ИОН-ПЛАЗМА ВА ЛАЗЕР ТЕХНОЛОГИЯЛАРИ ИНСТИТУТИ ҲУЗУРИДАГИ ИЛМИЙ ДАРАЖАЛАР БЕРУВЧИ DSc.02/30.12.2019.FM.65.01 РАҚАМЛИ ИЛМИЙ КЕНГАШ

ЎЗБЕКИСТОН МИЛЛИЙ УНИВЕРСИТЕТИ

ҚАСИМОВ АБДУГАППАР КАХАРОВИЧ

ИЗОТРОП МУҲИТЛАРДА ЛАЗЕР НУРИ ТАРҚАЛИШИ

01.04.05- Оптика

ФИЗИКА-МАТЕМАТИКА ФАНЛАРИ ДОКТОРИ (DSc) ДИССЕРТАЦИЯСИ АВТОРЕФЕРАТИ

ТОШКЕНТ – 2022

УДК: 621.373

Докторлик (DSc) диссертацияси автореферати мундарижаси

Оглавление автореферата докторской (DSc) диссертации

Contents of the Doctoral (DSc) Dissertation Abstract

Касимов Абдугаппар Кахарович
Изотроп муҳитларда лазер нури тарқалиши……..……. **3**

Касимов Абдугаппар Кахарович
Распространение лазерного излучения в изотропной среде...…… 28

Kasimov Abdugappar Kakharovich
Propagation of laser radiation in an isotropic medium……..…….. **53**

Эълон қилинган ишлар рўйхати
Список опубликованных работ
Эълон қилинган ишлар рўйхати
List of published works ……..……...…….....…..... **65**

ИОН-ПЛАЗМА ВА ЛАЗЕР ТЕХНОЛОГИЯЛАРИ ИНСТИТУТИ ҲУЗУРИДАГИ ИЛМИЙ ДАРАЖАЛАР БЕРУВЧИ DSc.02/30.12.2019.FM.65.01 РАҚАМЛИ ИЛМИЙ КЕНГАШ

ЎЗБЕКИСТОН МИЛЛИЙ УНИВЕРСИТЕТИ

ҚАСИМОВ АБДУГАППАР КАХАРОВИЧ

ИЗОТРОП МУҲИТЛАРДА ЛАЗЕР НУРИ ТАРҚАЛИШИ

01.04.05- Оптика

ФИЗИКА-МАТЕМАТИКА ФАНЛАРИ ДОКТОРИ (DSc) ДИССЕРТАЦИЯСИ АВТОРЕФЕРАТИ

ТОШКЕНТ – 2022

Докторлик (DSc) диссертацияси мавзуси Ўзбекистон Республикаси Вазирлар Маҳкамаси ҳузуридаги Олий аттестация комиссиясида B2017.2.DSc/FM76 рақам билан рўйхатга олинган.

Диссертация Ўзбекистон Миллий университетида бажарилган.
Диссертация автореферати уч тилда (ўзбек, рус, инглиз (резюме)) Илмий кенгаш веб-саҳифаси (http://iplt.uz/) ва "ZiyoNet" ахборот-таълим порталида (www.ziyonet.uz) жойлаштирилган.

Илмий маслаҳатчи:	**Бахрамов Сагдилла Абдуллаевич** физика-математика фанлари доктори, академик
Расмий оппонентлар:	**Рахматуллаев Илёс Арзимуродович** физика-математика фанлари доктори
	Семенов Денис Иванович физика-математика фанлари доктори
	Болтаев Ганжабай Сапаевич физика-математика фанлари доктори
Етакчи ташкилот:	**Ислом Каримов номидаги Тошкент давлат техник университети**

Диссертация ҳимояси Ион-плазма ва лазер технологиялари институти ҳузуридаги DSc.02/30.12.2019.FM.65.01 рақамли Илмий Кенгашнинг 2022 йил «22» 02 соат 1430 даги мажлисида бўлиб ўтади. (Манзил: 100125, Тошкент шаҳри, Дўрмон йўли кўчаси, 33-уй. Тел./факс: (99871) 262-32-54, e-mail: info@iplt.uz (Ион-плазма ва лазер технологиялари институти мажлислар зали).

Диссертация билан Ион-плазма ва лазер технологиялари институтининг Ахборот-ресурс марказида танишиш мумкин (1 рақам билан рўйхатга олинган). Манзил: 100125, Тошкент шаҳри, Дўрмон йўли кўчаси, 33-уй. Тел./факс: (99871) 262-31-69.

Диссертация автореферати 2022 йил«09» 02 куни тарқатилди.

(2022 йил «09» 02 даги 1 рақамли реестр баённомаси).

Х.Б. Ашуров
Илмий даражалар берувчи илмий кенгаш раиси, т.ф.д., профессор

И.Д. Ядгаров
Илмий даражалар берувчи илмий кенгаш илмий котиби, ф.-м.ф.д., катта илмий ходим

Б.Е. Умирзаков
Илмий даражалар берувчи илмий кенгаш қошидаги илмий семинар раиси, ф.-м.ф.д., профессор

КИРИШ (докторлик (DSc) диссертациясининг аннотацияси)

Диссертация мавзусининг долзарблиги ва зарурати. Лазер нурланиши ва классик манбаларнинг нурланиши ўртасидаги туб фарқ бу манбаларнинг фан ва техниканинг турли соҳаларида кенг қўлланилишига олиб келди. Лазер нурланишини қўллашнинг истиқболли йўналишларидан бири бу ахборотни қабул қилиш ва узатиш учун фойдаланишдир. Сўнгги ўн йилликларда лазер физикасининг жадал ривожланиши фемтосекунд оралиғида давомийлик билан импульсли оптик нурланиш ҳосил қилувчи қурилмаларни яратишга имкон берди. Бундай кичик вақт ва макон оралиқларида энергиянинг локализацияси нурланиш майдонларининг кучини атом ичидаги майдон қийматлари билан таққосланадиган ва ундан юқори қийматларга етказиш имконини берди. Изотроп муҳитда тарқаладиган нурланишнинг бундай юқори интенсивлиги лазер нурланишидан фойдаланиш учун янги истиқболларни очадиган чизиқли бўлмаган жараёнларнинг бутун мажмуасини келтириб чиқаради, улар орасида филаментация феномени ўзининг аниқ амалий қўлланилиши билан ажралиб туради. Масалан, атмосфера ифлосланишини сезиш ва об-ҳавони башорат қилиш учун кенг полосали лидарни яратиш имконияти, турли объектларни чақмоқ уришидан ҳимоя қилиш ва лазер масофасини аниқлашда ультра узоқ масофадаги нишонни аниқлаш ва бошқалар. Биринчи марта ёруғлик "ипи" (филамент) 1965 йилда Пилипецкий ва Рустамовнинг ишларида 20 МВт қувватга эга наносекундли лазер импульсларини органик суюқликлар билан тўлдирилган кювейтага фокуслашда қайд этилган. Бироқ, бу тажрибаларда ёруғлик ипининг узунлиги сантиметрларда ўлчанган ва бу тадқиқотлар ўзига кенг эътиборни жалб қилмади. 1990-йилларнинг ўрталарига келиб, ҳозирги фемтосекунд импульсли лазер нурланишининг филаментацияси, яна тадқиқотчиларнинг эътиборини тортди, чунки атмосферада бир неча метр узунликдаги чўзилган ёруғлик филаментлари олинган ва уларнинг узунлиги тажрибадан тажрибага кўпайган эди. Шаффоф, изотроп муҳитда лазер импульсларини филаментацияланиш жараёнида, энергиянинг фазо ва вақтнинг кичик оралиқларида локализацияси, плазма каналларининг пайдо бўлиши, коник эмиссияси, суперконтинуум нурланишининг шаклланиши, шунингдек нурланишнинг муҳит билан чизиқли бўлмаган ўзаро таъсирини кучайтириш билан бирга келади. Филаментация ҳодисаси атмосфера оптикасининг амалий муаммоларида, микрооптикада ва бошқа иловаларда лазерлардан фойдаланишнинг тубдан янги имкониятларини очди.

Филаментация шаффоф муҳитда тарқалаётган юқори кувватли, ультрақисқа лазер нурланишининг ўз-ўзи билан таъсирлашиш жараёнининг ташқи кўринишидир. Керр эффекти натижасида нурланишнинг ўз-ўзидан фокусланиши ва импульснинг тарқалиши пайтида, муҳит молекулаларнинг туннел ионланиши натижасида ҳосил бўлган зичлиги кам плазма томондан ушбу нурланишнинг дефокусланиши каби иккита чизиқли бўлмаган жараённинг динамик ўзаро таъсири. Бу ходиса натижасида нурланишнинг

фазавий ва частотавий ўз-ўзини модуляция қилиши учун шароит яратади. Шу сабабли филаментация кенг тўлқин узунлиги диапазонида (суперсонтинуум) кучли нурланиш ҳосил бўлиши билан бирга кечади. Бундай нурланиш атмосфера газлари таркибини масофадан туриб спектроскопик таҳлил қилиш учун катта имкониятлар очади. Ўз – ўзини фокуслаш нурланишни узоқ масофаларга деярли йўқотишларсиз узатиш имконияти беради. Белгиланган масофада филамент хосил қилиб, суперконтинуум нурланишини ҳосил қилиш ва атмосферани кенг полосада зондлаш, ёки узоқ масофаларда кенг полосада лазерли локацияни амалга ошириш филаментиациянинг жозибадор истиқболидир.

Лазер қурилмасининг чиқишидаги ёруғлик майдони бузилишларининг таъсири ва атмосферадаги турбулентлик туфайли синдириш кўрсаткичининг тасодифий узгариши филамент ҳосил бўлиши ва тарқалиш жараёнининг стохастизациясига олиб келади. Натижада, филамент ҳосил бўладиган йўлнинг узунлиги ва филаментнинг ўз узунлиги, яъни суперсонтинуум ҳосил бўладиган йўлнинг қисми, кенг полосали нурланишнинг интенсивлиги, ва унинг спектрал тақсимоти тасодифий бўлади. Шу билан бирга, гига ва тераватт қувватларининг импульсларида лазер нурланиши кундаланг кесимининг кичик қисмларида ўз-ўзини фокуслаш содир бўлади ва натижада кўп филаментларнинг хаотик дастаси ҳосил бўлади. Фемтосекундли лазер импульсида кўп филаментли нурнинг стохастизатсияси Керр ночизиқли муҳитда юқори интенсив ёруғлик майдонининг фазовий беқарорлигининг натижасидир. Лазер тизими чиқишидаги нурланиши интенсивлиги ва фазасининг бузилиши, муҳит синдириш кўрсаткичининг ўзгариши, кетма–кет импульсларда филаментларнинг тасодифий жойлашишига ва натижада локацияда, орқага қайтадиган сигнал тасодифий бўлиб қолишига олиб келади. Шу билан бирга, мультифиламент ҳосил бўладиган йўл қисмининг узунлиги, нур дастасидаги филаментлар сони, уларнинг ўзаро таъсири ва суперконтинуум нурланишиниг характеристикалари тўғрисидаги маълумотлар лазер локаторлари ва фемтосекунд диапазонида ишлайдиган лидерларни ишлаб чиқишда асосий кўрсаткичлар бўлиб ҳисобланади. Атмосферадаги аэрозоллар миқдори, ҳажми ва кимёвий таркибини тез аниқлаш - об-ҳавони олдиндан айтиб бериш, атроф-муҳитни муҳофаза қилиш, иқлим ўзгаришини назорат қилиш каби метеорологик тадқиқотларнинг асосий вазифаларидан биридир. Бу муаммони лидарлар - атмосферани оптик жиҳатдан зондлаш лазер қурилмаларисиз ҳал қилиш мумкин эмас. Шунинг учун юқорида келтирилган катталиклар ва жараёнларнинг статистик хусусиятларини аниқлаш, ва шу катталиклар ва жараёнларга таъсир этадиган параметрларини ва уларнинг таъсир даражасини аниқлашга йўналтирилган тадқиқотлар ўтказиш зарурдир.

