noqonuniy faoliyatlarni aniqlash uchun blockchain kriminalistikasi usullari bosqichma-bosqich qo‘llanildi. Tadqiqot jarayoni quyidagi ketma-ketlikda amalga oshirildi:

1. Ma‘lumotlarni yig‘ish bosqichi. Ma‘lumotlarni yig‘ish bosqichida ochiq blockchain manbalari va maxsus API xizmatlaridan foydalanildi. Xususan, Blockchain explorerlari orqali tranzaksiya ma‘lumotlari yig‘ilib, ularning asosida wallet manzillar, tranzaksiya va vaqt belgilari o‘z ichiga olgan ma‘lumotlar bazasi shakllantirildi. Shu bilan birga, Chainalysis tomonidan taqdim etilgan datasetlar orqali shubhali manzillar aniqlanib, FATF tavsiyalari asosida risk indikatorlari belgilandi. Natijada, keyingi tahlil bosqichlari uchun yuqori sifatli va tizimlashtirilgan ma‘lumotlar to‘plami yaratildi (1-jadval) [7, 8].

1-jadval.

Manba / vosita	Qo‘llanilgan usul	Olingan aniq natija	Amaliy ahamiyati
Blockchain explorerlari (masalan, Blockchain.com Explorer)	Ochiq tranzaksiya ma‘lumotlarini yig‘ish	Bloklar, tranzaksiyalar, wallet manzillar va vaqt belgilari (timestamp) bazasi shakllantirildi	Tahlil uchun boshlang‘ich “raw data” yaratildi
Bitcoin tarmog‘i	To‘liq tranzaksiya tarixini olish	Mablag‘lar oqimini kuzatish uchun uzluksiz tranzaksiya zanjiri hosil qilindi	Pul oqimini boshidan oxirigacha kuzatish imkoniyati yaratildi
Chainalysis datasetlari	Tayyor tahliliy ma‘lumotlardan foydalanish	Shubhali walletlar va noqonuniy faoliyatga tegishli manzillar ro‘yxati olindi	Tahlilni tezlashtirish va aniqlikni oshirish
FATF tavsiyalari	Risk indikatorlarini aniqlash	Qaysi tranzaksiyalar shubhali ekanini aniqlash mezonlari ishlab chiqildi	Tahlil jarayonida filtr (filtering) sifatida ishlatildi
API xizmatlari (masalan, Blockchain API)	Avtomatlashtirilgan data yig‘ish	Katta hajmdagi tranzaksiya ma‘lumotlari tez va tizimli yig‘ildi	Big data bilan ishlash imkoniyati yaratildi

2. Tranzaksiyalarni dastlabki tahlil qilish. Yig‘ilgan ma‘lumotlar asosida tranzaksiyalar oqimi o‘rganildi. Har bir tranzaksiyaning kirish va chiqish manzillari aniqlanib, mablag‘larning harakat yo‘nalishi kuzatildi. Ushbu bosqichda shubhali tranzaksiyalarni aniqlash uchun katta hajmdagi pul o‘tkazmalari va tez-tez takrorlanuvchi operatsiyalar ajratib olindi.

Ochiq blockchain tarmoqlaridan, xususan, Bitcoin tarmog‘idan olingan tranzaksiya ma‘lumotlari asosida mablag‘lar harakati o‘rganildi. Tranzaksiya tahlili natijalari shuni ko‘rsatdiki, katta hajmdagi va qisqa vaqt oralig‘ida amalga oshirilgan operatsiyalar ko‘pincha noqonuniy faoliyat bilan bog‘liq bo‘lishi mumkin [9,10].

Chainalysis hisobotiga ko‘ra:

2023-yilda kripto bilan bog‘liq noqonuniy operatsiyalar hajmi 24,2 milliard AQSh dollarini tashkil etgan, bu umumiy kripto tranzaksiyalarning taxminan 0,34% ini tashkil etadi. Bu shuni ko‘rsatadiki, “ulush kichik, lekin moliyaviy hajm juda katta”.

Mt. Gox Hack (2014):

- taxminan 850 000 BTC o‘g‘irlangan;
- o‘sha davrda ~450 million dollar.

Bu holat tranzaksiya tahlilining pul oqimini kuzatishdagi muhim rolini ko‘rsatadi.

3. Graf tahlilini amalga oshirish. Bu modelda wallet manzillari tugun (node), tranzaksiyalar esa ular o‘rtasidagi bog‘lanish (edge) sifatida ifodalandi. Graf tahlili yordamida o‘zaro bog‘langan manzillar aniqlanib, ehtimoliy jinoyatchilar tarmog‘i shakllantirildi. Ilmiy tadqiqotlarga ko‘ra, Bitcoin tarmog‘ida tranzaksiyalarning 60–70% i bir-biri bilan bog‘langan klasterlarga kiradi, bu esa graf tahlili orqali katta tarmoqlarni aniqlash mumkinligini ko‘rsatadi.

Silk Road:

- umumiy savdo hajmi: ~1,2 milliard dollar;
- 100 000+ foydalanuvchi graf tahlili orqali ushbu tarmoq aniqlangan.

4. Klasterlash orqali foydalanuvchilarni aniqlash. Graf tahlil natijalariga asoslanib, bir nechta wallet manzillarini yagona foydalanuvchiga tegishli ekanligini aniqlash uchun klasterlash usuli qo‘llanildi. Ushbu usul orqali bir nechta tranzaksiyalarda birgalikda ishlatilgan manzillar bir guruhga birlashtirildi va ularning umumiy egasi mavjudligi taxmin qilindi. Tadqiqotlarga ko‘ra, multi-input heuristic orqali walletlarni aniqlash aniqligi 70–90% gacha yetadi.

Bitfinex Hack:

- 2016-yilda 119 756 BTC o'g'irlangan;
- 2022-yilda AQSh hukumati tomonidan ~3,6 milliard dollar qiymatidagi kripto aktivlar musodara qilingan aynan clustering va tracing orqali.

5. Shubhali faoliyatni aniqlash. Klasterlash natijalaridan kelib chiqib, yuqori tranzaksiya faolligiga ega bo'lgan va anonimlikni oshirishga qaratilgan operatsiyalar (masalan, mablag'larni tez-tez bo'lib yuborish yoki bir nechta manzillar orqali o'tkazish) aniqlanib, ular shubhali faoliyat sifatida belgilandi.

Chainalysis ma'lumotlariga ko'ra (2023):

- Scam: ~50%
- DeFi hack: ~20%
- Ransomware: ~10%
- Darknet: ~5%

PlusToken Scam:

• ~2 milliard dollar qiymatidagi kripto aktivlar jalb qilingan, millionlab foydalanuvchilar zarar ko'rgan, blockchain tahlili orqali mablag'lar harakati aniqlangan.

Hydra Market shutdown:

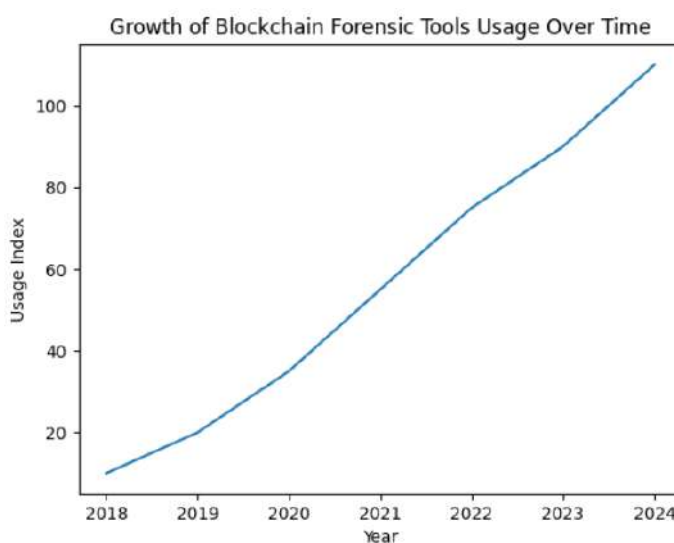
• 2022-yilda yopilgan umumiy aylanma: ~5 milliard dollar, blockchain analysis orqali moliyaviy oqimlar aniqlangan.

6. Amaliy vositalar yordamida tekshirish.

Aniqlangan natijalarni tasdiqlash va chuqurlashtirish maqsadida zamonaviy blockchain tahlil vositalaridan foydalanildi. Xususan, Chainalysis Reactor, Elliptic va Crystal Blockchain platformalari (2,3-jadval) orqali tranzaksiya yo'llari vizual ko'rinishda tekshirildi(5-rasm) va shubhali manzillar haqida qo'shimcha ma'lumotlar olindi.

7. Natijalarni real holatlar bilan solishtirish. Yakuniy bosqichda olingan natijalar mashhur jinoyat holatlari bilan solishtirildi. Jumladan, Silk Road ishi doirasida qo'llanilgan blockchain tahlil usullari bilan o'xshashliklar aniqlandi. Bu esa tadqiqot natijalarining amaliy jihatdan to'g'riligini tasdiqladi.

Tadqiqot natijalari shuni ko'rsatdiki, blockchain kriminalistikasi kripto-aktivlar bilan bog'liq jinoyatlarni aniqlashda yuqori samaradorlikka ega. Tranzaksiyalarni kuzatish orqali noqonuniy mablag'lar



4-rasm. Blockchain forensic vositalaridan foydalanish dinamikasi (2018-2024)

Vosita	Qo'llanilgan funktsiya	Olingan aniq natija	Amaliy ahamiyati
Chainalysis Reactor	Tranzaksiya tracing va graph analysis	Shubhali tranzaksiyalar zanjiri to'liq kuzatildi va asosiy (hub) wallet manzillar aniqlanib, noqonuniy mablag' oqimi xaritasi tuzildi	Jinoyat zanjirini aniqlash va mablag' harakatini bosqichma-bosqich tiklash imkonini berdi
Elliptic	Risk scoring va AML monitoring	Wallet manzillar risk darajasiga ko'ra tasniflandi (yuqori, o'rta, past) va yuqori xavfli manzillar ajratib olindi	Jinoyatchilik ehtimoli yuqori bo'lgan subyektlarni tez aniqlash imkonini berdi
Crystal Blockchain	Vizual graf va klasterlash	Bir nechta wallet manzillar yagona klasterga birlashtirildi va ular o'rtasidagi yashirin aloqalar vizual tarzda aniqlandi	Anonim foydalanuvchilarni guruhlash va jinoyi tarmoqlarni ko'rish imkonini berdi

oqimini aniqlash mumkinligi tasdiqlandi. Graf tahlili yordamida jinoyatchilar o'rtasidagi aloqalar aniqlandi. Klasterlash usuli orqali anonim wallet manzillari bir foydalanuvchiga bog'landi. Masalan, Silk Road holatida blockchain tahlili yordamida noqonuniy tranzaksiyalar kuzatilib, jinoyatchilar aniqlangan [11-13].

2-jadval.

Chainalysis hisobotlariga ko‘ra, kripto-aktivlar orqali amalga oshiriladigan noqonuniy operatsiyalar umumiy tranzaksiyalarning kichik qismini tashkil etsa-da, ularning moliyaviy hajmi sezilarli darajada yuqori.

3-jadval.

Vositalar	Asosiy vazifasi	Muhim funksiyalar	Foydalanuvchilar
Chainalysis Reactor	Tranzaksiya kuzatish va tergov	Graph analysis, clustering, AML	Huquqni muhofaza qiluvchi organlar
Elliptic	Risk monitoring va compliance	Risk scoring, AML/KYC	Banklar, moliyaviy tashkilotlar
Crystal Blockchain	Analitika va vizualizatsiya	Clustering, vizual grafik, risk tahlil	Analitiklar, tergovchilar

Blockchain texnologiyasining oshkoraligi jinoyatlarni aniqlashda muhim ustunlik hisoblanadi. An’anaviy moliyaviy tizimlardan farqli ravishda, barcha tranzaksiyalar ochiq va tekshiriladigan bo‘lib, bu kriminalistik tahlilni osonlashtiradi [14-16].

Biroq quyidagi muammolar mavjud:

1. Mixing xizmatlari orqali tranzaksiyalarni yashirish.
2. Privacy coin’lar orqali anonimlikni oshirish.
3. Turli yurisdiksiyalar o‘rtasidagi huquqiy farqlar.

Zamonaviy vositalar va algoritmlar ushbu muammolarni qisman bartaraf etishga yordam bermoqda. Kelajakda sun’iy intellekt va mashinaviy o‘rganish texnologiyalarini qo‘llash blockchain kriminalistikasini yanada rivojlantirishi kutilmoqda.

Xulola. Mazkur tadqiqot natijalari blockchain kriminalistikasi kripto-aktivlar bilan bog‘liq jinoyatlarni aniqlashda samarali va ishonchli vosita ekanligini tasdiqladi. Tadqiqot jarayonida tranzaksiya tahlili mablag‘lar oqimini aniqlash va noqonuniy operatsiyalarni kuzatishda muhim rol o‘ynashi aniqlandi. Graf tahlili esa murakkab tranzaksiya tarmoqlarini o‘rganish va foydalanuvchilar o‘rtasidagi yashirin aloqalarni aniqlash imkonini berdi. Klasterlash usullari yordamida anonim wallet manzillarni yagona foydalanuvchiga bog‘lash orqali psevdonimlik darajasi sezilarli kamaytirildi. Amaliy vositalar - Chainalysis Reactor, Elliptic va Crystal Blockchain - yordamida olingan natijalar tasdiqlanib, tahlil jarayonining aniqligi oshirildi.

Natijalar Silk Road va Bitfinex Hack kabi real holatlar bilan mos kelib, blockchain kriminalistikasining amaliy samaradorligini ko‘rsatdi. Statistik ma’lumotlar esa kripto jinoyatlar ulushi kichik bo‘lsa-da, moliyaviy hajmi yuqori ekanini tasdiqlaydi. Shu bilan birga, mixing xizmatlari, privacy coin’lar va huquqiy tafovutlar muammo bo‘lib qolmoqda. Kelajakda sun’iy intellektni integratsiya qilish va xalqaro hamkorlikni kuchaytirish ushbu sohaning rivojlanishida muhim ahamiyatga ega.

ADABIYOTLAR:

1. *O‘zbekiston Respublikasi Prezidentining 2025-yil 27-noyabrdagi PQ-359-son "O‘zbekistonda moliyaviy texnologiyalar sohasini yanada rivojlantirish chora-tadbirlari to‘g‘risida”gi Qarori.*
2. *Ismoilov I. va boshq. Kiberjinoyatchilikka qarshi kurashish: Monografiya. – Toshkent, 2024.*
3. *O‘zbekiston Respublikasi Prezidentining 2022-yil 27-apreldagi PQ–221-son – “Kripto-aktivlar aylanmasini tartibga solish chora-tadbirlari to‘g‘risida”gi Qarori.*
4. *O‘zbekiston Respublikasi “Axborot xavfsizligi to‘g‘risida”gi Qonuni, 2019-yil.*
5. *“O‘zbekiston 2030” strategiyasi. (2023). <https://strategy.gov.uz>*
6. *Karimova N. (2023). Kriptoaktivlar bozorini huquqiy tartibga solish: xalqaro tajriba va O‘zbekiston amaliyoti. // “Yuridik fanlar” jurnali.*
7. *Axmedov S. (2023). Kriptoaktivlar va raqamli moliya xavfsizligi. // “Axborot texnologiyalari” ilmiy jurnali.*
8. *Financial Action Task Force (FATF). The FATF Recommendations: International Standards on Combating Money Laundering and the Financing of Terrorism & Proliferation. As amended October 2025.*
9. *Regulation (EU) 2023/1114 of the European Parliament and of the Council of 31 May 2023 on markets in crypto-assets (MiCA). Official Journal of the European Union, L 150, 9.6.2023.*
10. *TRM Labs. Blockchain Forensics for Law Enforcement.*
11. *FATF. (2021). Updated Guidance for a Risk-Based Approach to Virtual Assets and Virtual Asset Service Providers. <https://www.fatf-gafi.org>.*
12. *Nakamoto S. (2008). Bitcoin: A Peer-to-Peer Electronic Cash System. <https://bitcoin.org/bitcoin.pdf>.*

13. Tapscott D., & Tapscott A. (2016). *Blockchain Revolution: How the Technology Behind Bitcoin Is Changing Money, Business, and the World*. Penguin Publishing.
14. Catalini C., & Gans J. S. (2016). *Some Simple Economics of the Blockchain*. MIT Sloan Research Paper No. 5191-16.
15. Böhme R., Christin N., Edelman B., & Moore T. (2015). *Bitcoin: Economics, Technology, and Governance*. *Journal of Economic Perspectives*, 29(2), 213–238.
16. UNODC. (2020). *Cryptocurrencies and the Dark Web: Challenges for Law Enforcement*. <https://www.unodc.org>.