Айни пайтда Ўзбекистон Республикасида атроф-муҳитни муҳофаза қилиш бўйича комплекс ишлар амалга оширилмоқда. Амалга оширилган ишлар кўламини ифодалаш учун Орол бўйи минтақасида экологик вазиятни яхшилаш бўйича олиб борилган ишларни эслашни ўзи кифоя. Бу ишларнинг

ажралмас қисми атмосфера ҳолатини оператив кузатиш ва об-ҳавони узгаришини олдиндан айтиб беришдир. Тақдим этилаётган олиб борилган тадқиқотлар реал вақт режимида атмосфера ҳолати тўғрисида маълумот олишга қодир бўлган лидарлар тармоғини ривожлантириш ва яратишга, шунингдек, Ер юзасини зондловчи аэро-космик лидарларни яратишга хизмат қилади. Мазкур диссертация иши маълум даражада Ўзбекистон Республикаси Президентининг ПҚ-№2909 от 20 апреля 2017 года "Олий таълим тизимини янада ривожлантириш чора – тадбирлари тўғрисида" ва ПҚ - №4358 от 17 июня 2019 года "2019 — 2023 йилларда Мирзо Улуғбек номидаги Ўзбекистон Миллий университетида талаб юқори бўлган малакали кадрлар тайёрлаш тизимини тубдан такомиллаштириш ва илмий салоҳиятни ривожлантириш чора-тадбирлари тўғрисида" Қарорларида белгиланган вазифаларни бажаришга хизмат қилмоқда:

Тадқиқотнинг республика фан ва технологиялари ривожланиши устувор йўналишларига мослиги. Диссертатсия устида ишлаш жараёнида олиб борилган тадқиқотлар Ўзбекистон Республикасида 2012-2020 йилларда фан ва техникани ривожлантиришнинг устувор йўналишларида қайд этилган "ПФИ-2 Физика, астрономия ва астрофизиканинг долзарб муаммоларини тадқиқ этиш" бандли устувор йўналишига мос холда бажарилди.

Диссертация мавзуси бўйича хорижий илмий-тадқиқотлар шарҳи[1]. Йирик кашфиётлар фан ва техниканинг турли соҳаларини ривожлантиришга сезиларли таъсир кўрсатади. Оптик нурланишнинг шаффоф, изотроп муҳитда, жумладан, Ер атмосферасида тарқалиши билан боғлиқ бўлган тадқиқотларга лазер физикаси ютуқларининг таъсири бунга ёрқин мисол бўла олади. Атмосферада радиотўлқинларнинг тарқалиши билан боғлиқ тадқиқотлар 20-асрнинг бошларидаёқ жадал суратда олиб борилган эди. Олинган натижаларнинг муҳим қисми В. И. Татарскийнинг 1967 йилда нашр этилган "Турбулент атмосферада тўлқинларнинг тарқалиши" фундаментал асарида тизимлаштирилган. Шу билан бирга, 60-йилларнинг бошларида, лазерлар ихтиро қилингандан сўнг, биринчи марта Г.А.Аскаръян (ФИАН, Москва) томонидан лазер нурланишини изотроп муҳитда ўз-ўзини фокуслаш имконияти тўғрисидаги таклиф қиритилди. Кейинги йилларда эса А.М. Прохоров ва В. В. Коробкин (ФИАН) ва M. T. Loy и Y. R. Shen (Калифорния университети, АҚШ)лар томонидан ноёб тажрибалар ўтказилди ва суюқликларда филаментация олинди. Кейинроқ Н.Г. Басов бир гуруҳ тадқиқотчилар (ФИАН) билан биргаликда ҳавода филаментация олди. Тажрибалар шуни кўрсатдики, лазер импульсининг изотроп муҳитда ўз-ўзини фокуслаши чегарага эга эффектидир. Шунинг учун, унинг барча хусусиятларини атмосферада намоён қилиш учун гигаВатт даражадаги қувватлар талаб қилинади.

Фемтосекундли лазерларни яратиш ва такомиллаштириш билан ўз-ўзини фокуслаш феноменига қизиқишлар яна жонланди. Титан-сафир актив элементли лазер билан, нурланиш филаментациясини хосил қилиш бўйича биринчи тажрибалар деярли бир вақтнинг ўзида бир нечта гуруҳлар

томонидан амалга оширилди, булар Мичиган университети (АҚШ) профессори G. Mourou бошчилигидаги гуруҳ, Палезо (Франция) политехника мактаби профессори A. Mysyrowicz бошчилигидаги гуруҳ, ва Россия-Канада қўшма гуруҳи профессорлар В.П. Кандидов (Ломоносов номидаги МДУ Халқаро ўқув ва илмий лазер маркази, Россия) ва S.L. Chin (Оптика, фотоника ва лазер маркази, Laval университети, Квебек Канада) бошчилигидаги гурухлардир. Юқоридаги ва бошқа кўплаб гуруҳларнинг тажрибаларида ўртача тўлқин узунлиги 800 нм бўлган нурланиш ёрдамида узунлиги юзлаб метрдан ортиқ бўлган филаментлар олинган. Ушбу ишларда, шунингдек, суперконтинуум ҳосил бўлиши, рангли ҳалқаларнинг шаклланиши ва нурланишнинг қайта фокусланиш ходисалари қайд этилган.

Ўз-ўзини фокуслаш ҳодисасига қизиқиш ҳозир ҳам сусаймайди, масалан, Франция ва Германиядаги бешта илмий тадқиқот марказлари тадқиқотчиларини бирлаштирувчи Teramobile француз–немис қўшма лойиҳаси яратилди. Лойиҳада филаментация ҳодисасини ўрганиш учун 5 тераВатт қувватга эга, импульс давомийлиги 100 фемтосекунд, импульс энергияси 350 мЖ бўлган лазердан фойдаланилади. Ҳавода филаментация ҳодисасини ўрганиш учун яқинда импульс давомийлиги 30 фемтосекунд ва импульс энергияси 640 мЖ бўлган Extreme Light (XL)-II лазер қурилмасидан фойдаланиш ҳақида хабар берилган. Европа космик агентлиги томонидан олиб борилаётган космик жойлаштиришга мўлжалланган фемтосекундли лазер тизимини яратиш бўйича тадқиқотлар катта истиқболга эга. Ушбу лойиҳанинг мақсади космосда жойлаштирилган қурилма орқали филаментация ҳодисасидан фойдаланиб атмосферани текширишдан иборат, нурларни қайд қилиш эса ердаги қабул қилувчи қурилмалар томонидан амалга оширилади, бу эса усулнинг сезгирлигини бир неча баробар ортишиги имкон беради.

Муаммонинг ўрганилганлик даражаси. Кўпгина илмий гуруҳлар томонидан олиб борилган тадқиқотлар шаффоф, изотроп, кондерсирланган муҳитлар ва газларда кучли ультрақисқа лазер нурланишининг ўз-ўзини фокуслаш ва филаментацияланиш ҳодисаларининг бир бирига мос келувчи изчил физик кўринишини яратишга имкон берди. Ушбу тадқиқотларда атмосферада лазер нурланишининг филаментацияси алоҳида ўрин тутади, чунки бу ҳодисани амалда қўллашнинг катта истиқболлари атмосферада ультрақисқа лазер импульсларининг тарқалиши билан боғлиқ. Ушбу тадқиқотлар туфайли нурланиш энергиясининг макон ва замонда динамик жойлашув жараёни тушунилди, хосил бўладиган узун ингичка “ёнувчи ип” – филамент хосил бўлиши физик асослари тушинтирилди (Chin Канада гуруҳи). Филаментация жараёни билан бирга юзага келувчи суперконтинуум нурланиши генерацияси ва унинг конуссимон характерга эга эканлиги аниқланди ва бу жараён содир бўлиши ўрганилди (Mourou груҳи, АҚШ). Битта лазер нури дастасида кўплаб филаментлар - мультифиламентация ҳосил бўлишининг асосий қонуниятлари (Франция–Германия гуруҳи) томонидан

ўрганилган. Филаментнинг “дайдиб юриши” - «блуждания филамента» жараёни аниқланди (Кандидов гуруҳи, МДУ).

Кўпгина тадқиқотларда атмосфера турбулентлигининг таъсири ва лазер нурлари геометриясининг номукаммаллиги туфайли нурланишнинг филаментацияланиш жараёнининг стохастикланиши таъкидланган, аммо статистик тадқиқот усулларидан фойдаланган ҳолда филаментация жараёнини тизимли таҳлил қилиш амалга оширилмаган. Кўп компонентли атмосферада турли объектлар томонидан сочилган ва турбулент атмосферада маълум масофани босиб ўтган нурланишни фотодетекторда қайд этишдаги хатоликларга оид саволлар ҳам четда қолдирилди.

Тадқиқотнинг диссертация бажарилган илмий-тадқиқот муассасасининг илмий-тадқиқот ишлари режалари билан боғлиқлиги. Диссертатсия иши Ўзбекистон Республикаси Фанлар Академияси Фундаментал тадқиқотларни қўллаб-қувватлаш жамғармаси грантларини амалга ошириш бўйича илмий-тадқиқот ишлари жараёнида амалга оширилган;

"Атмосфера турбулентлигининг ультрақисқа лазер импулслари филаментларининг шаклланиши ва тарқалишига таъсирини ўрганиш" 2006-2007 йиллардаги № 61-06 сонли шартнома;

“Атмосферада ультрақисқа лазер импулсларининг мултифиламентларининг шаклланиши ва тарқалишини текшириш”, 2008-2009 йиллардаги № 38-08-сонли шартнома;

"Атмосфера аэрозолида ультрақисқа лазер импулсларининг филаментация жараёнини ўрганиш" 2010-2011 йиллардаги № 14-10 сонли шартнома

Кейинги йилларда ЎзМУ физика факултети Оптика ва лазер физикаси кафедраси (ҳозирда Фотоника кафедраси) илмий иш режасига мувофиқ ишлар доирасида олиб борилди.

Тадқиқотнинг мақсади. Диссертация устида ишлаш жараёнида олиб борилган тадқиқотларнинг мақсади тасодифий жараёнларни ўрганишда қўлланиладиган, натижаларни қайта ишлашнинг статистик усулларидан фойдаланган ҳолда турбулент атмосферада юқори қувватли ультрақисқа лазер импульсларининг тарқалиш жараёнини ўрганиш. Тадқиқотнинг мақсади, шунингдек, кучсиз оптик майдонларни ўлчашдаги аниқликнинг статистик чегарасини аниқлаш. Бу турдаги масалалар лазер нури филаментлари ёрдамида атмосферани юқори катламларини зондлаш ва узоқ масофадаги нишонларни кенг полосали нурланиш билан локациялаш масалаларидан келиб чикади.

Ушбу мақсадга эришиш учун қуйидагилар **тадқиқотнинг вазифалари** этиб белгиланди:

атмосфера трассасининг хусусиятлари билан аниқланадиган қийматларига мос келадиган атмосфера турбулентлигини моделлаштириш методикасини, алгоритмини ва дастурини ишлаб чиқиш;

изотроп муҳитда Керр ночизиқлилиги таъсири шароитида, “нурлар траекториялари усули” яқинлашувида нурлар траекторияларининг ўзгаришини тавсифловчи рекурент ифодани олиш;

турбулент атмосферада ультрақисқа лазер импульсларининг ночизиқли фокусининг узунлигини аниқлаш учун ҳисоблаш алгоритмини ишлаб чиқиш ва дастурий таъминотни яратиш ва атмосфера турбулентлигини филаментлар шакилланиш жараёнига таъсири;

атмосфера аэрозолининг атмосферада лазер нурланишининг ультрақисқа импульсларининг тарқалишига ва нурланишнинг ўз-ўзидан фокусланиш жараёнига таъсири;

атмосфера турбулентлиги шароитида лазер импульсининг тарқалишига ва филамент ҳосил бўлишига бошланғич текисликдаги импульснинг фазовий шаклининг таъсири;

лазер нурланиши импульси керр мухитида тарқалишида, мультифиламентдаги филаментлар сони импульс қуввати ва босиб утилган масофага боғликлиги.

берилган шамол режимида турбулент атмосферада ультрақисқа импульслар кетма-кетлигининг тарқалишигда, нурланишнинг ютилиши туфайли, синдириш кўрсаткичининг ўзгаришига таъсири;

кучсиз нурланишни қайд қилишда, фотосаноқлар нисбий дисперсияси β_n^2 ва ёруғлик интеграл интенсивлигининг тахсимотини саралаш вақтига боғликлиги;

фотосаноқлар корреляция функцияси ва интеграл интенсивлик тақсимоти орасидаги боғланишни турли саралаш вақтларида аниклаш;

турли саралаш вақтларида қабул қилиш қурилмасининг “ўлик холатидаги вақтини” фотосаноқлар тақсимотига таъсири аниқлаш. Фотосаноқлар тақсимоти турбулент атмосферада тарқалган нурланишнинг флуктуацияларини аниқлаш учун қўлланилади

Тадқиқотнинг объекти сифатида ўз-ўзини каналлаштириш режимида турбулент атмосферада тарқаладиган юқори қувватли ультрақисқа лазер импулси танланган.

Тадқиқотнинг предметини чизиқли бўлмаган Керр эффекти таъсири остида турбулент атмосферада кучли ультрақисқа лазер пульсининг ўз-ўзини фокуслаш жараёни ва нурланишнинг Керр фокусировкаси ва нурланиш натижасида ҳосил бўлган кам зичликдаги плазма томондан дефокусланиши ўртасидаги динамик мувозанат туфайли лазер нурланишининг филаментацияси ташкил этади.

Тадқиқотнинг усуллари. Диссертацияда қўйилган муаммоларни ҳал қилиш учун ҳал қилинаётган муаммога қараб турли усуллардан фойдаланилган: изотроп муҳитда элементар нурларнинг тарқалишини тавсифловчи рекурент ифодаларни олиш учун аналитик усуллардан, таркибида аэрозоллар бўлган турбулент атмосферада нурланишнинг филаментланиш жараёнига таъсир этувчи қонуниятларни аниқлаш учун математик моделлаштириш усулларидан ва кучсиз оптик нурланишни қайд

этишда интеграл интенсивликнинг тақсимотини фототокни аниқлаш аниқлигига таъсирини ўрганиш учун тажриба модели усули.

Тадқиқотнинг илмий янгилиги қуйидагилардан иборат:

биринчи марта филаментнинг ҳосил бўлиш ва тарқалиш ҳолатига мос келадиган цилиндрик симметрик муҳитда нурлар траекторияларининг ўзгаришини тавсифловчи рекурент ифода олинди. Кейинчалик муҳитнинг цилиндрик симметрик бўлиши талаби интенсивлик тақсимотининг градиенти ёрдамида олиб ташлаш мумкинлиги кўрсатилди;

биринчи марта турбулент атмосферада ва аэрозолларни ўз ичига олган атмосферада нурланишнинг тарқалишини моделлаштириш учун тасодифий линзалар моделидан фойдаланиш имконияти кўрсатилди, бу филаментнинг ўртача узунлигини аниқлашда флуктуацияларни камайтириш имконини бериши аниқланди.

атмосфера аэрозолининг ультрақисқа импульсларнинг тарқалишига ва атмосферада филамент ҳосил бўлишига таъсири тадқиқ этилди ва биринчи марта лазер нурланиши импулсларининг тарқалишига аэрозолнинг таъсири аърозол ўлчамларига боғликлиги аниқланди;

нурнинг эллиптиклик даражаси ультрақисқа лазер импульсининг тарқалишига ва ўз-ўзини фокуслашга, критик қувватдан ўнлаб марта катта қувватга эга бўлган импульсларда тадқиқ этилди, ва даста эллиптиклик даражасини ўзгартириб, ночизиқли фокус масофасини узунлигини ва филамент узунлиги бошқариш мумкинлиги аниқланди;

атмосферада ультра қисқа импулсларнинг тарқалишида нурланишнинг ютилиши туфайли муҳитнинг синдириш кўрсаткичи ўзгариши тадқиқ қилинди ва биринчи марта ютилиш натижасида атмосферада нуртола хосил бўлиши ва у импульс билан биргаликда шамол таъсирида силжиши мумкинлиги аниқланди;

Гаусс тақсимотига бўй синмайдиган майдон учун фотосаноқларнинг нисбий дисперсияси β_n^2 саралаш вақтига боғлиқлиги тадқиқ қилинди. Биринчи марта интеграл интенсивликни тақсимоти саралаш вақтига боғлиқ эмаслиги аниқланди. Саралаш вақтига тақсимот параметри боғликлиги аниқланди;

биринчи марта интенсивлик тақсимотини фотосаноқларнинг битта корреляция функциясини ўлчаш орқали, турбулент атмосферада тарқалган лазер нурланиши фотосаноқларининг статистик характеристикаларини, саралаш вақтининг кенг диапазонида, шу жумладан $T \approx \tau_c$ холат учун хам, аниқлаш мумкинлиги кўрсатилди.

Тадқиқотнинг амалий натижалари берилган турбулентлик характеристикалари билан силжиб йиғиш усулида атмосферадаги турбулентликни моделлаштирувчи фазали экранларни яратиш алгоритми ишлаб чиқишдан иборат. Ёруғлик дастаси эллиптиклигининг ўз-ўзини фокуслаш пайтида чизиқли бўлмаган фокус узунлигини ва филаментация пайтида филамент узунлигини оширишга ёрдам бериши кўрсатилди. Лазер нурланиши ультрақисқа импулсларининг кетма-кетлиги атмосферада тарқалиш жараёнида олдинги импульс нурланишининг қисман ютилиши

ҳисобига кейинги импульс учун нуртола ҳосил бўлиб, у трассага ён томондан эсадиган шамол таъсирида силжиб кетиши мумкинлиги кўрсатилди. Фотосаноқлар статистикасига қабул қилувчи қурилманинг "ўлик вақти" таъсирини аниқлаш алгоритми ишлаб чиқилди ва дастур яратилди, бу эса фотосаноқларни тақсимотида тегишли тузатишларни тезкорлик билан киритиш имконини беради.

Тадқиқот натижаларининг ишончлилиги тадқиқот методологиясининг асослилиги, статистик ва ночизиқли оптиканинг асосли усуллари ва ёндашувларидан фойдаланиш, натижаларни сифатли ва аниқ қайта ишлаш усулларидан фойдаланиш билан таъминланади. Тузилган хулосаларнинг ишончлилиги атмосферада ультрақисқа лазер импульсларининг тарқалиши бўйича тадқиқотлар соҳасида ишлайдиган бошқа муаллифларнинг натижалари билан ўзаро мос келишига асосланади.

Тадқиқот натижаларининг илмий ва амалий аҳамияти. Олинган натижалар ультрақисқа импульсларни ўз-ўзи фокуслаш жараёни хақида тасаврни кенгайтиради. Нур траекториялари усули ёрдамида турбулент атмосферада ультрақисқа лазер импульсларининг тарқалишини моделлаштиришнинг янги усули таклиф қилинди. Ишлаб чиқилган усул квазиреал тадқиқот режимида филаментацияланиш ўртача узунлигини аниқлаш ва ультрақисқа лазер импульслари ёрдамида атмосферани зондлашда тажрибаларни режалаштириш имконини беради. Тадқиқотларнинг амалий ахамияти, атмосфера ва бошқа объектларни масофадан туриб диагностика қилиш учун фемтосекундли лидарларда бир қатор ультрақисқа лазер импульсларининг тарқалиши пайтида нуртола каналнинг пайдо бўлиши ва унинг шамол ён компоненти таъсирида силжиши ҳисобга олиниши кераклиги курсатилди ва ўтаузоқ масофаларда ишлайдиган локация қурилмаларининг ишлашини оптималлаштириш учун турли хил намуна олиш вақтларида нурланиш интенсивлиги тақсимотини ўрганилди.

Тадқиқот натижаларининг жорий қилиниши. Цилиндрсимон қатламли муҳитда нурларнинг траекториясини тасвирлаш учун олинган рекурент муносабатлар хорижий нашрлардаги бир қатор тадқиқотларда (S. Johnson, F. Kuppers, S. Pau *Efficiency of continuous-wave solar pumped semiconductor laser,* Optics & Laser Technology, Volume 47, April 2013,

Pages 194-198; P. Reusswig, S. Nechayev, M. Tomes, T. Carmon, M. Baldo, and C. Rotschild *Efficient incoherent pumping for high-Q micro-lasers*, OSA Technical Digest (online) (Optical Society of America, 2012); H. Costa, J. Almeida, D. Liang, D. Garcia, M. Catela, B. D. Tibúrcio, C R. Vistas *Design of a multibeam solar laser station for a megawatt solar furnace* SPIE, Engineering Volume 59 · № 8 , AUGUST 2020 https://doi.org/10.1117/1.OE.59.8.086103); Vistas, C. R., Liang, D., Garcia, D., Tibúrcio, B. D., & Almeida, J. (2020). 32 W TEM 00-Mode Side-Pumped Solar Laser Design. Applied Solar Energy, 56(6), 449-457) фойдаланилган. Олинган натижалардан фойдаланиш, муаллифларга ҳозирги кунда турли лазерларининг ўзгартириш самарадорлиги бўйича

эришилган натижалардан сезиларли даражада юқори натижалар олиш мумкинлигини исботлаш имконини берди.

Диссертация иши доирасида бажарилган илмий ишлар асосида олинган, фотосаноқлар корреляцион функциясидан фотосаноклар тақсимот зичлиги функциясини тиклаш методикаси Ўзбекистон Миллий университети “Оптика ва лазер физикаси” кафедрасида Давлат амалий - тадқиқот дастурлари доирасида 2009 – 2011 йилларда бажарилган № ИТД 15-020 “Сочувчи муҳитлар диагностикаси учун лазерли фотон-корреляцион спектрометрни ишлаб чиқиш” (Разработка лазерного фотон-корреляционного спектрометра для диагностики рассеивающих сред) номли амалий тадқиқот лойихасида фойдаланилган (Ўзбекистон Миллий университети 2021 йил 24 ноябрь санасидаги № 01/11-7609 ракамли малумотномаси). Ушбу натижалардан фойдаланиш фотосаноклар тақсимот зичлиги функциясини фотосаноқлар корреляцион функциясидан диссертацияда келтирилган муносабат ёрдамида аниқлаш ва шу орқали ишлаб чиқилган қурилманинг самарадорлигини ошириш имконини берган.

Диссертация иши доирасида бажарилган илмий ишлар асосида олинган, атмосферада ультрақисқа лазер импульсларининг тарқалишида содир бўладиган ўз – ўзини фокуслаш жараёнини хақидаги маълумотлар, Тошкент давлат техник университети “Умумий физика” кафедрасида Давлат фундаментал – тадқиқот дастурлари доирасида (2012–2016) йилларда бажарилган № Ф2-49 “Фазовий модуляцияга эга квадратик ва кубик ночизикли сингдирувчанликли мухитларда ультрақисқа лазер импульсларини мухит билан квазисинхрон таъсирлашуви” (“Квазисинхронные взаимодействия сверхкоротких лазерных импульсов в средах с пространственной модуляцией квадратичной и кубической нелинейной восприимчивостью”) номли фундаментал тадқиқот лойиҳасида фойдаланилган (Тошкент давлат техник университети 2021 йил 22 ноябр санасидаги № 01/9-14-3302 ракамли малуьотномаси). Ушбу натижалардан фойдаланиш инерт газларда ультрақисқа лазер импульслари тарқалишида филаментация ходисасини олдини олиш ва инерт газларда иккинчи ва учинчи гармоникалар генерациялаш жараёнига таъсир этувчи омилларни камайтириш имконини берди.

Диссертацияда олинган шаффоф мухитларда ультрақисқа лазер импульсларини тарқалишини ифодалофчи рекурент муносабатдан Ўз ФА Ион-плазма ва лазер технологиялари институти Давлат фундаментал – тадқиқот дастурлари доирасида (2017-2020) йилларда бажарилган ОТ-Ф2-49 «Юқори қувватли субпетаватт фемтосекундли лазер нурланишини хосил қилиш ва унинг моддалар билан ўзаро таъсирини ва кучайтириш усулларини тадқиқ қилиш ва яратиш» («Исследование и создание методов генерации и усиления мощного субпетаваттного фемтосекундного лазерного излучения и его взаимодействия с веществом») номли фундаментал тадқиқот лойихасида фойдаланилган. Диссертация ишидан фойдаланиш оптик кучайтиргич ва ночизикли кристалда ультрақисқа, катта кувватли лазер импульслари

тарқалишида филаментация ходисасини олдини олиш ва филаментация туфайли қурилмаларни бузилишга олиб келувчи омилларни йўқотиш имконини берди.

Тадқиқот натижаларининг апробацияси. Диссертатсия иши натижалари 16 та халқаро ва республика конференцияларида маъруза қилинган ва муҳокамадан ўтган .

Тадқиқот натижаларининг эълон қилиниши. Диссертация мавзуси бўйича олинган натижалар 36 та илмий ишда тақдим этилган, шундан 11 та илмий мақола илмий-тадқиқот журналларида, шу жумладан, 5 та хорижий журналларда ва 6 та мақола Ўзбекистон Республикаси Олий аттестация комиссияси томонидан докторлик диссертатсияларининг асосий илмий натижаларини нашр этиш учун тавсия этилган республика илмий журналларида тақдим этилган, ҳалқаро илмий конференсияларда 10 та тезис, республика конференсияларида 14 та тезислар, битта компьютер дастурий маҳсулини рўйхатдан ўтказилганлиги тўғрисидаги гувоҳнома олинган.

Диссертациянинг ҳажми ва тузилиши. Диссертация иши 192 бетдан иборат бўлиб, кириш, бешта боб, хулоса, фойдаланилган адабиётлар рўйхати ва иловалардан иборат. Диссертацияга 49 расм киритилган.

ДИССЕРТАЦИЯНИНГ АСОСИЙ МАЗМУНИ

Кириш қисми диссертация мавзусининг долзарблиги ва унга талабнинг мавжудлигини асослайди, тадқиқот мақсади ва вазифаларини белгилайди, тадқиқот объекти, предмети ва усулларини белгилайди, олинган натижаларнинг илмий янгилиги, илмий ва амалий аҳамиятини белгилайди, ишончлилигини асослайди. натижалар, натижаларни амалга ошириш, ишнинг апробацияси ва диссертация тузилиши ҳақида қисқача маълумот беради.