KETMA-KET CHIZIQLI VA NOLIYNIY FILTRLASHGA ASOSLANGAN GIBRID O‘LCHAMLARNI QISQARTIRISH MODELNING STATISTIK TAHLILI

Xasanov Adxamjon Akramovich,
University of Business and Science
Innovatsion texnologiyalar kafedrası dotsenti, PhD
adhamjon1081@gmail.com
Xamrayev Xurshidbek Komiljon o‘g‘li,
University of Business and Science
Innovatsion texnologiyalar kafedrası o‘qituvchisi
xamrayevbek96@gmail.com
Abdujalilov Javlonbek Alisher o‘g‘li,
University of Business and Science magistranti
javlonbeka806@gmail.com

Annotatsiya. Yuqori o‘lchamli va murakkab noliyniy strukturaga ega ma‘lumotlar fazosini ixchamlashtirish maqsadida ikki bosqichli gibrid model taklif etilgan. Ishda asosiy komponentlar tahlili (Principal Component Analysis – PCA) va chuqur avtokoder (Autoencoder – AE) usullarining birgalikdagi qo‘llanilishi axborot bo‘g‘izi (Information Bottleneck) nazariyasi asosida o‘rganilgan. Modelning ishonchliligi noliyniy manifoldlarga ega sun‘iy ma‘lumotlar to‘plamida o‘nta mustaqil takroriy sinov orqali tekshirildi. Olingan statistik natijalar ($p < 0.05$) PCA yordamida dastlabki tayyorgarlik ko‘rish va chuqur avtokoderning birgalikdagi arxitekturasi rekonstruksiya xatosini (MSE) kamaytirish bilan birga, o‘qitish muddatini sezilarli qisqartirishini ko‘rsatadi.

Kalit so‘zlar: o‘lchamni qisqartirish, asosiy komponentlar tahlili, avtokoder, yashirin fazo, statistik isbot, ablatsiya tahlili, o‘rtacha kvadratik xato, manifold ta‘limi, axborot bo‘g‘izi.

STATISTICAL ANALYSIS OF A HYBRID DIMENSIONALITY REDUCTION MODEL BASED ON SEQUENTIAL LINEAR AND NONLINEAR FILTERING

Abstract. To achieve compact representation of high-dimensional data with complex nonlinear structures, a two-stage hybrid model is proposed. The study investigates the combined application of Principal Component Analysis (PCA) and a deep Autoencoder (AE) within the framework of Information Bottleneck theory. The reliability of the model is evaluated on a synthetic dataset with nonlinear manifolds through ten independent repeated experiments. The obtained statistical results ($p < 0.05$) demonstrate that preliminary preprocessing using PCA combined with a deep autoencoder architecture reduces reconstruction error (MSE) while significantly shortening training time.

Keywords: dimensionality reduction, principal component analysis, autoencoder, latent space, statistical validation, ablation analysis, mean squared error, manifold learning, information bottleneck.

СТАТИСТИЧЕСКИЙ АНАЛИЗ ГИБРИДНОЙ МОДЕЛИ СНИЖЕНИЯ РАЗМЕРНОСТИ НА ОСНОВЕ ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОЙ ЛИНЕЙНОЙ И НЕЛИНЕЙНОЙ ФИЛЬТРАЦИИ

Аннотация. С целью компактного представления высокоразмерных данных со сложной нелинейной структурой предложена двухэтапная гибридная модель. В работе исследуется совместное применение метода главных компонент (PCA) и глубокого автокодировщика (Autoencoder, AE) в рамках теории информационного узкого места (Information Bottleneck). Надёжность модели проверена на синтетическом наборе данных с нелинейными многообразиями посредством десяти независимых повторных экспериментов. Полученные статистические результаты ($p < 0.05$) показывают, что предварительная обработка с использованием PCA в сочетании с архитектурой глубокого автокодировщика снижает ошибку реконструкции (MSE), а также существенно сокращает время обучения.

Ключевые слова: снижение размерности, метод главных компонент, автокодировщик, латентное пространство, статистическая валидация, абляционный анализ, среднеквадратичная ошибка, обучение на многообразиях, информационное узкое место.

Kirish. Katta hajmli ma'lumotlarni tahlil qilishda o'lichamlar sonining ortib borishi ikkita asosiy muammoni keltirib chiqaradi: hisoblash xarajatlarining keskin oshishi va shovqin ta'sirida asosiy qonuniyatlarning yashirin qolishi. Chiziqli usullar, jumladan, PCA global dispersiyani saqlab qolishda ishonchli vosita bo'lsa-da, ma'lumotlar ichidagi murakkab noliyniy bog'lanishlarni to'liq aks ettira olmaydi. Aksincha, neyron tarmoqlariga asoslangan avtokoderlar noliyniy akslantirishlarni yuqori aniqlikda modellashtirishga qodir, biroq ular o'ta katta kirish o'lichamlarida beqaror ishlaydi va hisoblash nuqtayi nazaridan ancha og'ir hisoblanadi.

Mazkur ishda yuqoridagi kamchiliklarni bartaraf etish uchun ikki bosqichli axborot ajratib olish strategiyasi taklif qilinadi. Asosiy faraz shundan iboratki, dastlabki bosqichda chiziqli korrelyatsiyalar olib tashlansa, ikkinchi bosqichda avtokoder yashirin fazoni ancha barqaror va tez optimallashtirish imkoniga ega bo'ladi.

Metodlar. Tadqiqotda 100 ta belgidan iborat ($d=100$) va murakkab noliyniy spiral (Swiss Roll) ko'rinishidagi 5000 ta namunadan tashkil topgan sun'iy ma'lumotlar to'plamidan foydalanildi. To'plam o'qitish va test qismlariga 80/20 nisbatda ajratildi. Kirish fazosiga nisbatan qo'shimcha noliyniy o'zgartirishlar $X = X^2 + \sin(X)$ qo'llash orqali chiziqli usullar uchun qiyinroq sharoit yaratildi. Barcha belgilar standartlashtirildi (o'rtacha nolga, dispersiya birga tenglashtirildi).

Taklif etilgan model quyidagi ketma-ket bosqichlardan iborat:

Birinchi bosqich – chiziqli filtr (PCA):

$$Z_{pca} = W_k^T (X - \mu)$$

Bu yerda W_k – kovariatsiya matritsasining k ta eng katta xos vektorlaridan tashkil topgan ortogonal matritsa. Dastlabki tajribalarda $k = 3$ qiymati tanlandi, chunki u keyingi avtokoder bosqichi uchun yetarli axborotni saqlab qolgan holda shovqinni kamaytirish imkonini beradi.

Ikkinchi bosqich – noliyniy akslantirish (chuqur avtokoder):

$$Z_{latent} = f_{\theta}(Z_{pca}) = \sigma(W_e Z_{latent} + b_e)$$

$$\hat{X} = g_{\phi}(Z_{latent}) = \sigma(W_d Z_{latent} + b_d)$$

Bu yerda f_{θ} kodlovchi (encoder), g_{ϕ} esa dekodlovchi (decoder) funksiyalar bo'lib, σ – LeakyReLU noliyniy aktivatsiya funksiyasi. Avtokoder tuzilishi uch qatlamdan iborat (64–32–16 neyron). Optimallashtirish jarayonida quyidagi xatolik funksiyasi minimallashtirildi:

$$L(X, \hat{X}) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \|X_i - \hat{X}_i\|^2 + \lambda \sum_j w_j^2$$

Birinchi qism o'rtacha kvadratik xatolikni (MSE), ikkinchi qism esa L_2 regulyarizatsiyasini ifodalaydi. Har bir komponentning alohida hissasini baholash maqsadida uchta model taqqoslandi:

- **M1 (Asosiy PCA):** Faqat chiziqli qisqartirish.

- **M2 (Standart AE):** To'g'ridan-to'g'ri kirish ma'lumotlari ustida o'qitilgan avtokoder.

- **M3 (Taklif etilayotgan gibrid model):** PCA yordamida dastlabki filtratsiya qilingan ma'lumotlarda o'qitilgan avtokoder.

Har bir model uchun o'qitish jarayoni 10 marta avtomatik takrorlandi (turli xil boshlang'ich vazn koeffitsiyentlari bilan). Natijalarning barqarorligi o'rtacha qiymat va standart chetlanish (\pm std) orqali ifodalangan. Modellar orasidagi farqning statistik ahamiyatligi juft t-test yordamida tekshirildi, ahamiyatlilik darajasi $\alpha = 0.05$ etib belgilandi.

Natijalar. O'nta mustaqil sinov natijalari 1-jadvalda keltirilgan.

1-jadval. Uch model bo'yicha taqqoslash statistikasi (10 marta takrorlangan sinov asosida olingan)

Ko'rsatkich	M1 (Faqat PCA)	M2 (Faqat AE)	M3 (Gibrid PCA+AE)
MSE (O'rtacha \pm Std)	0.2048 \pm 0.000	0.0512 \pm 0.008	0.0300 \pm 0.002
Determinatsiya koeffitsiyenti (R^2)	0.9336	0.9488	0.9937
O'qitish vaqti (sekund)	0.45	142.12	24.56

Gibrid model (M3) faqat avtokoderdan iborat modelga (M2) nisbatan o'rtacha kvadratik xatolikni taxminan **41%** ga qisqartirgan va o'qitish jarayonini **5.8 baravar** tezlashtirgan. Shuningdek, gibrid modelning R^2 koeffitsiyenti (0.9937) faqat PCA modeliga (0.9336) nisbatan sezilarli darajada yuqori bo'lib, aniqlikda

6.01% farqni ko'rsatdi. Standart chetlanishning kichikligi (0.002) gibrid modelning turli boshlang'ich sharoitlarda ham barqaror ishlashidan dalolat beradi.

M2 va M3 modellarining xatolik qiymatlari o'rtasidagi farqni baholash uchun o'tkazilgan t-test quyidagi natijani ko'rsatdi: $t=4.93$, $p = 0.0002$, $p < 0.001$ ekanligi gibrid model ustunligining statistik jihatdan yuqori darajada ishonchli ekanligini tasdiqlaydi.

Vizuallashtirilgan quti diagrammasi (boxplot) tahlili gibrid model xatoligining tarqalishi standart avtokoder modelinikiga qaraganda taxminan to'rt barobar kamroq ekanligini ko'rsatdi. Bu modelning turli xil kirish o'zgarishlariga nisbatan bardoshli ekanligini anglatadi.

Munozara. Gibrid modelning yuqori samaradorligi bir necha omillar bilan izohlanadi. Birinchi bosqichda qo'llaniladigan PCA kirish fazosidagi ortiqcha o'zaro korrelyatsiyalarni (multikollinearlikni) bartaraf etadi. Bu esa ikkinchi bosqichdagi avtokoderning optimallashtirish landshaftini soddalashtiradi. Neyron tarmog'i endi shovqinli yuqori o'lchamli fazodan emas, balki axborot zichroq bo'lgan kichikroq fazodan ish boshlaydi. Natijada gradient tushishi jarayonida lokal minimumlardan chetlab o'tish va global optimumga tezroq yaqinlashish imkoniyati ortadi.

$R^2 = 0.9937$ qiymati modelning yashirin strukturadagi dispersiyaning deyarli barcha qismini tiklashi mumkinligini bildiradi. O'qitish vaqtining sezilarli qisqarishi esa ushbu yondashuvning real vaqt rejimida ishlovchi tizimlar uchun qulay ekanligini ko'rsatadi.

Tadqiqotning cheklovlari sifatida sinovlarning faqat sun'iy ma'lumotlar to'plamida o'tkazilganligini qayd etish lozim. Kelgusida turli sohalarga oid haqiqiy ma'lumotlar (tibbiy tasvirlar, moliyaviy ko'rsatkichlar va boshqalar) ustida qo'shimcha tajribalar o'tkazish rejalashtirilgan.

Xulosa. Mazkur ishda yuqori o'lchamli noliyniy ma'lumotlarni qisqartirish uchun ketma-ket chiziqli va noliyniy filtrlar asosida ishlovchi gibrid model taklif etildi. Olingan natijalar ushbu modelning an'anaviy usullarga nisbatan statistik jihatdan ishonchli ustunlikka ega ekanligini ko'rsatdi. 0.9937 ga teng determinatsiya koeffitsiyenti va $p = 0.0002$ darajasidagi statistik isbot modelning samaradorligini tasdiqlaydi. Ushbu metodikani murakkab tizimlarning diagnostikasi va prognozida amaliy vosita sifatida qo'llash maqsadga muvofiqdir.

ADABIYOTLAR:

1. Goodfellow, I., Bengio, Y., & Courville, A. (2016). *Deep Learning*. MIT Press.
2. Jolliffe, I. T. (2002). *Principal Component Analysis (2nd ed.)*. Springer-Verlag.
3. Hinton, G. E., & Salakhutdinov, R. R. (2006). *Reducing the Dimensionality of Data with Neural Networks*. *Science*, 313(5786), 504–507.
4. Van der Maaten, L., & Hinton, G. (2008). *Visualizing Data using t-SNE*. *Journal of Machine Learning Research*, 9(11), 2579–2605.
5. Kingma, D. P., & Welling, M. (2014). *Auto-Encoding Variational Bayes*. *International Conference on Learning Representations (ICLR)*.

**QALQONSIMON BEZ HUJAYRALARI REGULYATOR MEXANIZMLARINI
MATEMATIK VA KOMPYUTER MODELLASHTIRISH**

Xasanov Adxamjon Akramovich

University of Business and Science

Innovatsion texnologiyalar kafedراسi dotsenti, PhD

adhamjon1081@gmail.com

Satimova Shoxsanam Sherzodbek qizi,

University of Business and Science magistranti

shoxsanamshavkatova7@gmail.com

Annotatsiya. Ushbu maqola qalqonsimon bez faoliyatini matematik modellashtirish usullari yordamida olib borilgan tadqiqot ishlarini tahlil qilishga bag'ishlangan. Maqolada qalqonsimon bez dinamikasini matematik modellashtirishning turli usullari haqida qisqacha ma'lumot berilgan. Ko'pgina mualliflar qalqonsimon bez dinamikasini matematik modellashtirishni ko'rsatganlar. Qalqonsimon bez hujayralarini tartibga solish regulyatorini matematik modellashtirish va matematik model asosida Runge-Kutta usuli yordamida kompyuter modeli. Kompyuter modeli yordamida o'tkazilgan eksperimental tajribalar asosida qalqonsimon bez hujayralarining tartibga solish mexanizmlari dinamikasining xarakterli rejimlari tahlil qilindi.

Kalit so'zlar: tartibga solish, sifat va miqdoriy tahlil, matematik va kompyuter modellari, funksional-differensial tenglamalar, vaqt kechikishi, hujayra jamoalarining funksional birligi, follikula, kaos.