Диссертациянинг **“Изотроп муҳитда лазер нурланишининг тарқалиши ва атмосферада ультрақисқа лазер пулсининг филаментланиши”** деб номланувчи биринчи бобида адабиётлар таҳлили асосида лазер физикасининг ривожланиши, лазер нурланишининг сифатини ошириши, нурланишни қабул қилувчиларни ва нурланишни қайд этиш усулларини такомиллашиши, лазер локацияси ва атмосферани зондлаш бўйича бир қатор масалаларни ечиш имконини берди.

21-асрда давом этган лазер физикасининг жадал ривожланиши бир қатор янги ҳодисаларни кашф қилиш имконини берди, улар орасида филаментация ҳодисаси ўзининг аниқ амалий қўлланилиши билан ажралиб туради. Масалан, атмосфера ифлосланишини назорат қилиш ва об-ҳавони башорат қилиш, турли объектларни чақмоқ уришидан ҳимоя қилиш ва бошқалар..

Филаментация шаффоф муҳитда тарқаладиган кучли ультрақисқа лазер нурланишининг ўз-ўзига таъсир қилиш жараёнининг ташқи кўринишидир. Икки ночизиқли жараённинг динамик ўзаро таъсири, яни, Керр эффекти натижасида нурланишнинг ўз-ўзидан фокусланиши ва импулснинг тарқалиши пайтида мухит молекулаларнинг туннел ионланиши натижасида ҳосил бўлган

паст зичликдаги плазма томондан нурланишнинг дефокусланиши, нурланишнинг ўз-ўзининг фаза ва частотасини модуляциялаши учун шароит яратади. Шунинг учун филаментация кенг полосада тўлқин узунлиги эга кучли нурланиш (суперконтиниум) ҳосил бўлиши билан бирга келади. Бундай нурланиш атмосфера газлари таркибини масофавий спектроскопик таҳлил қилиш учун катта имкониятлар очади. Нурланишни сезиларли масофаларга деярли йўқотишларсиз узатиш ва шу билан бирга суперконтиниум ҳосил бўлиш имконияти, ҳам зондлаш, ҳам лазер локацияси учун жозибадор истиқболдир.

Филаментланиш ҳодисаси фундаментал жараён эканлиги ва барча шаффоф изотроп муҳитларга хослиги кўрсатилган. Атмосферадаги филаментланиш жараёни тасодифий хусусиятга эга эканлиги ва уни тавсифлаш учун статистик маълумотларни қайта ишлаш усулларини жалб қилиш кераклиги кўрсатилган.

Диссертациянинг **"Атмосфера турбулентлиги ва унинг оптик нурланишнинг тарқалишидаги намоён бўлиши"** номли иккинчи бобида атмосферанинг хусусиятлари тавсифланади ва тасодифий бир жинсли бўлмаган муҳитларни тавсифлаш учун ишлатиладиган усуллар келтирилган. Атмосфера синдириш кўрсаткичининг n_1 тасодифий узгаришларини тавсифлаш учун статистик физика усулларидан фойдаланиш зарурлиги кўрсатилган ва n_1 тасодифий жараённинг энг муҳим статистик тавсифларидан бири фазовий автокорреляция функцияси бўлиб, у қуйидагича аниқланади,

$$\mathbf{R}_n(\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2) = \langle n_1(\mathbf{r}_1), n_2(\mathbf{r}_2) \rangle, \qquad (1)$$

бу ерда бурчак қавслари ансамбль бўйича ўртача қийматини билдиради.

Атмосферадаги n_1 фазовий стационар тасодифий жараён бўлгани учун, яъни, жараён статистик жихатидан стационар, у ҳолда унинг автокорреляция функцияси фақат координаталар фарқига боғлиқ ва уни қуйидагича ёзиш мумкин

$$\mathbf{R}_n(\mathbf{r}) = \langle n_1(\mathbf{r}_1), n_1(\mathbf{r}_1 - \mathbf{r}) \rangle, \qquad (2)$$

бу ерда $\mathbf{r} = \boldsymbol{r_1} - \boldsymbol{r_2} = (\Delta x, \Delta y, \Delta z)$. Винер-Хинчен теоремасига кўра, тасодифий жараённинг автокорреляция функцияси Фурье трансформацияси орқали ушбу жараённинг спектрал қувват зичлиги билан боғлиқдир. У холда n_1 тасодифий жараённинг спектрал зичлиги қуввати, $\mathbf{R}_n(\mathbf{r})$ катталикни уч ўлчовли Фурье алмаштириши билан аниқланади

$$\Phi_т(\varkappa) = \frac{1}{(2\pi)^3} \iiint_{-\infty}^{+\infty} \mathbf{R}_n e^{i\kappa r}\, d^3\mathbf{r} \qquad (3)$$

бу ерда $\boldsymbol{\varkappa} = (\varkappa_x, \varkappa_y, \varkappa_z)$ – фазовий частота вектори сифатида қаралиши мумкин бўлган тўлқин вектори, унинг ҳар бир компоненти радиан/метр бирликларида ўлчанади.

Изотроп муҳитда лазер нурланишининг тарқалишини моделлаштиришда нурланишнинг тарқалиш йўналишига перпендикуляр текисликдаги муҳитнинг синдириш кўрсаткичининг ўзгаришларининг

автокорреляция фукциясидан фойдаланиш кифоя. Бундай ҳолда, икки ўлчовли автокорреляция фукциясидан ва унга боғлиқ бўлган икки ўлчовли спектрал қувват зичлиги $n_1\ (r)$ координатаси z аниқланган текисликда фойдаланиш керак. Бу икки ўлчовли қувват спектрал зичлиги $F_n\left(\varkappa_x, \varkappa_y;\ z\right).$ функция билан ифодаланади. Икки ўлчовли автокорреляция фукцияси $B_n(\boldsymbol{\rho}; z)$, икки ўлчовли спектрал қувват зичлиги билан боғлиқ

$$F_n\left(\boldsymbol{\varkappa}; z\right) = \frac{1}{(2\pi)^2} \iint_{-\infty}^{+\infty} B_n\left(\boldsymbol{\rho}; z\right) \exp(i\varkappa\rho)\, d^2\boldsymbol{\rho} \qquad (4)$$

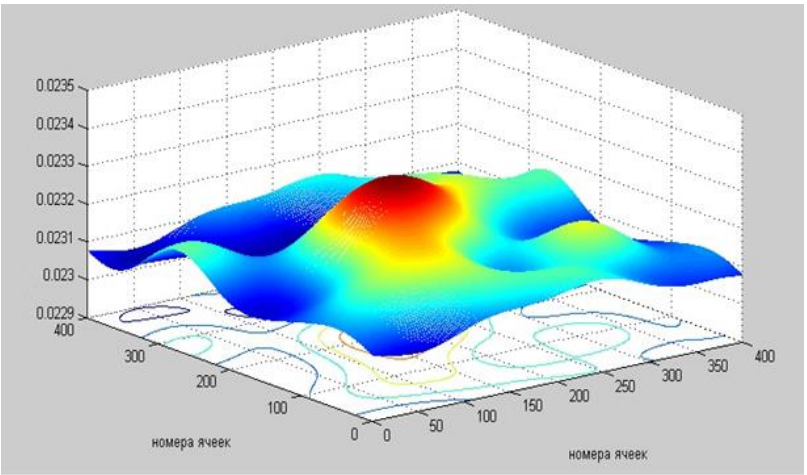
$$B_n\left(\boldsymbol{\rho}; z\right) = \iint_{-\infty}^{+\infty} F_n\ \left(\boldsymbol{\varkappa}; z\right) \exp(-i\varkappa\rho)\, d^2\boldsymbol{\varkappa} \qquad (5)$$

бу ерда энди $\boldsymbol{\varkappa} = (\varkappa_X\ , \varkappa_Y),\ \ \boldsymbol{\rho} = (\Delta x, \Delta y),$ ва таъриф бўйича автокорреляция функцияси $B_n\ (\boldsymbol{\rho}; z)$ – иккинчи тартибли аралаш момент

$$B_n\ (\boldsymbol{\rho}; z) = \langle n_1(\boldsymbol{\rho}_1\ ; z) * n_1\ (\boldsymbol{\rho}_1 - \boldsymbol{\rho}\ ; z)\rangle \qquad (6)$$

Нурланиш тарқалишида узлуксиз атмосфера турбулентлигининг таъсири тўлқин фазасининг тасодифий ўзгаришига олиб келади. Шунинг учун узлуксиз муҳитнинг таъсирини дискрет экранлар билан алмаштириш мумкин, бунда нурланиш фазаси узлуксиз муҳитда тарқалиш пайтида оладиган қийматга мувофиқ равишда, фаза экранда кескин ўзгартилади. Турбулентлик таъсирини тақлид қилувчи фазали экранлар Карман моделига асосланиб, сирпанувчи суммалаш усулидан фойдаланган ҳолда ишлаб чиқилган бўлиб, унда синдириш кўрсаткичи фазовий флуктацияси икки ўлчовли спектри қуйидаги кўринишда олинган,

$$F_n\left(k_x, k_y, k_z\right) = 0.33C_n^2 * \left(k^2 + k_0^2\right)^{-11/6}\ \left[\exp\left(-\frac{k^2}{k_m^2}\right)\right] \qquad (7)$$



1-расм. Бир фазали экран ўтилганда нурланиш майдонининг фазасидаги ўзгариш, радианларда. Абцисса ва ордината ўқлари 5 * 10^{-5} м қадамга эга бўлган фазовий ячейкалар сонлари.

бу ерда, k_x, k_y, k_z - частота фазосидаги координаталар , $k_0 = 2\pi/L_0$ и $k_m = 5.95/l_0$ – минимал ва максимал флуктуация частотаси, L_0 и l_0 – турбулентликнинг ташқи ва ички масштаби, C_n^2 - атмосфера синдириш кўрсаткичининг структуравий доимийси.

1-расмда атмосфера турбулентлиги тасодифий ҳолатини учун фаза экранидаги нурланиш майдонининг фазасининг ортирмаси қийматларини 1 м узунликдаги йўлни кўрсатаган. Тўлқин фазаси бундай ортирмани турбулент атмосферада ўтишига тўғри келади.

Ушбу фазали экранлар сериясида структуравий доимийнинг қиймати $C_n^2 = 5.0*10^{-14}$ м$^{-2/3}$ деб қабул қилинди. Юқорида айтиб ўтилганидек, бу қиймат кучли атмосфера турбулентлигига мос келади. Турбулентликнинг ташқи шкаласи трассанинг ер устидаги баландлиги билан аниқланади ва у L=1м га тенг деб олинган. Турбулентликнинг ички масштаби l=0.001м деб қабул қилинган.

Олинган натижаларнинг ҳақиқий экспериментал қийматларга мослигини текшириш учун фаза экранидаги нурланиш фазасининг структура функцияси ҳисоблаб чиқилди. Ҳисоб-китоблар нурланиш фазасининг структура функциясини аниқлаш учун мослаштирилган ифода асосида амалга оширилди,

$$D_\varphi(r_1, r_2) = \langle(\varphi_1(r_1) - \varphi_1(r_2)^2\rangle \quad (8)$$

Нурланиш фазасининг ўзгариши атмосферанинг синдириш кўрсаткичининг ўзгариши билан бевосита боғлиқ бўлганлиги сабабли, фазанинг структуравий функцияси қуйидаги қонунга мувофиқ ўзгаради деб тахмин қилиш мумкин

$$D_\varphi(r) = C_\varphi^2 * r^{2/3} \quad (9)$$

бу эрда C_φ^2 – турбулент муҳитда нурланишнинг тарқалиши туфайли тўпланган нурланиш фазасидаги флуктуациялар амплитудасини тавсифловчи қиймат. Натижалар таҳлили шуни кўрсатдики, ишлаб чиқилган дастурий маҳсулот ёрдамида олинган фазали экранлар фазасининг структуравий функцияси $r^{2/3}$ боғлиқлиги билан яхши тавсифланган. Машина тажрибаларида олинган маълумотларнинг (9) формула билан аниқланган ҳисобланганлардан кичик тасодифий оғишлари кузатилди. Бу оғишлар фазанинг структуравий фукциясини аниқлашда ўртача миқдорлар сонининг чекланганлиги билан боғлиқ.

Юқоридагилардан келиб чиққан ҳолда, ишлаб чиқилган модел атмосферада турбулентликнинг қисқа масофаларда атмосферада тарқаладиган лазер нурланишига таъсирини етарли даражада аниқлик билан такрорлайди деб айтиш мумкин. Узоқ масофаларда интенсивлик ўзгаришларининг тўйинганлик таъсирини ҳисобга олиш керак.