**МАТЕМАТИЧЕСКОЕ И КОМПЬЮТЕРНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РЕГУЛЯТОРНЫХ
МЕХАНИЗМОВ КЛЕТОК ЩИТОВИДНОЙ ЖЕЛЕЗЫ**

Аннотация. Данная статья посвящена анализу исследовательских работ, проведенных с использованием методов математического моделирования активности щитовидной железы. В статье представлен краткий обзор различных методов математического моделирования динамики щитовидной железы. Большинство авторов указали на математическое моделирование динамики щитовидной железы. Математическое моделирование регулятора регуляции клеток щитовидной железы и компьютерная модель с использованием метода Рунге-Кутты на основе математической модели. На основе экспериментальных исследований с использованием компьютерной модели были проанализированы характерные режимы динамики регуляторных механизмов клеток щитовидной железы.

Ключевые слова: регуляторный, качественный и количественный анализ, математические и компьютерные модели, функционально-дифференциальные уравнения, временная задержка, функциональная единица клеточных сообществ, фолликул, хаос, черная дыра.

**MATHEMATICAL AND COMPUTER MODELING OF REGULATORY MECHANISMS OF
THYROID GLAND CELLS**

Abstract. This article is devoted to the analysis of research work conducted using methods of mathematical modeling of the activity of the thyroid gland. The article gives a brief review of various methods of mathematical modeling of the dynamics of the thyroid gland. Most authors have indicated a mathematical modeling of the dynamics of the thyroid gland. Mathematical modeling of regulator of regulation of thyroid gland cells and computer model using Runge-Kutta method on the basis of mathematical model. Based on experimental experiments using a computer model, characteristic regimes of the dynamics of the regulatory mechanisms of the thyroid gland cells were analyzed.

Keywords: regulatory, qualitative and quantitative analysis, mathematical and computer models, functional-differential equations, time delay, functional unit of cellular communities, follicle, chaos.

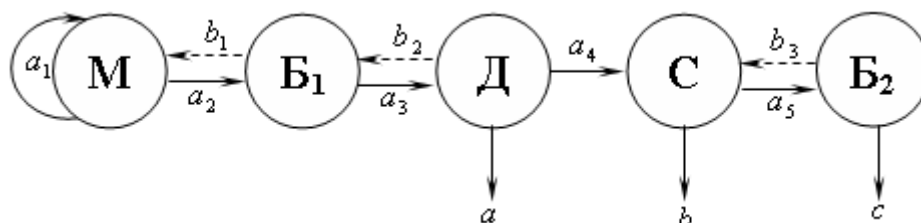
Qalqonsimon bez tirik organizm moddalar almashunivini hamda gomeostaz holatini ushlab turuvchi bir qator garmonlarni (tiroksin, triyodtironin) ishlab chiqaruvchi asosiy ichki sekresiya bezlaridan biridir.

Jahon sog'liqni saqlash tashkilotining malumotiga kura, er yuzida 2 milliardga yaqin kishi yod tanqis hududlarda istiqomat qiladi. Shulardan 700 millionga yaqini endemik bo'qoq va ruhiy o'zgarishlardan azob chekmoqda, 50 million kishi esa aynan yod etishmasligi sababli aqlan zaif bo'lib qolmoqda. Yana shuni aytish joizki, oxirgi 20 yil ichida qalqonsimon bez rak kasalligi 2 barobar oshgan [1].

Qalqonsimon bezning tarkibiy va funksional birligi follikuladan iborat bo'lib, uning ko'rinishi dumaloq yoki oval shaklida bo'ladi. Yangi paydo bo'lgan yosh follikula diametri 60-70 mkm, voyaga etganlarida esa 250 mkm gacha bo'ladi [2,3]. Follikula epiteliy hujayralardan tashkil topgan va qalqonsimon bezning asosiy garmonlarini paydo bo'lishida aktiv ishtirok etadi. Qalqonsimon bez follikul hujayralarining hayotiy faoliyati bo'linuvchi, o'suvchi, tabaqalanuvchi, garmonlar hosil bo'lishi bilan bog'liq spesifik funksiya bajaruvchi va qaruvchi fazalardan o'tadi.

Qalqonsimon bez follikul hujayralari regulyatorikasi boshqaruv mexanizmlarini matematik modellashtirishda *hujayralar to'plami funksional birligi* – HTFB [4] regulyatorikasini modellashtirish usulidan foydalanamiz. Yaratilgan matematik model asosida kompyuterda hisobiy tajribalar uchun dasturiy ta'minot ishlab chiqish mumkin. Qalqonsimon bez follikul hujayralar soni regulyatorikasini modellashtiruvchi dasturiy ta'minot follikul tizimning ishlash qonuniyatlarini hisobiy tahlil qilish va turli xil kasalliklar paydo bo'lishi mexanizmlarini aniqlash imkonini beradi.

HTFB o'zaro bog'liq bo'lgan bir xil gruppalar ya'ni, bo'linuvchi (M), o'suvchi (B₁), tabaqalanuvchi (D), spesifik funksiya bajaruvchi (S₁, S₂,...,S_n) va qaruvchi (B₂) hujayralardan iborat [4]. HTFB bo'yicha qalqonsimon bez follikul hujayralari o'zaro aloqasini sxemasi tuzilishi mumkin (1 – rasm). Ushbu rasmdan ko'rinib turibdiki, follikul hujayralari, rivojlanish davrida, ketma-ket M, B₁, D, S, B₂ fazalarida bo'lishi kerak.



1 – rasm. Qalqonsimon bez follikul hujayralari o'zaro aloqasi sxemasi (a_i ($i = 1, 2, \dots, 5$), b_j ($j = 1, 2, 3$) – hujayralarning fazadan fazaga o'tish parametrlari; a, b, c – hujayralarning tabiiy nobud bo'lishi parametrlari)

Bo'linuvchi, o'suvchi, tabaqalanuvchi, spesifik funksiya bajaruvchi va qaruvchi hujayralar sonini t vaqt momentida $X_i(t)$ ($i = 1, 2, \dots, 5$) orqali ifodalab, follikula gruppasidagi hujayralar soni o'zgarishini miqdoriy ifodalash uchun tenglama tuzamiz. HTFB regulyatorikasi tenglamalarini tuzish [4–6] va gudvin tipida modellashtirish uslublari asosida quyidagi funksional-differensial tenglamani yozishimiz mumkin:

$$\frac{dX_1(t)}{dt} = \frac{a_1 X_1(t-1) X_4(t-1)}{1 + \prod_{j=1}^5 X_j(t-1)} + b_1 X_2(t-1) - a_2 X_1(t). \quad (1)$$

Follikul hujayralarining qolgan fazalardagi miqdorini aniqlash uchun hujayralarning fazadan fazaga o'tishini hamda D, S, B₂ fazalardagi hujayralarning tabiiy nobud bo'lishini hisobga olish kerak. Shunda, follikul hujayralari soni regulyatorikasi uchun quyidagi funksional-differensial tenglamalarni yozishimiz mumkin:

$$\begin{aligned} \frac{dX_1(t)}{dt} &= \frac{a_1 X_1(t-1) X_4(t-1)}{1 + \prod_{j=1}^5 X_j(t-1)} + b_1 X_2(t-1) - a_2 X_1(t); \\ \frac{dX_2(t)}{dt} &= a_2 X_1(t) - (b_1 + a_3) X_2(t); \\ \frac{dX_3(t)}{dt} &= a_3 X_2(t) - (b_2 + a_4 + a) X_3(t); \\ \frac{dX_4(t)}{dt} &= a_4 X_3(t) + b_3 X_5(t) - (a_5 + b) X_4(t); \\ \frac{dX_5(t)}{dt} &= a_5 X_4(t) - (b_3 + c) X_5(t). \end{aligned} \quad (2)$$

Ushbu (2) tenglamalar yopiq funksional-differensial tenglamalar tizimini tashkil etadi. Keltirilgan tenglamalar yechimini boshlang'ich funksiya asosida Bellman-Kuk [7] ketma-ket integrallash usulidan foydalanib RS da olish mumkin.

Ko'rilayotgan tenglamalar tizimi murakkab (nochiziqli funksional-differensial) bo'lgani uchun, sifatiy tahlil usullari orqali uning yechimlari xususiyatlarini aniqlash mumkin. (2) tenglamalar tizimini sifatiy tahlil qilish uchun muvozanat nuqtalarini: X_{i0} ($i = 1, 2, \dots, 5$) ($X_{i0} = const$) topamiz

$$\begin{aligned} \frac{a_1 X_{10} X_{40}}{1 + X_{10} X_{20} X_{30} X_{40} X_{50}} + b_1 X_{20} - a_2 X_{10} &= 0; \\ a_2 X_{10} - (b_1 + a_3) X_{20} &= 0; \\ a_3 X_{20} - (b_2 + a_4 + a) X_{30} &= 0; \\ a_4 X_{30} + b_3 X_{50} - (a_5 + b) X_{40} &= 0; \\ a_5 X_{40} - (b_3 + c) X_{50} &= 0. \end{aligned} \quad (3)$$

Ushbu (3) tizimda X_{i0} ni X_{i+10} ($i = 4, 3, 2, 1$) orqali ketma-ket ifodalab X_{10} uchun quyidagi tenglamani yozish mumkin

$$\begin{aligned} &\frac{\frac{a_1 a_2 a_3 a_4}{\left((a_5 + b) - \frac{a_5 b_3}{(b_3 + c)} \right) (b_2 + a_4 + a) (b_1 + a_3)} X_{10}^2}{1 + \frac{a_2^2 a_3^2 a_4^2 a_5}{(b_1 + a_3)(b_2 + a_4 + a)(b_1 + a_3) \left((a_5 + b) - \frac{a_5 b_3}{(b_3 + c)} \right) (b_2 + a_4 + a)(b_1 + a_3)(b_3 + c) \left((a_5 + b) - \frac{a_5 b_3}{(b_3 + c)} \right) (b_2 + a_4 + a)(b_1 + a_3)} X_{10}^5} = \\ &= \left(a_2 - \frac{a_2 b_1}{(b_1 + a_3)} \right) X_{10}. \end{aligned} \quad (4)$$

Agar (4) tenglamada quyidagi belgilash kiritsak

$$X_0 = \frac{a_2^4 a_3^3 a_4^2 a_5}{(b_1 + a_3)(b_2 + a_4 + a)(b_1 + a_3) \left((a_5 + b) - \frac{a_5 b_3}{(b_3 + c)} \right) (b_2 + a_4 + a)(b_1 + a_3)(b_3 + c) \left((a_5 + b) - \frac{a_5 b_3}{(b_3 + c)} \right) (b_2 + a_4 + a)(b_1 + a_3)} X_{10}^5$$

X_0 uchun ushbu tenglamaga kelamiz:

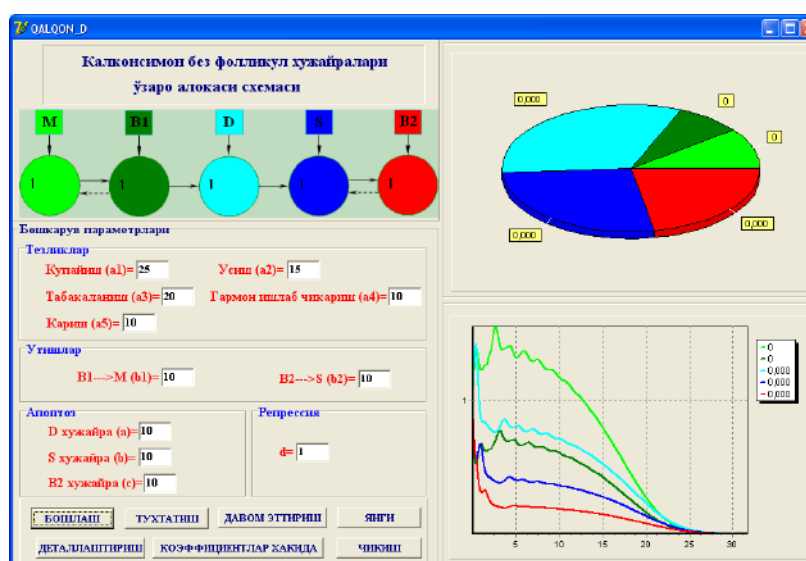
$$\frac{a X_0^2}{1 + X_0^5} = X_0, \quad (5)$$

bu yerda

$$a = \sqrt{\frac{aa_3^2 a_4^3 (b_1 + a_3)^4 ((a + b) - \frac{a_5 b_3}{b_3 + c})^2}{a_5 (a_5 c + b b_3 + b c)^5 (b_2 + a_4 + a)^2 (b_1 + a_3 - b_2)^5 (b_3 + c)^4}}$$

Qalqonsimon bez follikulasi hujayralari soni regulyatorikasini modellashtirish uchun kompyuter dastur ishlab chiqildi. 3 – rasmda kompyuter dasturda ishlatilgan parametrlar, ishchi display ko’rinishi va hisobiy tajribalarda olingan natijalardan biri keltirilgan.

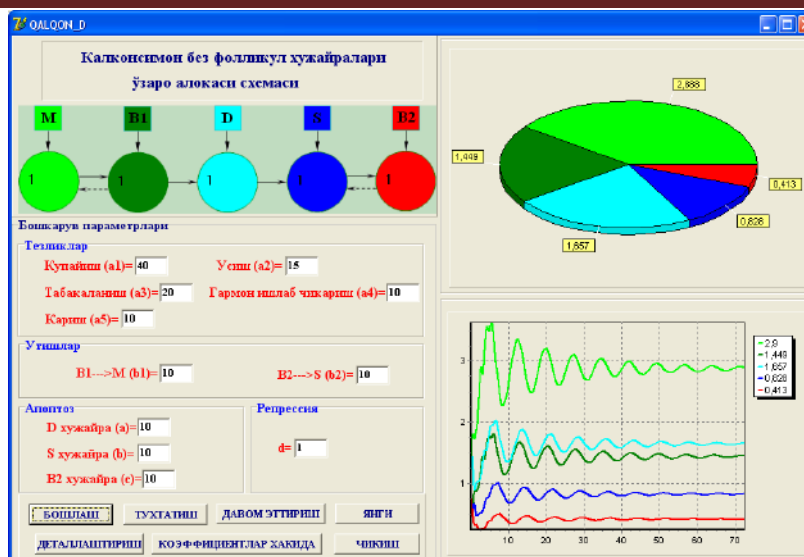
Kiritilgan parametrlar					
Dastlabki hujauralar soni	Bo’linuvchi	1	Tezliklar	Kurayish (a1)	25
	O’suvchi	1		O’sish (a2)	15
	Tabaqalanuvchi	1		Tabaqalanish (a3)	20
	Garmon ishlab chiqaruvchi	1		Garmon ishlab chiqarish (4)	10
	Qaruvchi	1		Qarish (a5)	10
Utishlar	B1→M(b1)	10	Arortoz	D hujayra (a)	10
	B2→S(b2)	10		S hujayra (b)	10
			Repressiya	B2 hujayra (s)	10
				d	1



3 – rasm. Qalqonsimon bez follikulasi faoliyatining (hujayralar soni) so’nish holati

Ushbu natijadan (3 – rasm) ko’rinib turibdiki, qalqonsimon bez follikulasi hujayralari soni avval tartibsiz uzgarib, sungra shiddat bilan kamayadi. Demak follikul faoliyati boshqaruvi buziladi va uning uchun shiddatli halokat yuz beradi. Bu follikulning anomal holatiga (zararli usimta) olib kelishi, organizmda qalqonsimon bez garmonlarining keskin pasayishiga sabab bulishi mumkin.

Qalqonsimon bez follikulasi hujayralari soni regulyatorikasini modellashtiruvchi kompyuter dastur orqali o’tkazilgan hisobiy tajribalar follikula faoliyatida stasionar va tebranma holatlar mavjudligini ko’rsatdi (4,5 – rasmlar)



4 – rasm. Qalqonsimon bez follikulasi faoliyatining turg'un stasionar holati

Hisobiy tajriba ko'rsatishicha, stasionar holatda qalqonsimon bez follikulasi hujayralari soni turg'un bir qiymatga keladi (4 – rasm). Ushbu holat follikulning normal holatini ifodalaydi.

Ishlab chiqilgan matematik va kompyuter modellar qalqonsimon bez follikul hujayralari to'plamining normal va anomal dinamikasi qonuniyatlarini, zararli o'simta paydo bo'lishi mexanizmlarini hamda qalqonsimon bez follikul hujayralar regulyatorikasini boshqarish mexanizmini miqdoriy tadqiq qilishda qo'llanishi mumkin.

ADABIYOTLAR:

1. <http://www.who.int/ru/>, <http://thyromed.com/urgency.php>
2. Кубарко А.И., Yamashita S. Щитовидная железа. Фундаментальные аспекты. Минский медицинский институт, Медицинская школа Университета г. Нагасаки, Минск - Нагасаки 1998. 376 с.
3. Bernier-Valentin F., Trouttet-Masson S., Rabilloud R., Selmi-Ruby S., Rousset B. Three-dimensional organization of thyroid cells into follicle structures is a pivotal factor in the control of sodium/iodide symporter expression. // *Endocrinology*. 2006. V.147(4). P.2035-2042.
4. Saidaliev M. *Mathematical and Computer Modelling Regulatorika of Organisms Cellular Communities at Anomalies* // *Scientiae Mathematicae Japonicae*, 2008. Vol. 67. No 2. P. 161-171.
5. Гильдиева М.С., Сайдалиева М., Хасанов А.А. Моделирование динамики численности клеток фолликула щитовидной железы. // Доклады Республиканской научно – технической конференции, «Современное состояние и перспективы развития информационных технологий», 5-6 сентябрь, Ташкент 2011, том II, С. 69-74.
6. Сайдалиева М., Хасанов А.А. Математическое моделирование регуляторики численности клеток фолликула щитовидной железы // *Вопросы вычислительной и прикладной математики*. Ташкент, 2010. Вып. 125. С. 131-142.
7. Bellman R., Cooke K. *Differential Difference Equations*. Academic Press. 1963. 548 p.
8. Гласс Л., Мэки М. *От часов к хаосу. Ритмы жизни*. М.: Мир, 1991, С. 107.
9. Hidirov B.N., Saidaliev M. *Chaos research in autonomous regulating systems* // *Proceedings of the WCIS - 2000. Tashkent. (2000)*. - P. 138 – 140.

O‘ZBEKISTONDA METROLOGIYA SOHASINING XALQARO TASHKILOTLAR BILAN INTEGRATSIYASI: HOZIRGI HOLAT VA ISTIQBOLLAR

Odilova Mohigul G‘olibjon qizi,

*Qarshi davlat texnika universiteti Shahrisabz
oziq-ovqat muhandisligi fakulteti assistenti, mustaqil-tadqiqotchisi
odilovamohigul56@gmail.com*

Annotatsiya. Ushbu maqolada O‘zbekiston Respublikasining metrologiya sohasida xalqaro tashkilotlar bilan integratsiya jarayoni, uning hozirgi holati hamda istiqbolli yo‘nalishlari tahlil qilingan. BIPM, OIML, COOMET, ISO hamda ILAC/IAF tizimlari bilan hamkorlikning rivojlanishi, milliy metrologiya infratuzilmasining modernizatsiyasi va xalqaro tan olinuvchanlikni oshirishga qaratilgan islohotlar yoritilgan. Shuningdek, raqamli metrologiya, laboratoriyalar akkreditatsiyasi va SI birliklar tizimiga moslashuv jarayonlari ilmiy jihatdan tahlil qilingan.

Kalit so‘zlar: integratsiya, xalqaro tashkilotlar, Metrologiya, BIPM, OIML, COOMET, ISO, ILAC, IAF, SI tizimi, milliy etalon, kalibrlash, sertifikatlashtirish, laboratoriya akkreditatsiyasi, Texnik tartibga solish agentligi.

ИНТЕГРАЦИЯ СФЕРЫ МЕТРОЛОГИИ В УЗБЕКИСТАНЕ С МЕЖДУНАРОДНЫМИ ОРГАНИЗАЦИЯМИ: СОВРЕМЕННОЕ СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ

Аннотация. В данной статье анализируется процесс интеграции Республики Узбекистан в сфере метрологии с международными организациями, а также его текущее состояние и перспективные направления развития. Рассматривается развитие сотрудничества с такими организациями, как BIPM, OIML, COOMET, ISO и системами ILAC/IAF, модернизация национальной метрологической инфраструктуры и реформы, направленные на повышение международной признанности. Также проводится научный анализ процессов цифровизации метрологии, аккредитации лабораторий и адаптации к системе единиц SI.

Ключевые слова: метрология, интеграция, международные организации, BIPM, OIML, COOMET, ISO, ILAC, IAF, система SI, национальный эталон, калибровка, сертификация, аккредитация лабораторий, Агентство по техническому регулированию.

INTEGRATION OF METROLOGY IN UZBEKISTAN WITH INTERNATIONAL ORGANIZATIONS: CURRENT STATE AND PROSPECTS

Abstract. This article analyzes the process of integrating the metrology sector of the Republic of Uzbekistan with international organizations, as well as its current status and future development prospects. It examines the development of cooperation with organizations such as BIPM, OIML, COOMET, ISO, and the ILAC/IAF systems, the modernization of national metrology infrastructure, and reforms aimed at increasing international recognition. The study also provides a scientific analysis of digital metrology, laboratory accreditation, and the adaptation to the International System of Units (SI).

Keywords: metrology, integration, international organizations, BIPM, OIML, COOMET, ISO, ILAC, IAF, SI system, national standard, calibration, certification, laboratory accreditation, Agency for Technical Regulation.

Kirish. Globallashuv sharoitida metrologiya iqtisodiy, ilmiy-texnik va innovatsion taraqqiyotning asosiy infratuzilmaviy tayanchlaridan biri sifatida shakllanmoqda. Zamonaviy ishlab chiqarish jarayonlari, yuqori texnologiyalar, raqamli iqtisodiyot hamda xalqaro savdo tizimlarining samarali ishlashi o‘lchashlarning aniqligi, ishonchliligi va yagona standartlarga mosligiga bevosita bog‘liqdir. Shu sababli metrologiya nafaqat texnik soha, balki global iqtisodiy integratsiyaning strategik elementi sifatida ham qaralmoqda.

Bugungi kunda xalqaro savdo munosabatlarida “o‘lchovlarning ishonchliligi” (traceability) tamoyili asosiy talabga aylangan. Bu esa mahsulot sifati va xavfsizligini ta‘minlashda metrologik tizimlarning rolini yanada oshirmoqda. Xususan, sanoat ishlab chiqarishida, farmatsevtika, energetika, oziq-ovqat xavfsizligi va

ekologik monitoring sohasida aniq o'lchash natijalari muhim qarorlar qabul qilish uchun asos bo'lib xizmat qiladi.

O'zbekiston Respublikasida metrologiya tizimini xalqaro standartlarga moslashtirish va global metrologik tizimga integratsiya qilish davlat siyosatining ustuvor yo'nalishlaridan biri sifatida belgilangan (O'zbekiston Respublikasi Texnik tartibga solish agentligi, 2024; O'zstandart ilmiy hisobotlari, 2023). Bu yo'nalishda amalga oshirilayotgan islohotlar milliy iqtisodiyotning raqobatbardoshligini oshirish, eksport salohiyatini kengaytirish hamda xalqaro bozorlarda texnik to'siqlarni kamaytirishga xizmat qilmoqda.

So'nggi yillarda mamlakatda metrologiya sohasini modernizatsiya qilishga qaratilgan qator institutsional o'zgarishlar amalga oshirildi. Jumladan, milliy etalon bazasini yangilash, zamonaviy kalibrash laboratoriyalarini tashkil etish, o'lchash vositalarini xalqaro talablarga muvofiqlashtirish hamda raqamli metrologiya tizimini joriy etish ishlari izchil olib borilmoqda. "O'zstandart" agentligi va Milliy metrologiya instituti tomonidan olib borilayotgan faoliyat natijasida O'zbekistonning xalqaro metrologik maydondagi o'rni sezilarli darajada mustahkamlandi. Zamonaviy tadqiqotlarda metrologiyaning xalqaro savdo va ilmiy-texnik taraqqiyotdagi o'rni alohida ta'kidlanadi (Milton et al., 2010; Priel & Ehrlich, 2018).

Shuningdek, O'zbekistonning BIPM, OIML, COOMET, ISO hamda ILAC/IAF kabi xalqaro tashkilotlar bilan hamkorligi kengayib bormoqda. Ushbu hamkorlik milliy metrologiya tizimining xalqaro tan olinuvchanligini oshirish, o'lchash natijalarining global miqyosda qabul qilinishini ta'minlash va ilmiy-texnik salohiyatni rivojlantirishda muhim rol o'ynamoqda.

Kelgusida metrologiya sohasida raqamli texnologiyalar, avtomatlashtirilgan o'lchash tizimlari va sun'iy intellekt asosidagi nazorat mexanizmlarini joriy etish istiqbollari O'zbekistonning global metrologik integratsiyasini yanada chuqurlashtirishi kutilmoqda.

Shunga qaramay, milliy metrologiya tizimida xalqaro tan olinuvchanlikni to'liq ta'minlash, zamonaviy raqamli texnologiyalarni keng joriy etish va laboratoriyalar kompetensiyasini oshirish bilan bog'liq qator muammolar saqlanib qolmoqda.

Asosiy qism. Xalqaro metrologik tizimga integratsiyaning nazariy asoslari. Xalqaro metrologik tizimga integratsiya milliy o'lchash tizimlarining global standartlar bilan uyg'unlashuvi jarayonini anglatadi. Ushbu jarayonning asosiy maqsadi o'lchash natijalarining turli davlatlarda bir xil talqin qilinishi va ularning xalqaro miqyosda tan olinishini ta'minlashdan iboratdir. Metrologik integratsiya SI (Xalqaro birliklar tizimi) asosida qurilgan bo'lib, o'lchashlarning izchilligi, ishonchliligi va takrorlanuvchanligini ta'minlaydi. Shu bilan birga, "traceability", ya'ni metrologik kuzatuvchanlik tamoyili har qanday o'lchash natijasining milliy va xalqaro etalonlarga bog'langanligini ifodalaydi. Ushbu nazariy asoslar metrologiya sohasida global hamkorlikni shakllantirishning fundamental poydevorini tashkil etadi. SI birliklar tizimining rivojlanishi va uning ilmiy asoslari fundamental konstantalarga tayanadi hamda zamonaviy metrologiyaning poydevorini tashkil etadi (Milton et al., 2010).

O'zbekistonning BIPM tizimidagi ishtiroki. O'zbekiston Respublikasi Metrik konvensiyasiga a'zo davlat sifatida BIPM (Bureau International des Poids et Mesures) bilan bevosita hamkorlik qiladi. BIPM xalqaro birliklar tizimini boshqaruvchi eng yuqori ilmiy-metrologik tashkilot hisoblanadi. O'zbekistonning ushbu tizimdagi ishtiroki milliy etalonlarning xalqaro darajada uyg'unlashuvini ta'minlashga xizmat qiladi. So'nggi yillarda mamlakatda uzunlik, massa, vaqt, elektr va harorat kabi asosiy o'lchash birliklari bo'yicha milliy etalonlar modernizatsiya qilindi. Natijada o'lchash natijalarining aniqligi oshib, ularning xalqaro tan olinishi uchun zarur shart-sharoitlar yaratildi. Xalqaro birliklar tizimining takomillashuvi va qayta ta'riflanishi global metrologik uyg'unlikni ta'minlashda muhim ahamiyat kasb etadi (De Bièvre, 2009).

Tarixiy burilish: 13-aprel – O'zbekiston metrologiyasi uchun muhim sana!

2025- yil 27 - noyabrda O'zbekiston Respublikasi Prezidenti tomonidan "Xalqaro metrik Konvensiyaga O'zbekiston Respublikasining qo'shilishi to'g'risida"gi Qonun imzolangan edi. Mazkur hujjat O'zbekistonning xalqaro metrologiya tizimiga integratsiyalashuvida muhim huquqiy asos bo'lib xizmat qildi. Ushbu qadam orqali mamlakatimiz 1875- yilda tashkil etilgan nufuzli Xalqaro metrik Konvensiyaning to'laqonli ishtirokchisiga aylanish imkoniyatiga ega bo'ldi.

2026- yil 13- aprel kuni esa ushbu jarayon o'zining mantiqiy yakuniga yetdi – O'zbekiston rasman Xalqaro tarozi va o'lchovlar byurosi (BIPM)ning to'laqonli a'zosi bo'lganligi e'lon qilindi. Bu voqea mamlakatimiz metrologiya sohasi uchun beqiyos ahamiyatga ega bo'lib, xalqaro o'lchov standartlarini shakllantirishda ishtirok etish, BIPM va uning konsultativ qo'mitalari faoliyatida to'laqonli qatnashish, milliy mutaxassislarining xalqaro darajada malaka oshirishi, o'lchashlar birligini xalqaro talablar asosida ta'minlash, mahsulot va xizmatlarning xalqaro bozorda raqobatbardoshligini oshirish, investorlar ishonchini

mustahkamlash va eksport salohiyatini kengaytirish, xalqaro reyting va indekslardagi ko'rsatkichlarni yaxshilashga zamin yaratadi.

Shuningdek, O'zbekiston BIPM CC yig'ilishlarida ishtirok etish, ovoz berish va saylovlarda o'z nomzodlarini ilgari surish huquqiga ega bo'ldi. Konvensiyaga qo'shilish mamlakatimizda aniq, ishonchli va xalqaro talablarga javob beradigan o'lchash tizimini shakllantirishga xizmat qiladi. Bu esa, o'z navbatida, xalqaro hamkorlar, investorlar va tashkilotlarning O'zbekiston mahsulotlari, xizmatlari va sertifikatlariga bo'lgan ishonchini yanada oshiradi.

2026-yil 13-aprel kuni O'zbekistonning BIPMga to'laqonli a'zo sifatida qabul qilinishi milliy metrologiya tizimining xalqaro integratsiyasida muhim bosqich hisoblanadi. Bu nafaqat muhim voqea, balki mamlakatimizning ilmiy-texnik taraqqiyoti va xalqaro maydondagi nufuzini mustahkamlash yo'lidagi katta yutuqdir.

Member States

Member States are States that have ratified or acceded to the Metro Convention and are therefore entitled to fully participate in BIPM activities.

There are currently 65 Member States and 33 Associate States and Economies.

• Argentina	• Hungary	• Portugal
• Australia	• India	• Romania
• Austria	• Indonesia	• Russian Federation
• Belarus	• Iran (Islamic Republic of)	• Saudi Arabia
• Belgium	• Iraq	• Serbia
• Brazil	• Ireland	• Singapore
• Bulgaria	• Israel	• Slovakia
• Canada	• Italy	• Slovenia
• Chile	• Japan	• South Africa
• China	• Kazakhstan	• Spain
• Colombia	• Kenya	• Sweden
• Costa Rica	• Korea (Republic of)	• Switzerland
• Croatia	• Lithuania	• Thailand
• Czechia	• Malaysia	• Tunisia
• Denmark	• Mexico	• Turkey
• Ecuador	• Montenegro	• Ukraine
• Egypt	• Monaco	• United Arab Emirates
• Estonia	• Netherlands	• United Kingdom
• Finland	• New Zealand	• United States of America
• France	• Norway	• Uruguay
• Germany	• Pakistan	• Uzbekistan
• Greece	• Poland	

Member State: Uzbekistan

The Republic of Uzbekistan became a Member State on **16 December 2025** (previously having been an Associate State of the CGPM since 13 July 2018).