"Чизиқсиз фокуснинг ўртача узунлигини аниқлаш" номли учинчи бобда ультрақисқа лазер импулсларини ўз-ўзини фокуслашда ночизиқли фокусни аниқлаш учун нурни кузатиш усули (Ray – tracing metods) ишлатилган. Лазер чиқишидаги интенсивликнинг фазовий тақсимланишининг Гаусс тақсимотиги эга ва атмосфера синдириш кўрсаткичига n_0 га, ночизиқли қўшимчанинг $n(I)$ нурланиш интенсивлигига пропорционаллигига асосланиб, муҳитни аксиал симметрик деб ҳисоблаш мумкин. Ушбу тахмин цилиндрсимон симметрияга эга, қатламли муҳитда лазер нурланишининг тарқалишини ҳисобга олган ҳолда ночизиқли фокусни аниқлаш масаласини ечиш имкони беради. Сферик қатламли муҳитдаги нурлар траекторияси тенгламасига ўхшаш, аксиал қатламли муҳит учун қуйидагича ёзиш мумкин:

$$\frac{dr}{dx} = \frac{\sqrt{1+\frac{2n_2}{n_0}\frac{dI}{dr}dr - cos^2\theta}}{cos\theta} \quad (10)$$

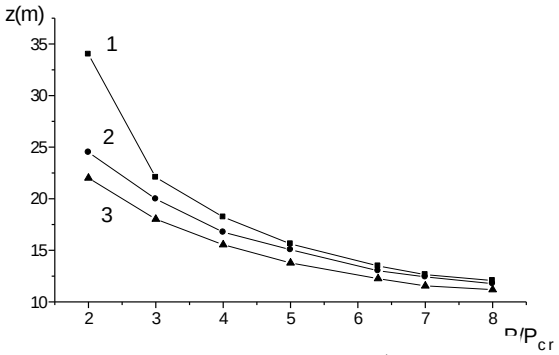
бу ерда, *r* - кўндаланг координата, n_0 - муҳитнинг синдириш кўрсаткичи, *dI/dr*- кўндаланг координатага нисбатан интенсивликнинг ҳосиласи, θ - лазер нурнинг *z* ўқи билан ҳосил қиладиган бурчаги.

Бир қатор ўзгартиришлардан сўнг, ҳар бир *dz* қадамда, кўндаланг координата *dr* ўсишини қуйидагича аниқлаш мумкин:

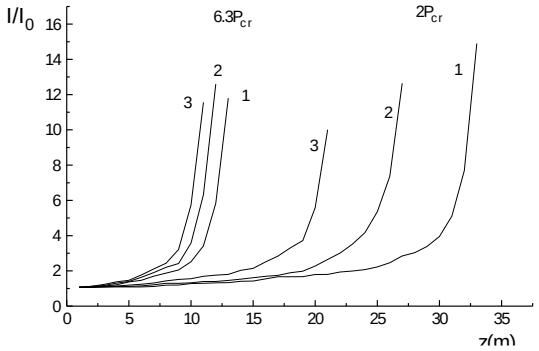
$$dr = \left[\frac{n_2}{n_0}\frac{dI}{dr} + \sqrt{\left(\frac{n_2}{n_0}\frac{dI}{dr}\right)^2 + \frac{cos^2\theta(1-cos^2\theta)}{dz^2}}\right] * \frac{dz^2}{cos^2\theta} \quad (11)$$

Олинган ифодадан фойдаланиб, компьютер модели ишлаб чиқилди, бу ерда нурланишнинг кундаланг кесими $\Delta x = \Delta y = 0.12$ мм қадам билан 100х100 квадрат тўрга бўлинган. Хар ячейка ичида интенсивлик ва ночизиқли қўшимча $n_2(I)$ битта кийматга эга деб қабул қилинган. Ҳисоб-китоблар икки ўлчамли Гаусс тақсимотига мувофиқ, бошланғич координаталари Монте-Карло усули билан *z=0* текислигида аниқланган нурларнинг траекториясини ўзгаришини кўриб чиқади.

2-расмда филаментация бошланишидан олдин нурланиш босиб ўтган йўл узунлигини аниқлаш бўйича тажрибалар натижаларини кўрсатилган. Бу ерда 1-эгри чизиқ дифракция таъсирини ҳисобга олган ҳол, 2-эгри чизиқ дифракция ҳисобга олинмаган хол, ва 3-егри чизиқ турбулентлик ва дифракция ҳисобга олган ҳолда олинган натижалар. Графиклардан кўриниб турибдики, нурланиш қуввати катта булганда дифракция таъсири камроқ бўлади. P=8*P_{cr} да дифракцияни ҳисобга олган ҳолда филаментация бошланишигача бўлган масофанинг нисбий узайиши 8% ни ташкил этди.



2-расм. Муҳитда чизиқли бўлмаган фокуснинг ҳосил бўлиш узунлигининг лазер импульсининг қувватга боғлиқлиги, 1 – фақат дифракцияни ҳисобга олган ҳолда, 2 - дифракцияни ҳисобга олмаганда, 3 - турбулент атмосферада дифракцияни ҳисобга олган ҳолда



3-расм. Муҳитда P=6.3P_{cr} ва P=2 P_{cr} қувватга эга бўлган импулснинг марказий кўндаланг кесимида (1) ва турбулент атмосферада C_n^2 (C_n^2(3) > C_n^2(2) нинг икки қийматида максимал интенсивликнинг нисбий ўзгариши.

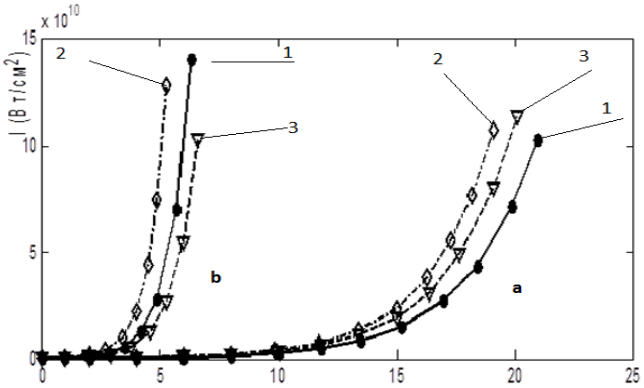
Импульс қувватининг пасайиши билан диффракциянинг таъсири кучаяди ва P=2*P_{cr} да у 55% ни ташкил этди.

Бизнинг ҳисобимизда амалга оширилган шартлар учун $P \geq 5 * P_{cr}$ да диффракция таъсири деярли аҳамиятсиз. Пастроқ қувват қийматларида диффракциянинг чизиқли бўлмаган фокус шаклланишининг узунлигига таъсирини ҳисобга олиш керак.

3-расмда марказий вақт қатламидаги энг юқори интенсивликнинг босиб ўтган масофага боғлиқлиги кўрсатилган. Тақдим этилган натижалардан кўриниб турибдики, турбулентлик таъсири марказий қатлам интенсивлигини ортиш жараёни тезлашишига олиб келади. 3-расмда интенсивлик ўзгариши қувватнинг икки қиймати ва C_n^2 нинг икки турли қиймати учун масофага боғлиқлиги кўрсатилган. Бу ерда таққослаш учун турбулентлик бўлмаганда интенсивликнинг боғлиқлиги кўрсатилган. Кутилганидек, бир хил турбулентлик ва $P=2*P_{cr}$ да, турбулентлик таъсири $P=6.3*P_{cr}$ га қараганда анча аниқ кўринди. Ҳар бир ҳолатда турбулентликнинг ошиши чизиқли бўлмаган фокус ҳосил бўлиш узунлигининг қисқаришига олиб келди.

Аэрозол зарралари ансамблининг таъсирини тавсифлаш учун муҳитнинг ўзи бир жинсли бўлмаганлигини тавсифлаш учун таклиф қилинган усул қўлланилади. Ушбу усулни дисперс муҳитга кенгайтириш таклиф этилади. Таклиф этилган усулга асосланиб, дисперс муҳит Δz кенглигидаги қатламлар кетма-кетлиги сифатида ифодаланади ва битта дисперс қатламда жойлашган барча зарралар битта текисликда, аерозол экрани деб аталадиган жойда тўпланади. Атмосфера турбулентлигининг таъсири бошқа фазали экран билан тавсифланади.

3.3-расмда бажарилган тажрибалар натижалари кўрсатилган. Тажрибалар марказий қатламдаги қалинлигининг иккита қиймати учун ўтказилди; **a-** P_0 = 30*10^9 Вт, **b -** P_0 = 300*10^9 Вт, бу ҳаводаги танқидий ўз-ўзини йўналтириш қувватидан 5 ва 50 баравар юқори. 1-чизиқ ҳар бир гуруҳда фақат Керр ночизиқлилигининг таъсири ҳолати учун олинган тажрибалар, 2-чизиқ турбулентлик ва Керр ночизиқлилиги таъсирини ҳисобга олган ҳолда тажрибалар, 3-чизиқ аерозоллар ва Керр ночизиқлилиги таъсирини ҳисобга олган ҳолда тажрибалар. Аерозол заррача диаметри d = 30 мкм бўлган монодисперс деб қабул қилинди.



4-расм. Импулснинг марказий вақт қатламидаги нурланиш интенсивлигининг босиб ўтган масофага боғлиқлиги

Тақдим этилган графиклардан кўриниб турибдики, P_0 = 30*10^9Вт (4-расм а-тўплам), ҳам турбулентлик, ҳам аерозолларнинг таъсири фокусланиш жараёнини тезлаштирди, аммо аерозолларнинг таъсири турбулентликдан кам

самаралидир. P_0 = 300*10^9 Вт (4-расм, б-тўплам) бўлганда, турбулентлик таъсири фокусланиш жараёнини тезлаштирди, аерозоллар таъсири фокуслаш жараёнининг секинлашишига олиб келди.

Катта аэрозоллар нурланишнинг тарқалишига ва филаментларнинг шаклланишига энг катта таъсир кўрсатади. Бу юқори қувватга эга бўлган импулсда аерозоллар ўлчамлари тартибидаги ва ўз-ўзини фокуслашнинг критик кувватидан юқори қувватга эга бўлимлар мавжудлиги билан изоҳланади. Бундай жойларда фокусланиш бўлади ва филамент шаклланишининг узунлиги қисқартирилади. Пастроқ қувватларда аэрозолларда фокусланиш муҳитнинг чизиқли бўлмаганлиги сабабли фокуслаш марказларини шакллантиришда бир жинслимасликларни келтириб чиқаради, бу эса нурнинг фазовий беқарорлигига олиб келади. Тажрибалар шуни кўрсатдики, кичикроқ ўлчамдаги (d~2 мкм ва ундан кам) аерозоллар, нурланиш кувватидан қатъи назар, филамент ҳосил бўлиш жараёнига деярли таъсир қилмайди.

Амалга оширилган рақамли тажрибалар асосида шуни айтиш мумкинки, атмосфера аерозолининг атмосферада ультрақисқа лазер импулсларининг тарқалишига таъсири нурланиш кучининг энг юқори қийматига ва аерозоллар ҳажмига боғлиқ. Юқори кувватларда катта аерозоллар фокусланиш жараёнини тезлаштиради. Кам қувватларда катта аерозолларнинг таъсири филамент шаклланиши жараёнини секинлаштиради. Кичик аерозоллар филамент шаклланишига деярли таъсир қилмайди.