CIPM MRA

Signatory/NMI

Uzbek National Institute of Metrology of Uzstandard Agency ROR
• UZNIM
Tashkent

OIML doirasida qonuniy metrologiyaning rivoji. O'zbekiston Xalqaro qonuniy metrologiya tashkiloti (OIML – International Organization of Legal Metrology) faoliyatida ishtirok etib, o'lchash vositalarini tartibga solish tizimini xalqaro talablar asosida rivojlantirmoqda. OIML tavsiyalari asosida o'lchash asboblarning yagona texnik va metrologik talablari ishlab chiqiladi. Bu jarayon savdo, sog'liqni saqlash va sanoat sohalarida qo'llaniladigan o'lchash vositalarining ishonchliligini ta'minlaydi. (O'zbekiston standartlashtirish tizimi bo'yicha qo'llanma, 2022). O'zbekiston amaliyotida OIML talablariga mos sertifikatlashtirish va tekshiruv tizimi joriy etilishi ichki bozor xavfsizligi va xalqaro savdo ishonchliligini oshirishga xizmat qilmoqda.

COOMET mintaqaviy hamkorlik tizimi. COOMET (Euro-Asian Cooperation of National Metrology Institutions) tashkiloti doirasida O'zbekiston mintaqaviy metrologik integratsiyada faol ishtirok etmoqda. Ushbu hamkorlik laboratoriyalararo solishtirishlar, metrologik standartlarni uyg'unlashtirish va o'lchash natijalarining o'zaro tan olinishi kabi yo'nalishlarni qamrab oladi. COOMET tizimi orqali mamlakatlar o'rtasida texnik tajriba almashinuvi amalga oshiriladi va mutaxassislarning malakasi oshiriladi. So'nggi yillarda ushbu platformada raqamli metrologiya va avtomatlashtirilgan o'lchash tizimlarini rivojlantirishga alohida e'tibor qaratilmoqda.

ISO standartlari va sifat menejmenti tizimlari bilan integratsiya. O'zbekiston metrologiya tizimi ISO (International Organization for Standardization) standartlari bilan uyg'unlashgan holda rivojlanmoqda. ISO standartlari metrologiyaning bevosita tashkiloti bo'lmasa-da, sifat boshqaruvi va o'lchash jarayonlarining metodologik asosini tashkil etadi. Xususan, ISO 9001 sifat menejmenti tizimi, ISO/IEC 17025 laboratoriyalar kompetensiyasi va ISO 14000 ekologik boshqaruv tizimi metrologik faoliyatda keng qo'llanilmoqda. Ushbu standartlarning joriy etilishi o'lchash natijalarining aniqligi, shaffofligi va xalqaro darajada tan olinuvchanligini oshiradi.

ILAC va IAF tizimlari orqali laboratoriya akkreditatsiyasi. O'zbekiston laboratoriyalari ILAC (International Laboratory Accreditation Cooperation) va IAF (International Accreditation Forum) tizimlari orqali xalqaro akkreditatsiya jarayonlariga integratsiyalashmoqda. Ushbu tizimlar sinov va kalibrlash laboratoriyalarining natijalarini global miqyosda tan olishni ta'minlaydi. Akkreditatsiya jarayonlari laboratoriya faoliyatining ishonchliligi va sifatini oshiradi, shuningdek, eksport mahsulotlari uchun texnik to'siqlarni kamaytiradi. Bu esa mamlakatning xalqaro savdodagi raqobatbardoshligini mustahkamlashga xizmat qiladi (Priel & Ehrlich, 2018).

Milliy metrologiya tizimining institutsional rivoji. O'zbekiston Respublikasida metrologiya tizimini boshqarish va rivojlantirish O'zbekiston Respublikasi Texnik tartibga solish agentligi hamda Milliy

TECHNIQUE

metrologiya instituti tomonidan amalga oshiriladi (**O‘zbekiston Respublikasi Texnik tartibga solish agentligi, 2024**). Ushbu institutlar milliy etalonlarni modernizatsiya qilish, zamonaviy o‘lchash uskunalari joriy etish va laboratoriyalarni xalqaro talablarga moslashtirish bilan shug‘ullanadi. So‘nggi yillarda metrologik xizmatlarni raqamlashtirish va elektron tizimlarni joriy etish jarayoni ham jadallashmoqda. Bu esa milliy metrologiya tizimini global ilmiy-texnik maydonga yanada yaqinlashtirmoqda.

Rivojlanish istiqbollari. Kelgusida O‘zbekiston metrologiya tizimida raqamli texnologiyalar va innovatsion yondashuvlar asosiy o‘rin egallashi kutilmoqda. Xususan, sun‘iy intellekt asosida o‘lchash nazorati, avtomatlashtirilgan kalibrlash tizimlari va global metrologik ma’lumotlar almashinuvi platformalarini rivojlantirish rejalashtirilmoqda. Shuningdek, SI birliklar tizimiga to‘liq integratsiya va xalqaro kalibrlash tarmoqlarini kengaytirish mamlakatning metrologik salohiyatini yanada oshiradi.

O‘zbekiston Respublikasining metrologiya sohasida xalqaro tashkilotlar bilan integratsiya darajasini yanada aniqroq ifodalash maqsadida quyidagi jadvalda asosiy xalqaro tashkilotlar, ularning hamkorlik shakllari hamda metrologiya tizimidagi ahamiyati keltirilgan.

O‘zbekistonning metrologiya bo‘yicha xalqaro tashkilotlar bilan hamkorligi va a‘zolik holati

1-jadval

№	Xalqaro tashkilot	To‘liq nomi	Hamkorlik turi	Asosiy yo‘nalishlar	Ahamiyati
1	BIPM	Bureau International des Poids et Mesures	Metrik konvensiyasi a‘zosi	SI birliklar tizimi, milliy etalonlarni moslashtirish	O‘lchashlarning xalqaro tan olinishi
2	OIML	International Organization of Legal Metrology	A‘zo davlat	O‘lchash vositalari standartlari, sertifikatlashtirish	Qonuniy metrologiya va savdo ishonchliligi
3	COOMET	Euro-Asian Cooperation of National Metrology Institutions	Faol a‘zo	Mintaqaviy solishtirishlar, laboratoriya hamkorligi	Hududiy metrologik integratsiya
4	ISO	International Organization for Standardization	Milliy a‘zo / texnik qo‘mitalarda ishtirok	Sifat menejmenti, laboratoriya standartlari	Sifat va standartlashtirish tizimi
5	ILAC	International Laboratory Accreditation Cooperation	Hamkor (akkreditatsiya tizimi orqali)	Sinov va kalibrlash natijalarini tan olish	Xalqaro laboratoriya ishonchliligi
6	IAF	International Accreditation Forum	Hamkor	Muvofiqlikni baholash va sertifikatlarni tan olish	Eksport va xalqaro savdo yengilligi
7	SI tizimi (BIPM orqali)	International System of Units	Global tizimga integratsiya	Asosiy o‘lchov birliklari	Universal o‘lchash tizimi

Jadval ma’lumotlaridan ko‘rinib turibdiki, O‘zbekiston metrologiya tizimi bir vaqtning o‘zida ham global (BIPM, OIML, ISO), ham mintaqaviy (COOMET) va ham akkreditatsiya yo‘nalishidagi (ILAC, IAF) tashkilotlar bilan integratsiyalashgan holda rivojlanmoqda. Bu esa mamlakatning metrologik siyosati faqat ichki standartlar bilan cheklanib qolmay, balki xalqaro tan olinuvchanlik tamoyiliga asoslanganini ko‘rsatadi.

Ayniqsa, SI birliklar tizimi bilan to‘liq uyg‘unlashuv va laboratoriya natijalarining xalqaro darajada tan olinishi O‘zbekistonning global iqtisodiy va ilmiy-texnik maydondagi o‘rnini mustahkamlashga xizmat

qilmoqda. Shu nuqtayi nazardan, xalqaro tashkilotlar bilan hamkorlik metrologiya sohasida sifat, aniqlik va ishonchlikni ta'minlovchi asosiy omil sifatida namoyon bo'ladi.

Tahlillar shuni ko'rsatadiki, ayniqsa, BIPM va ILAC tizimlari O'zbekiston uchun strategik ahamiyatga ega bo'lib, ular orqali o'lchash natijalarining global tan olinishi ta'minlanadi.

Xulosa. Xulosa qilib aytganda, O'zbekiston Respublikasida metrologiya sohasining xalqaro tashkilotlar bilan integratsiyasi so'nggi yillarda izchil va tizimli ravishda rivojlanib bormoqda. BIPM, OIML, COOMET, ISO hamda ILAC/IAF kabi nufuzli xalqaro tuzilmalar bilan hamkorlikning kengayishi milliy metrologiya tizimini xalqaro talablarga moslashtirish, o'lchash natijalarining aniqligi va ishonchligini ta'minlash hamda ularning global miqyosda tan olinuvchanligini oshirishga xizmat qilmoqda.

Ayniqsa, O'zbekistonning BIPMga to'laqonli a'zo bo'lishi milliy metrologiya tizimining xalqaro maydondagi mavqeini mustahkamlovchi muhim omil bo'ldi. Ushbu jarayon milliy etalonlar bazasini rivojlantirish, laboratoriyalar faoliyatini xalqaro standartlarga muvofiqlashtirish va mutaxassislar salohiyatini oshirish uchun yangi imkoniyatlar yaratdi. Shu bilan birga, OIML doirasida qonuniy metrologiya tizimini takomillashtirish, COOMET orqali mintaqaviy hamkorlikni kengaytirish hamda ISO standartlarini joriy etish orqali sifat menejmenti tizimlarini rivojlantirish muhim natijalarni ta'minlamoqda.

Biroq amalga oshirilayotgan islohotlarga qaramay, milliy metrologiya tizimida ayrim muammolar ham saqlanib qolmoqda. Xususan, laboratoriyalar kompetensiyasini yanada oshirish, raqamli metrologiya texnologiyalarini keng joriy etish, xalqaro kalibrlash va sinov natijalarining to'liq tan olinuvchanligini ta'minlash dolzarb vazifalar sifatida qolmoqda.

Kelgusida ushbu muammolarni bartaraf etish uchun metrologiya sohasida raqamlashtirish jarayonlarini jadallashtirish, sun'iy intellekt va avtomatlashtirilgan o'lchash tizimlarini keng joriy etish, xalqaro hamkorlikni yanada chuqurlashtirish hamda ilmiy-tadqiqot faoliyatini rivojlantirish muhim ahamiyat kasb etadi. Shu asosda O'zbekiston Respublikasining metrologiya tizimi global ilmiy-texnik makonda yanada mustahkam o'rin egallashi va xalqaro savdo-iqtisodiy jarayonlarda faol ishtirok etishi ta'minlanadi.

ADABIYOTLAR:

1. O'zbekiston Respublikasi Prezidenti. "Xalqaro metrik Konvensiyaga qo'shilish to'g'risida"gi Qonun. – Toshkent, 2025.
2. O'zbekiston Respublikasi Texnik tartibga solish agentligi. Rasmiy veb-sayt va me'yoriy hujjatlar. – <https://www.standart.uz> (murojaat sanasi: 2026)
3. O'zbekiston Respublikasi Metrologiya instituti. Yillik hisobot. – Toshkent, 2023.
4. O'zstandart agentligi. Standartlashtirish va metrologiya sohasidagi faoliyat bo'yicha hisobot. – Toshkent, 2024.
5. BIPM (Bureau International des Poids et Mesures). The International System of Units (SI Brochure). – Paris: BIPM, 2019. – <https://www.bipm.org>
6. OIML (International Organization of Legal Metrology). OIML Publications and Recommendations. – <https://www.oiml.org>
7. COOMET. Euro-Asian Cooperation of National Metrology Institutions Annual Report. – <https://www.coomet.net>
8. ISO (International Organization for Standardization). ISO 9001:2015 Quality Management Systems. – Geneva: ISO, 2015.
9. ISO/IEC 17025:2017. General requirements for testing and calibration laboratories. – Geneva: ISO, 2017.
10. ILAC (International Laboratory Accreditation Cooperation). Mutual Recognition Arrangement (MRA). – <https://ilac.org>
11. IAF (International Accreditation Forum). Multilateral Recognition Arrangement (MLA). – <https://www.iaf.nu>
12. JCGM 200:2012. International Vocabulary of Metrology (VIM). – BIPM, IEC, IFCC, ISO, IUPAC, IUPAP, OIML.
13. Milton, M. J. T., Williams, J., & Forbes, A. B. (2010). Metrology and the fundamental constants. *Philosophical Transactions of the Royal Society A*, 369(1953), 3907–3925.
14. De Bièvre, P. (2009). The impact of the redefinition of the SI units on metrology. *Metrologia*, 46(6), 682–689.
15. Priel, M., & Ehrlich, C. (2018). The role of metrology in international trade and regulation. *Measurement*, 116, 95–102.

**EKOLOGIK MUAMMOLAR VA SPEKULYATIV BADIYYAT: CLI-FI JANRINING
ESTETIK VA AXLOQIY O'LCHAMLARI***Alimova Vaziraxon Baxtiyorovna,**Buxoro davlat texnika universiteti tayanch doktoranti**valimova@bstu.uz**<https://orcid.org/0000-0003-0874-2394>*

Annotatsiya. Ushbu matn iqlim o'zgarishi mavzusiga bag'ishlangan cli-fi (iqlim badiiyoti) janrining shakllanishi, rivojlanishi va asosiy xususiyatlarini tahlil qiladi. Unda global isish muammosini badiiy adabiyot va kino orqali ifodalashda qo'llaniladigan janrlar, narrativ strategiyalar va estetik vositalar ko'rib chiqiladi. Shuningdek, cli-fi asarlarining ilmiy ma'lumotlar, axloqiy mas'uliyat va ekologik ongni shakllantirishdagi roli yoritiladi.

Kalit so'zlar: cli-fi, iqlim o'zgarishi, ekologik adabiyot, narrativ, apokaliptik janr, spekulyativ badiiyat, ekologik ong, antropotsen.

**ЭКОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОБЛЕМЫ И СПЕКУЛЯТИВНАЯ ЛИТЕРАТУРА:
ЭСТЕТИЧЕСКИЕ И ЭТИЧЕСКИЕ ИЗМЕРЕНИЯ ЖАНРА КЛИ-ФАЙ**

Аннотация. Данный текст анализирует формирование и развитие жанра cli-fi (climate fiction), посвящённого проблеме изменения климата. Рассматриваются жанровые особенности, нарративные стратегии и эстетические подходы к художественному изображению глобального потепления в литературе и кино. Особое внимание уделяется роли cli-fi в распространении научной информации, формировании экологического сознания и этической ответственности.

Ключевые слова: cli-fi, изменение климата, экологическая литература, нарратив, апокалипсис, спекулятивная проза, экологическое сознание, антропоцен.

**ENVIRONMENTAL ISSUES AND SPECULATIVE FICTION: THE AESTHETIC AND
ETHICAL DIMENSIONS OF CLI-FI GENRE**

Abstract. This text examines the formation, development, and key characteristics of cli-fi (climate fiction) as a genre focused on climate change. It explores narrative strategies, genre conventions, and aesthetic approaches used to represent global warming in literature and film. The study also highlights the role of cli-fi in communicating scientific knowledge, fostering ecological awareness, and promoting ethical responsibility.

Keywords: cli-fi, climate change, environmental literature, narrative, apocalypse, speculative fiction, ecological awareness, Anthropocene.

Kirish. Global isish 1980-yillarning oxirlarida keng jamoatchilik e'tiboriga birinchi marta tushdi va XXI asrda insoniyat duch keladigan eng katta muammolardan biri sifatida tan olindi. Bu muammoning kelajakdagi rivojlanish modellari, uning ehtimoliy siyosiy, ijtimoiy va madaniy ta'sirini bashorat qilish va haroratning ko'tarilishini cheklash va uning oqibatlarini yumshatish choralari bo'yicha takliflar hozirgi kunga qadar qizg'in muhokama qilinib kelinmoqda, hattokim, yaqin kelajakda ham bahs mavzusi bo'lib qolish ehtimoli mavjud. Ushbu jamoatchilik tashvishi so'nggi paytlarda iqlim o'zgarishi haqidagi fantastika asarlarining ko'payishiga olib keldi. Climate fiction (cli-fi) ekologik vaziyat haqidagi qarashlarni aks ettiruvchi, ma'lum darajada kitobxonni holatdan xabardor qiluvchi yangi fantastika va film janri sifatida 2013-yilda AQSh va Buyuk Britaniya matbuotida bir qator maqolalarda ko'rinish berdi. Iqlim o'zgarishi haqidagi fantastika internetdagi ko'plab blog va forumlarning bosh mavzusiga aylandi va tobora ortib borayotgan akademik qiziqish markaziga aylandi.

Cli-fi ilmiy ma'noda janr emas: unda ilmiy-fantastik va vestern kabi janrlarga xos bo'lgan syujet strukturasi va stilistik konventsionalar yo'q. Biroq mavjud turli janrlarning unsurlarini o'zlashtirgan yoki uyg'unlashtirgan holda iqlim o'zgarishi va u bilan bog'liq siyosiy, ijtimoiy, psixologik va axloqiy masalalarga tematik jihatdan qaratilgan, muhim bo'lgan keng ko'lamlil narrative asarlar majmuasini ifodalash uchun ishlatiladigan atama hisoblanadi. Aniq ta'rifning yo'qligini hisobga olsak, cli-fi ni antropogen iqlim o'zgarishi

bilan shug'ullanuvchi o'ziga xos badiiy asarlar majmuasi sifatida tushunish mumkin: bunda tabiat haqidagi hodisalar asosiy voqea-hodisalar uchun fon sifatida emas, balki to'laqonli psixologik va ijtimoiy muammo doirasida o'rganiladi, badiiy syujetlarni metereologik faktlar, kelajak haqidagi taxminlar bilan uyg'unlashtiradi hamda inson va tabiat o'rtasidagi munosabatni aks ettiradi.

Iqlim o'zgarishi bevosita tilga olinmagan, lekin shu mavzu bilan bog'liq deb talqin qilingan romanlar mavjud, masalan, Kormak Makkartiyning "The road" (Yo'l, 2006), Margaret Atvudning "The Year of the flood" (To'fon yili, 2009) va "MaddAddam" trilogiyasi (2013), Sara Xollning "The Carhullan Army" asari (2007) Peter Verhelstning "Tonguecat" (2003), Mishel Uellebekning "The Possibility of an Island" (Orolning imkoniyati, 2005) va Roza Monteroning "Weight of the Heart" (Yurak og'irligi, 2016) – bu asarlarda global isish inson faoliyatining tabiiy muhitni global miqyosda qaytarib bo'lmaydigan darajada o'zgartirib yuborishi ehtimoli ko'rsatiladi, ammo bu mavzu syujet markazida emas, shuning uchun uning sabablari va oqibatlari muhokama qilinmaydi. Global isish tushunchasi hali mavjud bo'lmagan davrlarga oid bo'lgan bo'lsa-da, mantiqan global iqlim tizimiga inson tomonidan ongli lekin ko'pincha halokatli aralashuvi tasvirlangan asarlar ham mavjud. Bunga misol sifatida 1889-yilda yozilgan Jyul Vernning "The Purchase of the North Pole" (Shimoliy qutbni sotib olish) romani va Aleksandr Doblining 1924-yilda dunyo yuzini ko'rgan "Mountains Oceans Giants" (Tog'lar, okeanlar gigantlari) keltirish joiz. Undan tashqari 1960-yillarda J.G.Ballard tomonidan yozilgan Jim Klark tomonidan "proto-iqlim o'zgarishi haqidagi fantastika" deb ta'rif berilgan distopik romanlarni ham shu safga qo'shish muhim. Garchi bu fantastikaga oid asarlar issiqxona gazlarining ta'siri haqidagi ilmiy tushunchalar ilmiy ravishda shakllanishidan oldin yozilgan bo'lsada, ulardagi iqlim o'zgarishini tabiiy sabablar bilan Ballard izohlaydi. "The drowned world" asarida yer iqlimi keskin o'zgarib, dunyo suv ostida qolib ketadi, lekin buning sababi insoniyat emas, balki quyosh radiatsiyasidagi o'zgarishlar bilan izohlanadi. "The Drought" (The Burning World) kuchli qurg'oqchilik va suv tanqisligi aks ettiriladi. Asarlardagi asosiy g'oya insonning tabiat ustidan nazorat qilish imkoniyatlari chegaralari aks ettirish. 1979-yilda yozilgan Maks Frishning "Man in the Holocene" falsafiy asari tabiatdagi beqarorlik inson bilimining va mavjudlikning cheklanganligini ko'rsatsada, ilmiy-iqlim nazariyasidan ko'ra chuqurroq ma'noga ega. Ignácio de Loyola Brandãoning 1974-yilda yaratilgan "Zero" asarida siyosiy diktatura va repressiya ekologik va ijtimoiy yemirilish metafora orqali ifodalanadi. Bu yozuvchilar zamonaviy iqlim o'zgarishini tasvirlamagan, lekin ular tomonidan yozilgan romanlarda keyinchalik rivojlangan "iqlim o'zgarishi fantastikasi"ga xos bo'lgan mavzu, tuzilma, motiv va janr xususiyatlari oldindan namoyon etilgan.

Atmosferada karbonat angidrid va boshqa issiqxona gazlarining ortishi natijasida yuzaga kelgan isish effekti birinchi marta XIX asrda Jozef Furrye, Jon Tindall va Svante Arrenius kabi olimlar tomonidan aniqlangan va bosqichma-bosqich o'zlashtirib borilgan. Biroq, iqlim o'zgarishining ilmiy kashf etilishi 1960-1970-yillarda bu mavzuga qayta e'tibor berilgach yuz bergan. Inson faoliyatining atrof-muhitga ta'siri, aholining ko'payishi, ifloslanish va kislotali yomg'ir kabi boshqa ekologik muammolar haqida jamoatchilik xavotirining oshishi 1970-yilda AQShda birinchi Yer kuni (Earth Day) ni tashkil etilishiga olib kelgan. Masalan, Paul va Anne Ehrlich 1968-yilda yozilgan "The Population Bomb" (Aholi bombasi) asarida issiqxona effekti tilga olingan. 1980-yillarning boshlariga kelib, avvalgi o'n yilliklarda to'plangan ilmiy ishlar, Charlz Kiling, Rojer Revel, Uolli Broker, Reid Brayson va Stiven Shnayder kabi olimlar tomonidan olib borilgan tadqiqotlar, 1979-yilda Jenevada bo'lib o'tgan Jahon iqlim konferensiyasi kabi forumlarda taqdim etilib, jamoatchilik ongiga tobora kuchliroq kirib borgan. Holat gazeta va televideniya kabi ommaviy axborot vositalirida hamda Howard Wilcoxning "Hothouse Earth" (Issiqxona Yer) va Shnaydarning "Genesis Strategy: Climate and Global Survival" kabi ommabop ilmiy kitoblarida ham aks ettirilgan.

Bu fenomen bilan bog'liq adabiy qiziqish 1971-yilda Ursula Le Gvinning "The Lathe of Heaven" (Osmon tornasi) nomli qisqa ilmiy-fantastik romanidan boshlangan deb qaraladi. Le Gvin yoshlar uchun mo'ljallangan "Earthsea" fantastika turkumi va chuqur mulohazalarga boy boshqa ilmiy-fantastik asarlar muallifi sifatida ham tanilgan. Bu yo'nalish asta-sekin rivojlana bordi, Arthur Herzogning 1977-yilda yozilgan "Heat" (Issiqlik) trilleri va avstraliyalik tanqidchi hamda yozuvchi George Turnerning 87-yilda chop etilgan "The Sea and Summer" asarlaridan so'ng, 2000-yillar atrofida bu yo'nalish cho'qqiga chiqdi. Ushbu davrda Maggie Geening "The Ice People" (Muz odamlari), Norman Spinradning "Greenhouse Summer" (Issiqxona yozi) va T. C. Boylening "A Friend of the Earth" (Yerning do'sti) asarlari paydo bo'ldi. Ko'rinib turibdiki, iqlim o'zgarishi bilan bog'liq masalalar boshidan boshlab asosan ommabop janrlar doirasida badiiylashtirilgan, va ilmiy-fantastika va qisman triller janrlarida ifodalangan. Shu bilan birga, ayrim hollarda janrga xos syujet va qahramonlik kutilmalari iqlim o'zgarishi muammosining o'zini soya ostida qoldirishi yoki chalg'itishi mumkinligi ham tan olinishi lozim. Chunki agar roman jozibasi asosan uning ma'lum janrga (yoki mashhur yozuvchining ijodiga) mansubligiga tayanadigan bo'lsa, bu unda ko'tarilgan muammolarga mumkin bo'lgan yechimlarni anglashni cheklab qo'yishi ehtimoli bor. Le Gvin va Turner kabi ilmiy-fantastika yozuvchilardan

tortib Kim Stanley Robinson va Paolo Bacigalupi kabi mualliflargacha iqlim o'zgarishini nisbatan murakkab va puxta ishlab chiqilgan tarzda tasvirlagan bo'lsalarda, janrga xos me'yorlar Rock Brynning 1998-yilda yozilgan "The Doomsday Report" (Qiyomat kuni hisoboti) va James Herbertning 1992-yilda yozilgan "Portent" (sovuqlashtiruvchi) kabi trillerlarga kuchli aks ettiriladi. Bu tendensiya keyinchalik Michael Crichtonning "State of Fear" (Qo'rquv holati) va Clive Cusslerning "Arctic Drift" (Arktika drifti) asarlarida ham davom etadi. Bunga qarama-qarshi ravishda, Gee va Boyle romanlari janr kutilmalaridan (asosan ilmiy-fantastikadan) foydalanilsa-da, ommabop janr qoliplarining cheklovlaridan qochishga uringan ilk namunalari hisoblanadi. Ular buni, bir tomondan, stereotiplarni murakkablashtirish, ikkiyuzlama yoki ziddiyatli qahramonlarni kiritish va kutilmalarni kinoyaviy tarzda buzish orqali amalga oshiradilar; ikkinchi tomondan esa, insonning tabiiy muhitga munosabati va ijtimoiy adolat, gender va jinsiylik, shuningdek, individual va jamoaviy harakat masalalari o'rtasidagi bog'liqlikni oldinga chiqaradilar.

Cli-fi, ya'ni iqlimga oid badiiy adabiyot XXI asrning dastlabki yillarida tez sur'atlar bilan rivojlana boshladi. Bu jarayon Al Gore tomonidan iqlim masalalariga e'tibor kuchaytirilishi bilan deyarli bir vaqtda yuz berdi. Dastlabki bosqichda Margaret Atwood, Jeanette Winterson va Liz Jensen kabi yozuvchilarning asarlari, shuningdek, Kim Stanley Robinson, Michael Crichton va Clive Cussler ijodi bu yo'nalishning kengayishiga turtki berdi. Adabiyotshunos Adam Trexler ingliz tilidagi adabiyotda 150 dan ortiq cli-fi romanlari mavjudligini qayd etadi, bundan tashqari, ushbu mavzuga oid o'nlab filmlar ham yaratilgan. Bunday asarlarda odatda iqlim o'zgarishining kelajakdagi oqibatlarini tasvirlanadi, masalan, cho'llanish, qurg'oqchilik, suv tanqisligi, toshqinlar va kuchli bo'ronlar, tropik kasalliklarning tarqalishi, ekologik muhojirlik va boy-kambag'al o'rtasidagi keskin tafovut tufayli jamiyatning tartibsizlik hamda qurolli to'qnashuvlarga yuz tutishi. Shu tasvirlar asosida umid va muhabbat, xiyonat va tushkunlik kabi insoniy dramalar rivojlanadi. Qahramonlar orasida siyosatchilar, olimlar, jurnalistlar, ekologik faollar va kundan kunga og'irlashib borayotgan sharoitda yashashga urinayotgan oddiy insonlar uchraydi. Odatda iqlim o'zgarishi boshqa qoshimcha muammolar bilan bir qatorda tasvirlanadi, masalan ortiqcha iste'mol, aholi sonining keskin o'sishi, ilm-fanning jamiyatdagi o'rni, genetik modifikatsiya, geo-muhandislik kabi masalalar, shuningdek, inson hayotining tobora individualistik va sun'iy shakllarga o'tishi bilan bog'liq xavotirlar. 2007- yildagi Sharqiy Angliya universiteti olimlarining elektron xatlari "Climategate controversy" oshkor qilinib, global isish uydirma degan talqinlar paydo bo'ldi. 2009- yilda Birlashgan millatlar tashkiloti (United Nations) tomonidan o'tkazilgan Kopengagen konferensiyasida kelishuvga erishilmaganidan so'ng, iqlim masalasiga nisbatan ishonchsizlik kuchaydi. Bu ishonchsizlik nafaqat ilmiy ekspertiza, balki Intergovernmental Panel on Climate Change kabi tashkilotlar va siyosiy institutlarga ham ta'sir etdi. Shu bilan birga, ko'plab apokaliptik ssenariylarning takrorlanishi jamiyatda ma'lum darajada befarqlik (desensitizatsiya)ni ham yuzga keltirdi. 2010- yildan keyin paydo bo'lgan ikkinchi to'lqin asarlari: Ian McEwan, Ilija Trojanow va Barbara Kingsolver kabi yozuvchilar ijodida ko'rinish berdi. Bu asarlar jamiyat va siyosatchilarning iqlim muammolariga nisbatan sust munosabatining sabablarini tahlil qilishga hamda iqlim o'zgarishi sharoitida yashashning real holatini ko'rsatishga intildi. 2010-yillardan keyin turli mamlakatlarda ko'plab asarlar yaratildi. Masalan, Antti Tuomainenning "The Healer" (Shifokor) asari, Alexis Wrightning "The Swan Book" (oqqush kitobi) asari va Nathaniel Richning "Odds Against Tomorrow" "Ertaga qarshi imkoniyatlar) romani, 2014-yillarda nashr etilgan David Mitchellning "The Bone Clocks" (Suyak soatlari), Jeff VanderMeer tomonidan yozilgan "Annihilation" (Yo'q qilish), Emmi Itarantaning "Memory of Water" (Suv xotirasi), Johanna Sinisalonning "The Blood of Angels" (Farishtalar qoni) romani, 2015-yillarda chop etilgan Bacigalupining "The Water Knife" (Suv pichog'i), Clare Vaye Watkinsning "Gold Fame Citrus" (Oltin Shuhrat), James Bradleyning "Clade", Elina Hirvonening "When Time Runs Out" (Vaqt tugashi bilan), "Loosed Upon the World" (Dunyoni tark etgan) nomli qisqa iqlimfantastikasi dostoni shu jumlagi kiradi. Cli-fi bugungi kunda ham rivojlanishda davom etmoqda. 2016-17-yillardagi nashrlar orasida Maja Lundening "Asalarilar tarixi", Robinsonning "Nyu-York 2140", Eshli Shelbining "Janubiy qutb stansiyasi" va Devid Uilyamsning "Ingliz qulashi bilan" asarlari bor, oz sonli roman yozuvchilari (ayniqsa, Robinson va Bacigalupi) o'z asarlarini iqlim o'zgarishini tasvirlashga qaratgan, shoirlar va dramaturglar Frederik Tyornerning "Apokalipsis" (2016) epik dostoni kabi asarlar va Buyuk Britaniyadagi pyesalarga Keril Cherrillning "Skriker" (1994) asaridan Stiv Uotersning "Shartli reja" (2009) asarigacha bo'lgan asarlar bor. Cli-fi asosan Shimoliy Amerika, Buyuk Britaniya va Avstraliyada rivojlangan bo'lsada, u global hodisaga aylangan. Koreada Bong Joon-ho tomonidan suratga olingan distopik ilmiy-fantastik film "Snowpiercer" yoki Germaniya va Skandinaviya mamlakatlaridagi chop etilgan romanlar bu yo'nalishning keng geografik qamrovga ega ekanini ko'rsatadi. Umuman olganda, iqlim o'zgarishi mavzusi nafaqat ingliz tilidagi adabiyotda, balki global miqyosda ham muhim badiiy vositaga aylangan. Bu asarlar insoniyatning qadriyatlarini, turmush tarzi, iste'mol madaniyati hamda shaxsiy manfaatlar bilan ijtimoiy

mas'uliyat o'rtasidagi ziddiyatlarni tahlil qiladi. Shu orqali ular insonlarda xavotir va aybdorlik hissini ifodalaydi hamda kelajak qanday bo'lishi kerakligi haqidagi savollarni o'rta qo'yadi.