“Тўлқин оптикаси яқинлашувида ультрақисқа лазер импулсларининг филаментатсияси” номли тўртинчи бобида фазали экран усули билан биргаликда тўлқин яқинлашувидан фойдаланган ҳолда олинган лазер нурланишининг филаментациясини ўрганиш бўйича рақамли тажрибалар натижалари келтирилган. Фазали экран усулидан фойдаланиш муҳитга ва нурланишга маълум чекловлар қўядиган бир қатор тахминларга асосланади. Ушбу чекловларни ҳисобга олган ҳолда, комплекс майдон амплитудаси $\boldsymbol{E}(\mathbf{r},z,t)$ қуйидагича ёзилиши мумкин

$$2ik_0\frac{\partial \boldsymbol{E}}{\partial z} = \Delta_\perp \boldsymbol{E} - k_0\frac{\partial^2 k}{\partial \omega^2}\frac{\partial^2 \boldsymbol{E}}{\partial \eta^2} + k_0^2\frac{\varepsilon_{\text{нл}}+\boldsymbol{\varepsilon}_{\text{но}}}{\varepsilon}\boldsymbol{E} - ik_0\alpha_\Sigma \boldsymbol{E}, \qquad (12)$$

бу ерда $\eta = t - z/u_{\text{гр}}$ - ҳамроҳлик қилувчи координаталардаги вақт, $k_0 = \omega\sqrt{\varepsilon\varepsilon_0\mu_0}$ - безовталанмаган муҳит учун тўлқин сони, ε_0 , μ_0 - электр ва магнит доимийлар, $\varepsilon = \text{Re}\,(\boldsymbol{\varepsilon})$, $\varepsilon_{\text{нл}} = \text{Re}\,(\boldsymbol{\varepsilon}_{\text{нл}})$, $\varepsilon_{\text{но}} = \text{Re}\,(\boldsymbol{\varepsilon}_{\text{но}})$. Сўниш коэффициенти қуйидаги муносабатларга бўйсунади

$$\alpha_\Sigma = \alpha + \alpha_{\text{не}} + \alpha_{\text{но}}, \qquad \alpha = -k_0\text{Im}(\boldsymbol{\varepsilon}),$$
$$\alpha_{\text{нл}} = -k_0\,\text{Im}(\boldsymbol{\varepsilon}_{\text{нл}}), \qquad \alpha_{\text{но}} = -k_0\,\text{Im}(\boldsymbol{\varepsilon}_{\text{но}}), \qquad (13)$$

Фазали экран усули, агар экранлар орасидаги масофа Δz эволюцион координата бўйлаб майдоннинг характерли ўзгариши узунлиги билан солиштирганда кичик бўлса, узлуксиз муҳитнинг хусусиятларини яхши тавсифлайди. Бу узунликларга қуйидагилар киради: ночизиқли узунлик $L_{\text{нл}}$, дисперсия узунлиги $L_{\text{дп}}$, дифракция узунлиги $L_{\text{дф}}$, сўниш узунлиги α. Бу шартни қуйидагича ёзиш мумкин

$$\Delta z \ll min\left\{L_{нл}, L_{дп}, L_{дф}, \alpha^{-1}\right\} \quad (14)$$

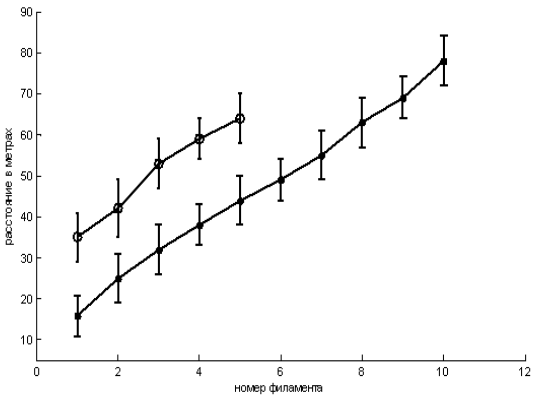
(14) шарт бажарилса, Δz қатламдаги ёруғлик майдонининг ўзгаришига чизиқли бўлмаганлик, дисперсия, дифраксия ва ютилиш таъсири унчалик катта эмас. Бу қалинлиги Δz бўлган чизиқли бўлмаган тасодифий бир ҳил бўлмаган муҳит қатламини иккита экран тизими сифатида тасвирлаш имконини беради. Улардан бири муҳитнинг бир ҳил бўлмаганлигидан келиб чиқадиган диелектрик ўтказувчанликнинг флуктуацияларини симуляция қилади, иккинчиси ташқи майдон томонидан индукция қилинган флуктуациялардир. Экспериментал шароитларга асосланиб, материалнинг тарқалиши ва нурланиш ютилишининг таъсирини эътиборсиз қолдириш мумкин. Плазманинг таъсири интенсивлик катталигига чеклов киритиш орқали ҳисобга олинади, у холда ультра қисқа лазер импулсларининг тарқалиши қуйдаги тенглама билан тавсифланиши мумкин

$$2ik_0\frac{\partial E}{\partial z} = \Delta_{\perp}E + 2k_0n_2|E^2|E + 2k_0n_1E \quad (15)$$

ва бу тенглама физик омилларга кўра бўлиниш усули билан ечилади. Юқоридагиларга асосланиб, турбулент атмосферада филаментларнинг ҳосил бўлиши ва тарқалишининг компютер модели ишлаб чиқилган. Ишлаб чиқилган модел ёрдамида нурнинг эллиптиклигининг лазер импулсларининг филаментациясига таъсири ўрганилди. Рақамли тажрибалар шуни кўрсатдики, нурнинг эллиптиклиги нур оқими бўйлаб бир бутун сифатида филамент ҳосил бўлиш масофасининг ошишига олиб келади, бунинг натижасида мултифиламентнинг умумий узунлиги думалоқ нурга нисбатан узайтирилади. Шу билан бирга, эллиптик нурнинг кесимидаги филаментлар сони, ўрта хисобда, думалоқ дастали нурга қараганда камроқ. Ушбу хулосалар эксперимантал ишлар натижалари билан яхши мос келади, бу ишларда линзалар тизими ёрдамида нурни эллиптик ҳолга келтирилганда филамент узунлигининг ошиши қайд этилган.

Атмосфера турбулентлигининг атмосферада филаментларнинг шаклланиши ва тарқалишига таъсирини аниқлаш учун тажрибалар ўтказилди. Тажрибалар шуни кўрсатдики, дастлабки текисликдан бир хил масофада жойлашган нурларнинг кўндаланг кесимида, катта турбулентликка эга бўлган йўл бўйлаб тарқалиш ҳолатида кўпроқ филаментлар мавжуд. Амалга оширилган рақамли тажрибалар асосида шуни таъкидлаш мумкинки, атмосфера турбулентлигининг ортиши, бошқа нарсалар тенг бўлса, нурнинг кесимида филаментлар сонининг кўпайишига олиб келади. Кесимдаги филаментлар сонининг кўпайиши ионлантиришга йўқотишларининг ошишига олиб келади, бу эса ўз навбатида умумий филамент узунлигини камайтиради. 5-расмда N-чи филаментнинг ҳосил бўлишининг ўртача узунлигининг нурдаги филаментнинг тартиб рақамига боғлиқ холда, максимал интенсивликга мос келадиган қувватнинг икки қийматида кўрсатилган.

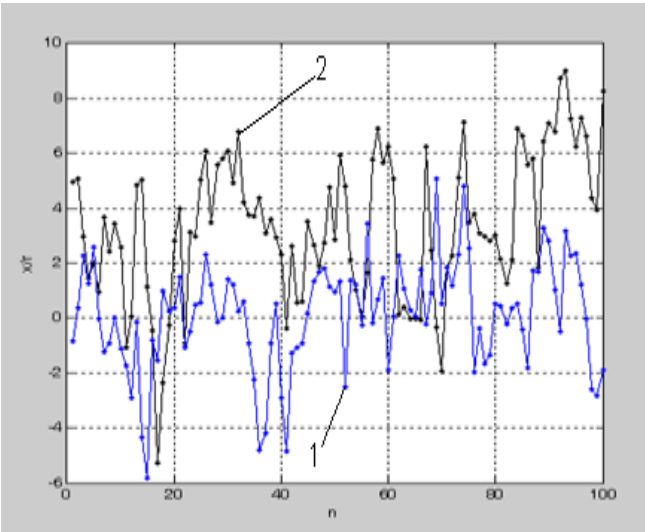
Критик қувватдан анча юқори бўлган нурланиш қувватларида, нурдаги филаментлар сони z масофаси билан ортади. Лазер импулс қуввати ошиши билан филаментлар лазернинг чиқиш диафрагмасига яқинроқ масофада



5-расм. Турли чўққи импулс қувватлари P_0 =1.0*10^{11} Вт (ёруғ доиралар), ва P_0 =5.0*10^{11} Вт (қоронғу доиралар) учун кейинги N –чи филамент шаклланишининг бошланишигача бўлган масофа z

шакллана бошлайди. 5-расмдан кўриниб турибдики, филаментнинг бошигача бўлган масофаларнинг тасодифий тарқалиши туфайли, умумий ҳолатда, импулсдан пулсгача бўлган нурланиш манбаидан маълум масофада қанча филамент ҳосил бўлишини аниқ айтиш мумкин эмас. Шу муносабат билан, кенг полосали зондлаш билан атмосферанинг бирлик ҳажмидаги аниқланган компонентлар сони тўғрисида маълумот олиш учун ахборотни қайта ишлашнинг статистик усулларидан фойдаланиш керак.

Бир қатор импулсларнинг тарқалиши жараёнида Керр эффектига қўшимча равишда, импульс кўндаланг кесимда интенсивликнинг нотекис тақсимланиши ва атмосферада нурланишнинг қисман ютилиши туфайли, нурланиш тарқалиш йўлида ҳарорат градиенти пайдо бўлади, бу эса ўз навбатида қўшимча тўлқин ўтказувчи канални яратади. Ушбу холат филаментацияланиш жараёнига таъсирини кўриш учун вақт бўйича корреляцияланган фаза экранларини симуляция қилувчи дастурий маҳсулот ишлаб чиқилди. Бу программа атмосфера ҳолатининг вақт бўйича эволюциясини ҳисобга олиш имконини берди.



6-расм Филамент бошланиши x-координатасининг корреляцияланган турбулент экранлар ва шамол мавжудлигидаги флуктуацияси. 1- шамол ўртача тезлиги нолга тенг, 2- шамол ўртача тезлик 0,2 м / с.

Тасир этувчи факторларни ажратиш усули билан биргаликда корреляцияган турбулент фаза экранлардан фойдаланган ҳолда рақамли тажрибалар ўтказилди, натижалари қуйида кўрсатилган. 6-расмда шамол тезлигининг икки хил қиймати учун бошланғич текисликдаги нурнинг марказига тўғри келадиган $X0Y$ текислигида чизилган x координаталари - радиус векторларининг компонентлари кўрсатилган. Расмда абцисса ўқи қатордаги импулсларнинг серия рақамларини, ординаталар ўқи эса бошланғич

текисликдаги нур радиусига нормаллаштирилган силжиш масофаларини кўрсатади. 6-расмда 1-эгри чизиқ нурланишнинг тарқалиш йўналишига кўндаланг йўналишда ўртача шамолнинг йўқлигига тўғри келади, 2 -эгри чизиқ ўртача шамол тезлиги $v_{\text{ср}}$ =0.2 м/с. Шамол тезлиги кўндаланг компонентининг флуктуациялари нормал тақсимланган, ва унинг дисперсияси $\sigma = 0.5$ деб қабул қилинди. Тажрибалар шуни кўрсатдики, ён шамол таъсирида термал канал жойидан силжийди ва лазер импулсини олиб кетади. Филамент бошланишининг х-координатасининг ўртача силжиш қиймати $\frac{t}{\tau}$ нисбатига боғлиқ ва бу нисбат 0,5 га тенг бўлганда, яъни синдириш кўрсаткичининг максимал бузилиши иссиқлик эффекти шамол таъсирида нур радиусининг ярмига силжиганда. Ён томондан шамол бўлмаса, ўртача силжиш йўқ ва чизиқли бўлмаган фокус кўндаланг текислик бўйлаб тасодифий "айланиб юради". Тажрибалардан кўриниб турибдики, атмосферада бир қатор лазер импулсларининг ўтишини тақлид қилишда нафақат турбулентлик ва Керрнинг ночизиқлилиги туфайли атмосфера ҳолатининг ўзгаришини, балки нурланишнинг атмосферага ён шамолга термал таъсири туфайли лазер нурлари силжишини ҳам ҳисобга олиш керак.

“Оптик диапазонда электромагнит нурланишни қайд қилиш аниқлигининг фундаментал чегаралари” номли бешинчи бобда атмосферани кенг полосали зондлаш қурилмаларида нурланишни қайд этиш жараёни бўйича нурланишнинг квант табиатини ўрганилган. Нурланишни қайд қилишнинг замонавий усуллари фотоэлектрик эффект (ташқи ёки ички) ҳодисасига асосланади. Моддадан фотоэлектронни уриб чиқариш жараёни асосан квант, яъни мутлақо тасодифий характерга эга. Шунинг учун ёруғликнинг ҳар қандай фотоэлектрик қайд қилиниши билан нурланишнинг материя билан ўзаро таъсирининг квант таъсири туфайли оқим флуктуациялари (фотоэлектронларнинг сони) муқаррар. Заиф нурланишни қайд қилишда фотонларни ҳисоблаш усули қўлланилади. Нурланиш интенсивлигида флуктуациялар бўлмаганда, фотоҳисобларнинг дисперсияси қуйидагича бўлади

$$\sigma_n^2 = \langle n^2 \rangle - \langle n \rangle^2 = \langle n \rangle \qquad (16)$$

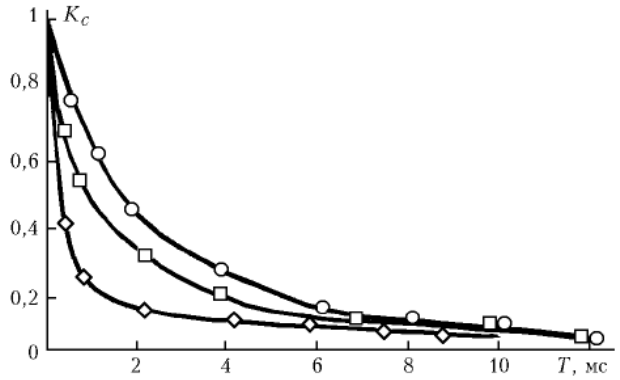
бу ерда n – саралаш вақтидаги фотосаноқлар сони, σ_n^2 - фотосаноқлар дисперсияси.