Adabiyot hayot bizni ro'baro' qiladigan murakkab muammolarni anglash va ularga javob topishda muhim vosita bo'lib xizmat qiladi: u o'tmishni talqin etadi, bugunning vaziyatlari va tanlovlarini dramatik tarzda yoritadi hamda ehtimoliy kelajaklarni tasavvur qilish imkonini beradi. Gender identifikatsiyasiga oid rivoyatlar singari, global isish haqidagi hikoyalar ham ijtimoiy reallikni shakllantirishda faol ishtirok etadi; ular "tartibga soluvchi tasavvurlar" sifatida metaforik tushunchalardan foydalanib, obyektlar va identifikatsiyalar toifalarini belgilaydi hamda muammoning qanday talqin qilinishini aniqlaydi. Hikoyalar jamoaviy ma'no yaratish shakli bo'lib, o'quvchini ruhlantirish va harakatga undash salohiyatiga ega. Nevrofiziologik tadqiqotlar hikoya olamiga sho'ng'ish real hayotdagi hissiy va neyron javoblarni qo'zg'atishini ko'rsatadi. Shuningdek, narratologik izlanishlar hikoyalar tajribani ichki ravishda "sinab ko'rish" imkonini berib, o'quvchini ruhiy va hissiy jihatdan ma'lum darajada "ko'chirish" kuchiga ega ekanini ta'kidlaydi. Shu asosda Erin James va Alexa Weik von Mossner adabiyot hamda kino inson uchun ilgari ahamiyatsiz bo'lib tuyulgan narsalarni muhimga aylantirishi, shaxsiy identitet chegaralarini kengaytirib, insoniy va noinsoniy mavjudotlarni ham qamrab olishi, hamda g'amxo'rlik hissini rivojlantirishi mumkinligini ilgari suradilar. Bu jarayon, avvalo, matndagi o'quvchini muayyan nuqtayi nazarni "ichkaridan" his qilishga chorlovchi vositalar – makon va zamonning tashkil etilishi hamda qahramonlarning tasviri orqali amalga oshadi. Axloq falsafasi vakillari ham shunga yaqin fikrlarni ilgari surgan bo'lib, bu yo'nalishda eng muhim ishlardan biri Martha Nussbaumga tegishlidir. Nussbaumning ta'kidlashicha, adabiyot o'quvchini qahramonlarga nisbatan hamdardlik bildirishga undab, insonning "g'amxo'rlik doirasi"ni kengaytiradi. Uning qarashlariga ko'ra, axloqiy anglash va harakat qilish uchun rahm-shafqat zarur; bu esa boshqa bironing azob-uqubatlari miqyosini, uning sababli yoki sababsizligini, hamda eng muhimi, o'sha inson bizning kelajakdagi maqsadlarimiz va faoliyatlarimizda qanchalik muhim o'rin tutishini anglashni o'z ichiga oladi. Badiiy nasr va she'riyat aynan shu uchinchi jihatni kengaytirishga yordam beradi, ya'ni ilgari biz uchun begona bo'lgan shaxslarni ham muhim deb bilishga undaydi.

Bundan tashqari, iqlim o'zgarishi mavzusidagi roman va filmlar o'ziga xos "terapevtik makon"ni taqdim etishi mumkin, ya'ni unda antropotsen davriga xos umumiy xavotirlar ifodalanadi va ma'lum ma'noda qayta ishlanadi. E. Ann Kaplan ta'kidlashicha, antropotsen global miqyosda "oldindan travmatik stress"ni yuzaga keltirgan bo'lib, bu jangovar harakatlarga yuborilgan askarlarda kuzatiladigan pretravmatik stress sindromining (PreTESS) makroko'lamdagi ko'rinishidir. Kaplan fikriga ko'ra, ekologik falokat haqidagi filmlar ana shunday ruhiy holat bilan kurashishga yordam beradi; ular insoniyatning allaqachon yuz berayotgan global falokatlarni anglash va ulardan chiqish yo'llarini topishga qaratilgan qiziqarli, garchi umidsiz urinishlari sifatida namoyan bo'ladi.

Mulohaza yuritishga undash va rag'batlantirish salohiyatiga ega bo'lganligi sababli, iqlim haqidagi badiiy asrlar (cli-fi) iqlim masalasidagi sustkashlikka qarshi norozilik vositasi sifatida ham qaralishi mumkin. Biroq mualliflar uchun o'quvchini faol harakatga undash istagi ularni begonalashtirib qo'ymaslik zarurati bilan muvozanatlashishi lozim. 2007-yilda Cape Farewell loyihasi tomonidan iqlim o'zgarishiga bag'ishlangan roman yozishga taklif etilgan McEwan intervyusida haddan tashqari pand-nasihatning xavflari haqida to'xtalib, shunday degan edi: "Badiiy asar didaktik ohangni yoqtirmaydi. O'quvchilar ham tanbeh berilishidan mamnun bo'lmaydi". Shunga o'xshash tarzda, Gee 2014-yilda Hay adabiyot festivalida chiqish qilib, ekologik masalalarga befarq bo'lmagan yozuvchilarni asarlarini haddan tashqari g'oyaviy yuklashdan ogohlantirgan. Ijtimoiy norozilik romani boy an'anaga ega bo'lsa-da, ekologik qarashlar ko'pincha keskinlik, qo'rquv uyg'otish va dogmatizm bilan bog'lanadi, bu esa Frederick Buell ta'riflagan "Chicken Little syndrome" yani haddan tashqari vohima qilish yoki xavfni bo'rtirib ko'rsatish va "doomsterism", ya'ni insoniyat kelajagi haqida haddan tashqari pessimist, halokatga yo'naltirilgan qarash kabi ayblovlarga sabab bo'lishi mumkin. Norvegiyada va Germaniyada Gaarderning "World According to Anna" (Anna qarashidagi dunyo, 2013) hamda Trojanowning "Lamentations of Zeno" (Zeno nolalari, 2011) asarlariga nisbatan bildirilgan aralash munosabat - ularning ekologik g'oyani ochiqchasiga singdirishga urinish bilan "zararlangani" haqidagi tanqidlar -bunday "pand-nasihat" adabiyotga nisbatan salbiy qarash mavjudligini ko'rsatadi. Agar cli-fi McEwan ta'riflagan tanbeh ohangidan qochishi zarur bo'lsa, u boshqa turdagi "ma'ruzachilik"dan ham ehtiyot bo'lishi kerak. Iqlim o'zgarishi faqat madaniy hodisa emas, balki ilmiy o'lchov va kuzatishlar orqali anglanadigan fizik jarayondir. Shu sababli cli-fi ko'pincha faktik tadqiqot va taxminiy tasavvurning uyg'unlashuvi bilan tavsiflanadi. Badiiy adabiyot odatda qat'iy faktlardan chetga chiqishga "ruxsat berilgan" yozuv turi sifatida qaralsada, iqlim haqidagi romanlar ilmiy ma'lumotlarni integratsiya qilishga ko'pincha katta e'tibor qaratadi. Masalan, Flight Behaviour asarida Kingsolver biolog sifatidagi bilimlariga tayangan holda global isish monarx kapalaklarining migratsiya yo'nalishlariga qanday ta'sir ko'rsatishini turli jihatlarida

tasvirlaydi. “The Rapture” romanida esa muallif Jensen Bristol universiteti geologlari bilan muloqotlari davomida olgan ilmiy ma’lumotlarni kichik bir guruh olimlar tomonidan berilgan qisqa izohlar orqali o’quvchiga yetkazadi. Ilmiy ma’lumotlarni badiiy matnga singdirish yuqori darajadagi mahorat talab qiladi; aks holda, voqea rivoji uzilib qolishi va o’quvchining diqqati susayishi mumkin. Buni cli-fi haqidagi ko’plab onlayn izohlarda “ma’lumotni ortiqcha yuklash” (“info-dumping”)ga nisbatan bildirilgan sabrsizlik ham tasdiqlaydi.

Iqlim o’zgarishini badiiy yoki kino hikoya shaklida tasvirlash muayyan qiyinchiliklarni keltirib chiqaradi. Bu, avvalo, uning sabab va ko’rinishlarining murakkabligi, shuningdek, hodisaning ulkan makoniy va zamoniy ko’lami bilan insonning individual tajribasi o’rtasidagi nomutanosiblik bilan bog’liq. Inson faoliyati natijasida yuzaga kelgan iqlim o’zgarishi global ekologik muammo bo’lib, u dunyoning turli hududlarida turlicha namoyon bo’ladi va kelajak avlodlarga hozirgi davrga nisbatan ancha kuchliroq ta’sir ko’rsatishi kutilmoqda. So’nggi yillarda aynan “ko’lam” masalasi tanqidiy tadqiqotlarda keng muhokama qilinmoqda. Ushbu muammoga nisbatan cli-fi doirasida turli ba’zan sodda, ba’zan esa murakkab yondashuvlar shakllangan. Ayrim asarlarda vaqt siqishtiriladi va ko’pincha apokaliptik manzaralar orqali ifodalanadi. Masalan, “The Day After Tomorrow” (2004) filmida Robinson trilogiyasiga o’xshash keskin iqlim o’zgarishi ssenariysi tasvirlanadi. Boshqa asarlar esa vaqtni chegarali bo’lmagan tarzda tasvirlashni tanlaydi; bu yondashuvni postmodern uslubga xos deb baholash mumkin. Masalan, Wintersonning “The Stone Gods”, Mitchellning “The Bone Clocks” va Wrightning “The Swan Book” asarlari, yoki janr jihatidan yangicha tajribalar bilan boyitiladi. Namuna sifatida “The Age of Stupid” (2009) filmini keltirish mumkin, unda qo’llangan “kelajak tarixchisi” g’oyasi va hujjatli-badiiy tuzilma bunda qisqa hujjatli lavhalar postinson kelajagidan hikoya qiluvchi narratorning xayoliy doirasiga joylashtiriladi.

Boshqa asarlar iqlim o’zgarishining ekologik va makoniy tarqoqligini ifodalash uchun bitta voqea yoki muayyan makonni tanlab, uni global jarayonlarning ramziy ifodasi sifatida ko’rsatadi. Kingsolver romanidagi monarx kapalaklari buning yaqol na’munasi. Shuningdek, turli joylar va ko’plab qahramonlarni birlashtirgan montaj uslubidan foydalanadigan romanlar ham mavjud. Bunga, Robinsonning “Science in the Capitol” trilogiyasi yoki Geening “The Flood” asari misol bo’ladi. Bu yondashuv Ursula K. Heise ilgari surgan fikrni eslatadi: uningcha, iqlim o’zgarishini eng samarali tarzda yuqori modernizmga xos parchalangan narrativ usullar orqali ifodalash mumkin. U bu borada “Earth” romanini misol qilib keltiradi; unda ko’plab qahramonlar va voqealar birlashtirilgan bo’lib, yangiliklar, xatlar, huquqiy matnlar va onlayn muhokamalardan olingan “haqiqiy” diskurs parchalarini badiiy hikoya tarkibiga qo’shadi. Bu uslubni “Man in the Holocene” asari ham oldindan namoyish etgan: unda geologik vaqt doirasida insoniyat o’rniga oid mulohazalar va faktik ma’lumotlar kollaj tarzida bosh qahramon ongining yemirilishi haqidagi hikoyaga singdirilgan. Natijada yozuvchilar global isishning keng makoniy va zamoniy ko’lamini o’quvchi uchun sezilarli qilish maqsadida turli badiiy strategiyalardan foydalanadilar.

Umuman olganda, iqlim badiiyoti (cli-fi) murakkab va muvozanati oson topilmaydigan ikki yo’nalish orasida harakat qiladi: bir tomondan, u global isishning ko’lami, jarayonlari va oqibatlarini o’quvchida qiziqish uyg’otadigan, psixologik, intellektual va hissiy jihatdan ta’sir etadigan tarzda ifodalashga intiladi – bu, aslida, san’atning umumiy vazifasiga mos keladi; ikkinchi tomondan esa, iqlim o’zgarishining ulkanligi, dolzarbligi va noaniqligini yetkazib berishga harakat qiladi. Britaniyalik kritik Timothy Clark, hatto, shuni ta’kidlaydiki, an’anaviy hikoya qilish usullari iqlim o’zgarishini uning barcha murakkabligi bilan ifodalash uchun yetarli emas. Biroq bu qarama-qarshilikni ijobiy nuqtayi nazardan qaralganda, roman janri uchun yangilanish imkoniyati sifatida talqin qilish mumkin. Trexlerning “Anthropocene Fictions” asaridagi tahlili shuni asos qilib oladiki, turli va o’zaro bog’liq ta’sir kuchlaridan iborat bo’lgan iqlim o’zgarishi hodisasi romanning o’z shakliga ham ta’sir ko’rsatgan. Amerikalik Ian Baucom esa Antropotsen davri inson tarixini alohida shaxslar yoki siyosiy munosabatlar darajasida emas, balki butun insoniyat turi darajasida anglashni talab qilishini, shu bois tarixiy roman ham yangi shaklga muhtoj ekanini ilgari suradi.

Cli-fi asarlarining keng tarqalishi shuni ko’rsatadiki, adabiyot va kino ijodkorlari tobora ko’proq iqlim o’zgarishi qo’ygan talablarga javob topishga urinmoqda. Matnlar korpusining kengayib borayotgani mualliflarning mavjud janr an’analarini qabul qilish va ularni maqsadga muvofiq tarzda o’zgartirish orqali iqlim muammosiga munosabat bildirayotganini yaqqol namoyon etadi. Bu yondashuv orqali ular o’quvchini global isish xavflari haqida ogohlantirish, muhokamalarni boyitish, fikrlash va harakat qilishga undash, natijada esa qarashlar va xatti-harakatlarda o’zgarishlarga turtki berishni maqsad qiladi shu bilan birga, turli didaktik yoki ortiqcha drammatizatsiya kabi kamchiliklardan qochishga intiladi. Eng ta’sirchan yo’nalishlardan biri apokaliptik uslub bo’lib, u qo’rquv omiliga tayanadi va keskin choralar ko’rish zaruratini urg’ulaydi. Shu bilan bir qatorda, unga qarama-qarshi bo’lgan pastoral uslub ham muhim o’rin tutadi: u uyg’un hayot manzaralarini tasvirlab, yo’qotilgan muvozanat va uni qayta tiklash imkoniyatiga nisbatan nostaljik tuyg’ularni

uyg'otadi. Avval tilga olingan "gunoh va najot" syujet modeli ekologik farovonlik halokatga yuz tutadigan olam fonida Injildagi To'fon, Bobil minorasi va Apokalipsis haqidagi rivoyatlar bilan hamohangdir. Boshqa janr namunalari detektiv hikoyalar kiradi, ular dalillarni tahlil qilish va aybdorlarni fosh etishga qaratiladi; shuningdek, triller janri ham mavjud bo'lib, u keskinlik va sirlarning asta-sekin ochilishi orqali voqeani kulminatsiyaga olib boradi. Bundan tashqari, tarbiyaviy roman (bildungsroman), ya'ni shakllanish romani ham qo'llanadi, unda bosh qahramon iqlim o'zgarishi xavflarini o'zini anglash jarayoni doirasida tushunib boradi. Shuningdek, postapokaliptik cli-fi, ba'zan gotik unsurlarni o'zlashtirgan, ba'zan esa "so'nggi inson", sahro yoki kimsasiz orol hikoyasi shaklida namoyon bo'ladigan, ekotopik narrativ, texno-triller va biopank kabi kichik janrlar ham shakllangan. Biopank, xususan, biotexnologiyani salbiy jihatlarini ochib berib, distopik kelajakda insonning omon qolish va o'zini ro'yobga chiqarish uchun kurashini tasvirlaydi.