Интенсивлик флуктуациялари мавжуд бўлганда (бу турбулент атмосферада нурланишни қабул қилишга тўғри келади) фотоҳисобларнинг дисперсияси:

$$\sigma_n^2 = \langle n^2 \rangle - \langle n \rangle^2 = \langle n \rangle + \alpha^2 * (\langle U^2 \rangle - \langle U \rangle^2) = \langle n \rangle + \alpha^2 \sigma_U^2 \qquad (17)$$

Шундай қилиб, ўзгарувчан интенсивликдаги нурланишни қайд қилишда фотоҳисоблар сонининг (фототокнинг флуктуациялари) дисперсияси мунтазам нурланишга қараганда ҳар доим катта бўлади. Биз фотосаноқлар эхтимоллиги тақсимотини (ФЭТ) тадқиқ қилиш учун намуна олиш вақти интенсивлик корреляцияси вақти тартибида бўлган хол учун лаборатория шароитларида тажрибалар ўтказдик, бу эса йўлнинг асосий параметрларини

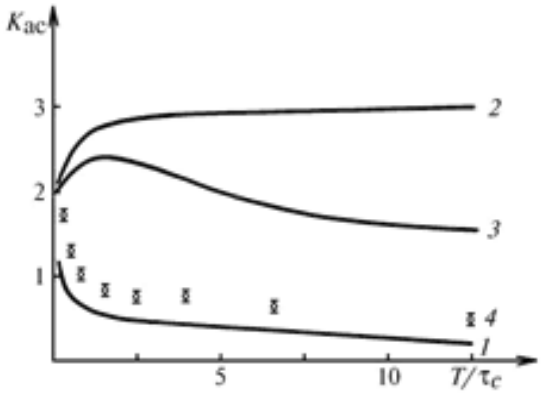
тўлиқ миқёсдаги атмосфера учун эришиб бўлмайдиган тажриба [А8] даражада статсионар ва назорат қилишни таъминлашга имкон берди. Тадқиқотлар β_n^2 қийматлари бўйича ҳақиқий атмосфера йўлидаги заиф ва ўртача турбулентликка мос келадиган уч хил турбулентлик ҳолати учун ўтказилди. Ҳар бир турбулентлик ҳолати учун ФЭТ йўли намуна олиш вақтининг 10 қийматида аниқланди. ФЭТ ни аниқлаш учун ҳар бир тажрибада ҳисоблар сони $\sim 10^6$ ни ташкил этди, бу етарли статистик ўртача кўрсаткични таъминлади. Тасодифий хатоларни истисно қилиш ва тадқиқотнинг етарли аниқлигини таъминлаш учун ҳар бир танлама вақти T учун ФЭТ 10 марта аниқланди. Фотоҳисоблар тақсимотини тавсифловчи қийматлар бир хил намуна олиш вақтларида барча реализациялар бўйича ўртача қийматни ҳисоблаш йўли билан аниқланди.



7-расм. Турли турбулентлик ҳолатларида фотосаноқнинг корреляция функцялари. Узлуксиз чизиқ - ўртача қийматлар, нуқта - ўртача экспериментал қийматлар: бу эрда ∘ - τ_c = 3,63 мс да; □ - τ_c = 2,48 мс; ◊ - τ_c = 0,68 мс. Геометрик фигураларнинг ўлчами стандарт оғиш билан мос келади

7-расмда индукцияланган турбулентликнинг уч хил ҳолати учун барча амалга оширишлар бўйича ўртача олинган фотоҳисоблаш корреляция функцялари кўрсатилган. Интенсивлик корреляция вақти тажрибада олинган фотосаноқларнинг корреляция вақтларининг ўртача қийматига тенг деб қабул қилинди. Йўлнинг ҳар бир турбулентлик ҳолати учун интенсивлик корреляция вақтлари қийматларининг ўртача квадратик оғиши 7% дан ошмади, бу тарқалиш йўлининг оптик хусусиятлари етарлича стационар эканлигини кўрсатади.

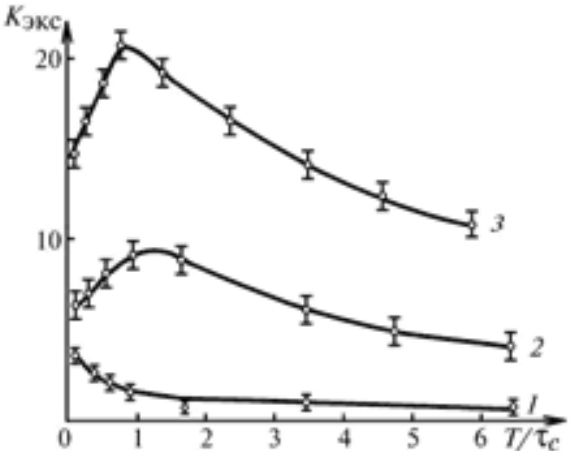
Тажрибалар натижаларидан кўриниб турибдики, Гаусс тақсимотидан фарқли бўлган майдоннинг $T \approx \tau_c$ саралаш вақтида ФЭТ маълум тақсимотлардан сезиларли даражада фарқ қилади. 8-расмда экспериментал ассиметрия коеффициентларининг, σ^2 = 0,49 бўлган, стационар турбулентлик холатида саралаш вақтига боғлиқлигини кўрсатади. Таққослаш учун бу ерда қуйдаги тақсимотларнинг ассиметрия коеффициентлари келтирилган: а) Пуассон; б) Диамент - Тейч (майдон энергияси моментларини фотосаноқларнинг факториал моментлари билан боғлаши асосида аниқланган); с) Диамент-Тейч («қисқартирилган»Диамент-Тейч тақсимоти).



8-расм. Асимметрия коэффициентининг намуна олиш вақтига боғлиқлиги: 1 - $K_{ас}$ Пуассон тақсимоти; 2 Тейч - Диаменти; 3 - кесик Тейч - Диаменти; 4 - экспериментал қийматлар с $_c$ = 0,62 мс, σ^2 = 0,49

Саралаш вақти $T \approx \tau_c$ да экспериментал ФЭТ ни тавсифлаш учун маълум тақсимотларнинг мос келмаслигини ҳисобга олиб, экспериментал натижаларни тавсифловчи янги тақсимотларни топиш керак эди.

Шу муносабат билан биз тажрибамиз шартларига мос келадиган интеграл интенсивликнинг ўзгариши характерини аниқлаш бўйича иш олиб бордик. Рақамли ҳисоб-китоблар билан кўрсатилгандек, интеграл интенсивликнинг тақсимланишини танлаш вақтига қараб дисперсия билан лог-нормал тақсимот билан тавсифлаш мумкин. Кўпгина тажрибалар натижалари интеграл интенсивликнинг тақсимланишининг умумий табиати намуна олиш вақтига боғлиқ эмаслигини таъкидлаш имконини беради. Фақат тақсимот параметри намуна олиш вақтига боғлиқ. Тадқиқотлар шуни курсатдики, Диамент - Тейч тақсимотида интенсивлик флуктуациялари дисперсияси σ^2, интеграл интенсивлик флуктуацияси дисперсияси σ_U^2 билан алмаштирилса, Диамент - Тейч тақсимоти экспериментал натижаларни $T \approx \tau_c$ саралаш вақтида, катта аниқлик билан тавсифлайди. Эксперимент ва назария ўртасида тўлиқ келишувга эришиш учун назарий тақсимотни экспериментал қийматлар даражасида "кесиш" керак. Ушбу фаразни текшириш учун тўртинчи моментлар даражасида экспериментал ва назарий тақсимотлар ўртасида таққослаш амалга оширилди ва натижалар 9-расмда келтирилди. Графиклардан кўриниб турибдики, ҳатто тўртинчи моментлар даражасида ҳам, таклиф қилинган тақсимот экспериментал натижаларни яхши тасвирлайди. Тўртинчи момент даражасидаги тақсимотларнинг мос келиши турбулент муҳитдан ўтган лазер нурланишининг ФЭТи σ_U^2 (T/τ_c) параметри билан Диамент-Тейч тақсимоти бўйича тавсифининг логнормал



9-расм. Эксцесс коэффициен-тининг уч хил турбулентлик ҳолати учун намуна олиш вақтига боғлиқлиги. *1* – τ_c = 0,68 мс; *2* – τ_c = 2,48 мс; *3* – τ_c = 3,63 мс

интенсивлик тақсимоти билан саралаш вақтларининг кенг диапазонида юқори аниқлигини кўрсатади.

Одатда, фотонларни ҳисоблаш режимида кучсиз оптик нурланишни қайд этишда қабул қилувчи қурилма фотоэлектрик конвертор, дискриминатор ва стандарт импулсларни ҳосил қилиш схемасидан иборат. Бу элементларнинг ҳар бири чекланган тезликка эга, бунинг натижасида бир электронли импулсларнинг бир қисми қайд этилмайди, шунинг учун фотоэлектронлар (бирламчи оқим) ва фотоҳисоблаш (иккиламчи оқим) хусусиятлари бир-биридан фарқ қилади.

Ҳисоблаш мосламасининг "ўлик вақти" (ЎВ) нинг таъсирини ҳисобга олиш учун берилган корреляция функцияси ва эҳтимоллик тақсимотига эга бўлган фотоэлектронлар оқимини ва "ўлик вақтни" ҳисобга олиш функциясини яратувчи дастур ишлаб чиқилди. Рақамли тажрибалар шуни кўрсатадики, ЎВ нинг $\Delta t/T < 10^{-5}$ қийматларигача бўлган тарқалиш моментларига таъсири аҳамиятсиз. $\Delta t/T \approx 10^{-5}$ қийматларидан бошлаб ЎВ эффектининг таъсири аста-секин кучаяди ва $\Delta t/T \approx 10^{-4}$ қийматларида тўртинчи тартибли моментн и н г бузилиши тахминан 4-8% ни ташкил қилади. Пастки моментлар, кутилганидек, камроқ бузилишларни бошдан кечиради, гарчи $\Delta t/T \approx 10^{-3}$ қийматларида биринчи тартиб моментининг бузилишлари ўртача 5-7% бўлса хам. $\Delta t/T$ нисбатининг янада ортиши билан ҳисоблагичнинг "ўлик вақти" таъсирининг тез ўсиши кузатилади ва натижалар катта бузилишларга учради.

ХУЛОСАЛАР

1. Атмосфера турбулентлигини моделлаштирувчи фаза экранларни яратиш алгоритми ишлаб чиқилди ва дастурий маҳсулот ишлаб чиқилди. Атмосфера синдириш кўрсаткичининг структуравий курсатгичи ва фазалар экранида фаза ортирмасини структуравий курсатгичини солиштириш орқали ишлаб чиқилган фазали экранларни, узлуксиз муҳитнинг нурланиш фазасига таъсири билан солиштириш усули таклиф қилинди ва амалга оширилди.
2. Атмосферада ультрақисқа лазер импулсларининг тарқалишини, нурлар траекториялари методи яқинлашувида тасвирлаш имконини берувчи модел яратилди. Аксиал симметрик муҳитда нурлар траекторияларининг ўзгаришини тавсифловчи рекурент ифода олинди, олинган натижа филаментнинг шаклланиши ва тарқалиши шартига мос келади. Муҳитнинг аксиал симметриялик талабини интенсивлик тақсимотининг градиенти ёрдамида олиб ташлаш мумкин.
3. Турбулент атмосферада филамент ҳосил бўлиш узунлигини ҳисоблаш учун нурлар траекторияси усулидан фойдаланган холда программа ишлаб чиқилди ва тадқиқотлар ўтказилди..