Ilmiy fantastikadan olingan "kelajak tarixchisi" modeli ham keng qo'llaniladigan tuzilmalardan biridir. Bu uslub tarixchi Naomi Oreskes va Erik M.Conwayning 2014-yilda yozilgan "The Collapse of Western Civilization" asarida, ayniqsa, aniq ko'rinadi: unda 2373-yilda yashayotgan xitoylik tarixchi iqlim o'zgarishi qanday qilib sivilizatsiyaning tanazzuliga olib kelganini, aholi keskin kamayib, omon qolganlar sodda hayot tarziga qaytishga majbur bo'lganini retrospektiv tarzda bayon qiladi. Shu kabi yondashuv Turner'dagi "The Sea and Summer", Boyldagi "A Friend of the Earth" hamda yuqorida tilga olingan "The Age of Stupid" filmida ham uchraydi. Bunday "kelajakdan qarash" uslubida satira imkoniyati ham mavjud, ayniqsa o'z-o'zini tanqid qilish shaklida. Chunki o'quvchi kelajak avlodlarining o'tmishdagi insoniyat xatolaridan afsuslanishi va hatto noroziligini kuzatar ekan, muqarrar ravishda o'z davriga nisbatan tanqidiy va ongli munosabatni shakllantiradi.

Umumiy qilib aytganda, satira zamonaviy jamiyatdagi kamchiliklarni ochib berishda muhim vosita sifatida xizmat qiladi: u muqobil voqeliklar bilan qiyoslash yoki ikkiyuzlamachiliklarni kulgi ostiga olish orqali tanqidiy tasvir yaratadi. Will Self ning "The Book of Dave" (2006) hamda Ian McEwan ning "Solar" (2010) asarlari shunday cli-fi namunalaridandirki, ularda kinoya va qora yumor muhim rol o'ynaydi. Bu esa qo'rquv, nafrat yoki aybdorlik hissini haddan tashqari zo'rlab singdirishdan qochish imkonini beradi. Avval ta'kidlanganidek, ayrim cli-fi asarlaridagi voqea joylari va syujetlar global isishning kengroq miqyosdagi jarayon va oqibatlarini ramziy tarzda ifodalovchi o'xshatishlar sifatida qaralishi mumkin. Biroq oddiy o'xshatishdan tashqari, ayrim matnlar o'z hikoyasini ochiq allegoriya sifatida quradi. Masalan, "Solar" romanida bosh qahramon bir vaqtning o'zida zamonaviy "oddiy inson" timsoli hamda ma'lum turdagi olim va tadbirkor obrazini mujassam etadi. Asardagi Arktikaga safar chog'ida kiyim almashtirish xonasida kechadigan sahna esa aniq allegorik ma'no kasb etib, yaxshi niyatli bo'lsa-da, insonlarning bir-birini qo'llab-quvvatlash va umumiy maqsad – ekologik inqiroz haqida jamoatchilikni xabardor qilish yo'lida hamjihat harakat qilishdagi oqibatlari ko'rsatadi.

Ramziylik ham bu jarayonda muhim badiiy vosita hisoblanadi. Emmi Itaranta ning "Memory of Water" asarida postapokaliptik kelajak tasvirlanadi va unda suv nihoyatda qimmat resursga aylanib, harbiy kuchlar tomonidan nazorat qilinadi hamda aholini qo'rqitish vositasi sifatida ishlatiladi. Suvning hayot, bo'lish, ekologik bog'liqlik va hokimiyat yashirishga urinayotgan haqiqat xotirasi bilan bog'lanishi iqlim muammosini shaxsiy kamolot va gender masalalari bilan uyg'unlashtirishga, undan ham kengroq qilib aytganda, hayot mazmuni va san'atning inson umridan farqli o'laroq ma'lum darajada abadiylik bera olishi haqidagi mulohazalarga olib keladi. Boshqa ayrim romanlarda esa an'anaviy realizmga xos bo'lgan inson markazidagi tasvir va chiziqli hikoya tuzilmasidan chekinish orqali Dekartga xos insonni alohida va ustun qo'yuvchi qarashlar shubha ostiga olinadi hamda noinsoniy mavjudotlarning ham faol ishtiroki ko'rsatiladi. Masalan, Dale Pendellning "The Great Bay" (2010) asarida tabiatning o'zi hikoyachi sifatida namoyon bo'ladi. Antropomorfizm ya'ni insoniy xususiyatlarni boshqa mavjudotlarga yuklash esa hukmron insoniy o'zlik haqidagi tasavvurlarni qayta ko'rib chiqishga undovchi kuchli vosita bo'lishi mumkin. "The Swan Book" romanida Alexis Wright Avstraliya tub aholisi e'tiqodlariga tayangan holda insoniy va noinsoniy ta'sir chegaralarini xiralashtiradi, hamda qora oqqushlarga nisbatan ekologik zo'ravonlikni o'z xalqiga nisbatan qilingan adolatsizliklar bilan uyg'unlashtiradi. Bu asar Val Plumwood tomonidan ta'riflangan G'arb madaniyatiga xos androtsentrik, yevrotsentrik, etnotsentrik va antropotsentrik qarashlarni ochiq tanqid qiladi.

Iqlim o'zgarishiga bag'ishlangan adabiyotlarga bo'lgan katta qiziqish faqat ularni targ'ib qiluvchi va sharhlovchi ko'plab veb-saytlar bilan cheklanmaydi. Bu qiziqish natijasida turli universitetlarda cli-fi bo'yicha maxsus kurslar ham yo'lga qo'yilgan. Eng muhim savollardan biri badiiy adabiyot va kino ekologik ta'limda qanday o'rin tutishi mumkinligi. Cli-fi asarlarini o'rganish jarayonida ko'pincha narrativ vositalarning iqlim muammosiga e'tibor qaratish va munosabatni o'zgartirishdagi roli tahlil qilinadi; bu orqali Timothy Clark ta'riflagan "Antropotsen tartibsizligi"ga javob izlanadi. Talabalar, o'smirlar adabiyotida qahramonlar va ularga taqlid qilish imkonini beruvchi obrazlar qanday yaratilishini o'rganishlari, shuningdek, nuqtayi nazar va boshqa badiiy vositalar orqali o'quvchi yoki tomoshabinning qahramon bilan o'zini bog'lash jarayoni

qanday shakllanishini tahlil qilishlari mumkin. Bundan tashqari, adabiyotning tasviriy kuchi ranglar, tovushlar, hidlar, ta'm va sezgilarni jonli ifodalash orqali hikoya olamini "haqiqiy"dek his qildirish qobiliyati tabiatga nisbatan sezgirlikni oshiradi. Bu xususiyat "Frozen" (2013) dan tortib "The Lamentations of Zeno" gacha bo'lgan asarlarda namoyon bo'lib, kundalik hayotda global isish ta'sirini sezmay qolishga olib keluvchi hissiy "beparvolik"ni kamaytirishga xizmat qiladi.

Matnlarni tahlil qilish jarayonida e'tibor, avvalo, ularda iqlim o'zgarishiga oid berilgan faktik ma'lumotlarning qamrovi va ishonchliligiga, bu ma'lumotlarning syujetga qanchalik mahorat bilan singdirilganiga hamda o'quvchining kundalik tajribasi bilan qanchalik bog'lanishiga qaratilishi mumkin. Yoki tahlil boshqa yo'nalishda olib borilib, bir tomondan bilim tarqatish va kelajak avlodlar oldidagi axloqiy mas'uliyatni muhokama qilish, ikkinchi tomondan esa estetik talablar o'rtasidagi murakkab munosabatlar o'rganilishi mumkin. Shuningdek, asarda ochiq-oydin pand-nasihatga berilib ketishdan qanday va qay darajada muvaffaqiyatli tarzda qochilganiga e'tibor berish muhim. Diqqatga sazovor jihatlardan biri shundaki, ko'plab hikoyalar iqlim o'zgarishini bevosita emas, balki bilvosita tarzda tasvirlaydi masalan, isish emas, aksincha sovish jarayonlari orqali. Bundan tashqari, muallifning jamoatchilik muhokamalariga qanchalik darajada ta'sir o'tkazishga intilgani ham muhim savol sifatida qo'yiladi, u faqat ma'lumot berish bilan cheklanadimi, iqlim o'zgarishining muayyan talqinini va ehtimoliy yechimlarini ilgari suradimi yoki, ehtimol, o'quvchini mustaqil va tanqidiy fikrlashga undashni asosiy maqsad qilib qo'yadimi?

Ikkinchi yondashuv sifatida "spekulyativ badiiyot" (Atvud tomonidan "ilmiy fantastika" o'rniga taklif etilgan atama) imkoniyatlarini o'rganish mumkin. Bu yo'nalishda turli matnlarni o'ziga xos fikriy tajribalar sifatida taqqoslab, ular orqali hozirgi tendensiyalardan kelib chiqib kelajak qanday tasavvur qilinayotganini tahlil qilish muhim. Bunda turli sharoitlarda qabul qilingan qarorlarning ehtimoliy oqibatlari ko'rib chiqiladi va ular, masalan, IPCC hisobotlarida keltirilgan ilmiy ssenariylar bilan qiyoslanadi. Shuningdek, asarlar iqlim o'zgarishining asosiy sabablarini qanday talqin qilayotgani, hamda ekologik inqirozni ijtimoiy tengsizlik yoki gender munosabatlari bilan qanday bog'layotgani ham tanqidiy tahlil qilinishi mumkin. Uchinchi turdagi savollar esa bevosita estetikaga taalluqli bo'lib, shu orqali yana axloqiy masalalarga qaytiladi. Triller, falokat romani yoki ilmiy fantastika kabi janrlar iqlim o'zgarishini tasvirlashda qanday rol o'ynaydi, ular qanday cheklovlar keltirib chiqaradi va mualliflar bu cheklovlarni qay darajada yenga olgan bu muhim masalalardandir. Shuningdek, narrativ va vaqt tuzilmasi masalan, xotira va tushlar orqali hozirgi zamon bilan kelajakni bog'lash global isishning ulkan makoniy va zamoniy ko'lami bilan inson tajribasi o'rtasidagi tafovutni qanday bartaraf etishi ham o'rganiladi.

Prolog va epiloglar orqali berilgan "ramkalar", ikkiyoqlama xarakterga ega qahramonlar ("The Lamentations of Zeno" dagi qahramon kabi) yoki ishonchsiz nuqtayi nazar egalaridan foydalanish (Take Shelter (2011) filmida) ekologik diskursdagi odatiy stereotiplarni murakkablashtirish va tanqid qilishda qanday rol o'ynashi ham tahlil qilinadi. Shuningdek, fantastika va mif kabi mimetik bo'lmagan narrativ shakllar, diniy va adabiy ishoralar qanday qo'llanayotgani, ota-ona va bola o'rtasidagi murakkab munosabatlar, kannibalizm, muz, suv toshqinlari yoki kibernetik mavjudotlar kabi obrazlarning keng ramziy ma'nolari ham qiyosiy tahlil uchun muhim material bo'la oladi.

Xulosa. Ushbu matn iqlim o'zgarishi mavzusiga bag'ishlangan badiiy adabiyot va kino asarlarining (cli-fi) rivojlanishi, janr xususiyatlari hamda ularning estetik va axloqiy vazifalarini keng qamrovda tahlil qiladi. Unda cli-fi'ning ilmiy fantastika, triller, distopiya, apokaliptik va boshqa janrlar bilan o'zaro aloqasi, shuningdek, turli narrativ strategiyalar orqali global isish muammosini ifodalash usullari yoritiladi. Matnda iqlim o'zgarishini tasvirlashda qo'llaniladigan allegoriya, ramziylik, satira, ishonchsiz hikoya qiluvchilar va non-mimetik shakllarning ahamiyati hamda ularning o'quvchi idroki va empatiyasiga ta'siri tahlil qilinadi. Shuningdek, cli-fi asarlarining ilmiy ma'lumotlar bilan badiiy tasavvurni uyg'unlashtirishdagi o'rni, hamda ularning ekologik ong va ijtimoiy mas'uliyatni shakllantirishdagi pedagogik imkoniyatlari ko'rsatib beriladi.

Yakuniy xulosaga ko'ra, cli-fi zamonaviy adabiyotda faqat iqlim muammosini tasvirlash vositasi emas, balki inson, tabiat va jamiyat o'rtasidagi murakkab munosabatlarni qayta anglashga xizmat qiluvchi muhim madaniy va intellektual maydon sifatida namoyon bo'ladi.

ADABIYOTLAR:

1. Rodge Glass, 'Global warning: The rise of "cli-fi", *The Guardian* (31 May 2013); Pilita Clark, 'Global literary circles warm to climate fiction, *Financial Times* (31 May 2013).
2. Adam Trexler and Adeline Johns-Putra, 'Climate Change in Literature and Literary Criticism', *WIRES Climate Change* 2/2 (March/April 2011), 185-200; here 196.

3. Adam Trexler, *Anthropocene Fictions: The Novel in a Time of Climate Change* (Charlottesville: University of Virginia Press, 2015), 8. ↑
4. Mike Hulme, *Why We Disagree about Climate Change* (Cambridge: Cambridge University Press, 2009), 42-60, and Spencer R. Weart, *The Discovery of Global Warming* (Cambridge, MA: Harvard University Press, 2008).
5. E. Ann Kaplan, *Climate Trauma: Foreseeing the Future in Dystopian Film and Fiction* (New Brunswick, NJ: Rutgers University Press, 2015). See also Michael Svoboda, 'Cli-Fi on the Screen(s): Patterns in the Representations of Climate Change in Fictional Films, *Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change* 7/1 (2016), 43-64.
6. Axel Goodbody, "Telling the Story of Climate Change: The German Novel in the Anthropocene, in Caroline Schaumann and Heather I. Sullivan, eds, *German Ecocriticism in the Anthropocene* (New York: Palgrave Macmillan, 2017), 293-314; and the essay by Reinhard Hennig in this volume.
7. Erin James, *The Storyworld Accord: Econarratology and Postcolonial Narratives* (Lincoln and London: University of Nebraska Press, 2015); Alexa Weik von Mossner, *Affective Ecologies. Empathy, Emotion and Environmental Narrative* (Columbus: Ohio State University Press, 2017).
8. Martha C. Nussbaum, *Upheavals of Thought: The Intelligence of Emotions* (Cambridge: Cambridge University Press, 2001), 319.
9. Diana McCaulay, Michael Mendis and Maggie Gee, "The Untold Story: The Environment in Fiction, *Hay Festival*, 29 May 2014.
10. Frederick Buell, *From Apocalypse to Way of Life: Environmental Crisis in the American Century* (London: Routledge, 2003), xvii, 244-6.
11. Two prominent examples are Timothy Morton's concept of hyperobjects in *Hyperobjects: Philosophy and Ecology after the End of the World* (Minneapolis: University of Minnesota Press, 2013) and Timothy Clark's analysis of Anthropocene disorder and scale effects in *Ecocriticism on the Edge: The Anthropocene as a Threshold Concept* (London: Bloomsbury, 2015), 139-55.
12. Ursula K. Heise, *Sense of Place and Sense of Planet: The Environmental Imagination of essay in the Global* (Oxford: Oxford University Press, 2008), 205-10. See also Heise's this volume.
13. On climate change as a 'wicked' problem, see Hulme, *Why We Disagree about Climate Change*, 334.
14. Ian Baucom, "Moving Centers": *Climate Change, Critical Method, and the Historical Novel*, *Modern Language Quarterly* 76/2 (2015), 137-57
15. For a discussion of the relationship between apocalypse and pastoral, see Greg Garrard, *Ecocriticism* (Abingdon: Routledge, 2012), 99 and Heise, *Sense of Place and Sense of Planet*, 141-2.
16. Timothy Clark, *The Cambridge Introduction to Literature and the Environment* (Cambridge: Cambridge University Press, 2011), 192.