4. Атмосфера аэрозолининг атмосферада ультрақисқа лазер импулсларининг тарқалишига таъсири нурланиш интенсивлигининг энг юқори қийматига ва аэрозоллар ҳажмига боғлиқ эканлиги аниқланди. Юқори кувватларда катта аэрозоллар фокусланиш жараёнини тезлаштиради. Кам қувватларда катта аэрозолларнинг таъсири филамент шаклланиши жараёнини секинлаштиради. Кичик аэрозоллар филамент шаклланишига деярли таъсир қилмайди.
5. Аниқланишича, бошланғич текислигида нурланиш интенсивлигининг фазовий тақсимоти нурланишнинг муҳитда тарқалиши ва ўз-ўзидан фокусланиши жараёнига кескин таъсир кўрсатади. Бошланғич текисликдаги нурнинг эллиптиклиги нур оқими бўйлаб бир бутун сифатида филаментларнинг ҳосил бўлиш масофасининг чўзилишига ва доира шаклидаги нур билан солиштирганда мултифиламентнинг умумий узунлигининг узайишига олиб келади.
6. Нурланишнинг катта кувватларида филаментация маньбага якинроқ масофада бошланиши курсатилди. Мультифиламентадаги филаментлар сони масофага чизиқли боғлиқ сифатида ортиши аниқланди.
7. Муҳитда нурланишнинг қисман ютилиши натижасида лазер импулсига нурланишнинг нисбатан паст қувватлари ва нисбатан кичик тарқалиш масофаларида ҳам муҳитнинг синдириш кўрсаткичининг термал ўзгариши таъсир қилиши кўрсатилди. Атмосферада импулсларнинг кетма-кетлиги тарқалиши жараёнида иссиқлик эффектининг энг кучли таъсири, атмосферанинг синдириш кўрсаткичида юзага келадиган бузилишлар кейинги импулснинг келишига нур радиусининг ярмига тенг масофага силжишга улгурганда намоён бўлиши аниқланди.
8. Биринчи марта β_n^2 фотосаноқларнинг нисбий дисперсиясининг намуна олиш вақтига боғлиқлиги биринчи марта Гаусс бўлмаган майдон учун фотосаноқларнинг экспериментал тақсимотидан аниқланди. Интеграл интенсивлик тақсимотининг умумий табиати саралаш вақтига боғлиқ эмаслиги аниқланди. Фақат тақсимот параметри саралаш вақтига боғлиқ.
9. Интенсивликнинг фақат битта корреляцион функциясини ўлчаш ёрдамида, саралаш вақтининг кенг диапазонда, шу жумладан $T \approx \tau_c$, турбулент атмосферадан ўтган лазер нурланишининг фотосаноқларининг статистик характеристикалари ҳақида тўлиқ маълумот олиш мумкинлиги ккрсатилди. Бу фотосаноқлар тақсимотини олиш учун кўп сонли ўлчашлар натижаларини тўплаш заруратини йўқ қилади.
10. Фотосаноқлар учун ҳисоблагични тиклаш учун зарур бўлган вақт фотосаноқлар статистикасига сезиларли таъсир кўрсатиши кўрсатилган. Қабул қилгичнинг "ўлик вақти" нинг фотосаноқлар статистикасига таъсирини аниқлаш учун алгоритм ва дастурий маҳсулот ишлаб чиқилган бўлиб, бу фотосаноқларни экспериментал тақсимотига тегишли тузатишларни тезкор киритиш имконини беради.

НАУЧНЫЙ СОВЕТ ПО ПРИСУЖДЕНИЮ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ ДОКТОРА НАУК DSc.02/30.12.2019.FM.65.01 ПРИ ИНСТИТУТЕ ИОННО-ПЛАЗМЕННЫХ И ЛАЗЕРНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

НАЦИОНАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ УЗБЕКИСТАНА

КАСИМОВ АБДУГАППАР КАХАРОВИЧ

РАСПРОСТРАНЕНИЕ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ В ИЗОТРОПНЫХ СРЕДАХ

01.04.05- Оптика

АВТОРЕФЕРАТ ДИССЕРТАЦИИ ДОКТОРА (DSc) ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКИХ НАУК

Ташкент – 2022

Тема докторской (DSc) диссертации зарегистрирована в Высшей аттестационной комиссии при Кабинете Министров Республики Узбекистан за номером № B2017.2.DSc/FM76

Диссертация выполнена в Национальном университете Узбекистана
Автореферат диссертации на трех языках (узбекский, русский, английский (резюме)) размещен на веб-странице Научного совета (http://iplt.uz) и на Информационно-образовательном портале "ZiyoNet" (www.ziyonet.uz).

Научный консультант:	**Бахрамов Сагдилла Абдуллаевич** доктор физико-математических наук, академик
Официальные оппоненты:	**Рахматуллаев Илёс Арзимуродович** доктор физико-математических наук
	Семенов Денис Иванович доктор физико-математических наук
	Болтаев Ганжабай Сапаевич доктор физико-математических наук
Ведущая организация:	**Ташкентский государственный технический университет им. Ислама Каримова.**

Защита диссертации состоится «22» 02 2022 г. в 14[30] часов на заседании Научного совета DSc.02/30.12.2019.FM.65.01 при Институте Ионно-плазменных и лазерных технологий по адресу: 100125, Ташкент, Дурмон йули, 33. Тел/Факс: (998-71) 262-32-54, E-mail: info@iplt.uz.

С диссертацией можно ознакомиться в Информационно-ресурсном центре Института ионно-плазменных и лазерных технологий (зарегистрирована за №1) по адресу: 100125, Ташкент, Дурмон йули, 33. Тел: (998-71) 262-31-69

Автореферат диссертации разослан «09» 02 2022 г.
(протокол реестра №1 от «09» 02 2022 г.)

Х.Б. Ашуров
Председатель научного совета по присуждению ученых степеней, д. т. н., профессор

И.Д. Ядгаров
Ученый секретарь научного совета по присуждению ученых степеней, д. ф.-м. н.,с.н.с.

Б.Е. Умирзаков
Председатель научного семинара при научном совете по присуждению ученых

ВВЕДЕНИЕ (аннотация докторской (DSc) диссертации)

Актуальность и востребованность темы диссертации. Кардинальное отличие лазерного излучения от излучения классических источников обусловили широчайшее применение этих источников в различных областях науки и техники. Одним из перспективных направлений прикладного применения лазерного излучения является использование его для получения и передачи информации. Стремительное развитие лазерной физики в прошлые десятилетия обеспечило создание устройств генерирующих импульсное оптическое излучение с длительностями в фемтосекундном диапазоне. Локализация энергии в столь малых временных и пространственных интервалах позволило довести напряженность полей излучения до значений сравнимых и выше внутриатомных значений поля. Столь высокая интенсивность излучения распространяющегося в изотропных среде вызывает целый нелинейных процессов, которые открывают новые перспективы применения лазерного излучения, среди которых явление филаментации выделяется своими очевидными практическими приложениями. Так, например, возможность создания широкополосного лидара для зондирования загрязнений атмосферы и прогнозирования погоды, защита различных объектов от ударов молнии и сверхдальнее обнаружение целей при лазерной локации и т.д. Впервые святящаяся «нить» (филамент) была зарегистрирована еще в 1965 году в работах Пилипецского и Рустамова при фокусировке наносекундных лазерных импульсов с мощностью 20 МВт в кювету с органическими жидкостями. Однако длина святящейся нити в этих экспериментах, измерялась в сантиметрах и эти исследования не привлекли широкого внимания. К середине 90 годов филаментация лазерного излучения, теперь уже импульсов с фемтосекудной длительностью, вновь привлекла внимание исследователей, когда в атмосфере были получены протяженные светящиеся нити длиной в несколько метров, и их длина увеличивалась от эксперимента к эксперименту. Пространственно – временная локализация энергии при филаментации лазерных импульсов в прозрачных, изотропных средах сопровождается генерацией плазменных каналов, конической эмиссией, формированием излучения суперконтинуума, а так же усилением нелинейного взаимодействия излучения со средой. Явление филаментации открыло принципиально новые возможности использования лазеров в прикладных задачах атмосферной оптики, в микро оптике, и в других приложениях.

Филаментация - это внешнее проявление фундаментального процесса самовоздействия мощного ультракороткого лазерного излучения распространяющегося в прозрачной среде. Динамическое взаимодействие двух нелинейных процессов, таких как, самофокусировка излучения, в результате эффекта Керра, и дефокусировка того же излучения со стороны низкоплотной плазмы, созданной туннельной ионизацией молекул среды при распространении импульса, создает условия для фазовой и частотной

самомодуляции излучения. Поэтому филаментация сопровождается генерацией интенсивного излучения в широком диапазоне длин волн (суперконтиниум). Такое излучение открывает большие возможности для дистанционного спектроскопического анализа состава атмосферных газов. Возможность переноса излучения практически без потерь на значительные расстояния с последующей генерацией суперконтиниума, является привлекательной перспективой, как для зондирования, так и для лазерной локации.

Влияние возмущений светового поля на выходе лазерной системы и неоднородность показателя преломления вследствие турбулентности атмосферы, приводит к стохастизации процесса формирования и распространения филамента. Вследствие чего длина трассы, на которой происходит формирования филамента, длина самого филамента, т.е. участок трассы, где происходит генерация суперконтиниума, и интенсивность широкополосного излучения, его спектральное распределение оказываются случайными. В тоже время в импульсах гига – и тераваттной мощности образуется хаотический пучок филаментов, которые зарождаются в результате мелкомасштабной самофокусировки лазерного излучения. Стохастизация пучка из множества филаментов в фемтосекундном лазерном импульсе является следствием пространственной неустойчивости высокоинтенсивного светового поля в среде с керровской нелинейностью. Возмущения интенсивности и фазы излучения на выходе лазерной системы, флуктуации показателя преломления среды проводят к случайному от импульса к импульсу расположению филаментов в пучке, и как следствие этого к нерегулярному сигналу обратного рассеяния. Вместе с тем сведения о длине участка формирования мультифиламента, о количестве филаментов в пучке, их взаимодействии, и о характере конической эмиссии суперконтинуума являются ключевыми при создании лазерных локаторов и лидеров, работающих в фемтосекундном диапазоне. Оперативное определение количества, размеров и химического состава аэрозолей в атмосфере является одной из основных задач исследований метереологии, предсказания погоды, охраны окружающей среды, и контроля изменений климата. Решения этой задачи невозможно без привлечение лидаров – лазерных устройств оптического зондирования атмосферы. Поэтому существует потребность в проведение исследований с целью определения статистических характеристик указанных величин и процессов, а также выявления параметров и степень их влияния на эти характеристики.

В настоящее время в Республике Узбекистан проводятся целый комплекс работ охране окружающей среды. Для представления масштабов выполняемых работ, достаточно вспомнить работы по улучшению экологической ситуации в Приаралье. Составной частью этих работ является контроль за состоянием атмосферы и предсказание погоды. Исследования, проведенные в этой работе, послужат разработке и созданию сети лидаров способных в режиме реального времени получать информацию о состоянии

атмосферы, а также для создания лидаров аэро – и космического базирования зондирующих поверхность Земли. Настоящая диссертация в определённой степени посвящена решению задач, обозначенных в Постановлении Президента Республики Узбекистан №-УП-4947 «О мерах по дальнейшей реализации Стратегии действий по развитию Республики Узбекистан в 2017-2021 годы» от 7 февраля 2017года, а так же задач определенных в Постановлениях Президента Республики Узбекистан ПҚ-№2909 от 20 апреля 2017 года "Олий таълим тизимини янада ривожлантириш чора – тадбирлари тўғрисида", и ПҚ - №4358 от 17 июня 2019 года "2019 — 2023 йилларда Мирзо Улуғбек номидаги Ўзбекистон Миллий университетида талаб юқори бўлган малакали кадрлар тайёрлаш тизимини тубдан такомиллаштириш ва илмий салоҳиятни ривожлантириш чора-тадбирлари тўғрисида".

Соответствие исследования приоритетным направлениям развития науки и технологий республики. Исследования, выполненные в ходе работ над диссертацией соответствуют приоритетным направлениям развития науки и технологий в республике Узбекистан на 2012-2020 годы, отмеченных в пункте «ПФИ-2 Исследование актуальных проблем физики, астрономии и астрофизики».

Обзор зарубежных научных исследований по теме диссертации[1]. Крупные физические открытия оказывают существенное влияние на развитие самых различных областей науки и техники. Наглядный пример тому – воздействие достижений лазерной физики на исследования связанные с распространением оптического излучения в прозрачных, изотропных средах, в том числе в земной атмосфере. Исследования связанные с распространением радиоволн в атмосфере интенсивно проводились еще в начале XX века. Значительная часть полученных результатов систематизированы в фундаментальной работе В. И. Татарского «Распространение волн в турбулентной атмосфере», опубликованной в 1967 году. Тогда же, в начале 60 – ых, после изобретения лазеров, впервые Г. А. Аскарьяном (ФИАН г. Москва) было высказано предположение о возможности самофокусировки лазерного излучения в изотропной среде. В последующие годы были проведены уникальные эксперименты и получена филаментация в жидкостях А.М. Прохоровым и В. В. Коробкиным (ФИАН) и M. T. Loy и Y. R. Shen (Калифорнийский Университет, США). Несколько позже Н. Г. Басовым, совместно с группой исследователей (ФИАН), получена филаментация в воздухе. Как показали эксперименты, самофокусировка лазерного импульса в изотропных средах, является пороговым эффектом. Поэтому для проявления всех её свойств в атмосфере необходимы мощности на уровне гигаВатт.

С созданием и совершенствованием фемтосекундных лазеров интерес к явлению самофокусировки вновь возродился. Первые эксперименты по филаментации излучения лазера с титан-сапфировым активным элементом

[1] Обзор научных исследований по теме диссертации составлен на основании https://www.researchgate.net, www.elsevier.com, https://www.nxp.com, http://www.bmstu.ru, https://www.msu.ru, https://www.bsuir.by, http://www.enu.kz и других источников

были проведены практически одновременно несколькими группами, такими как например, группа под руководством профессора G. Mourou в университете штата Мичиган (США), группа под руководством профессора A. Mysyrowicz в Политехнической щколе Палезо (Франция) и совместной российско – канадской группой под руководством профессоров В.П. Кандидова (Международный учебно-научный лазерный центр МГУ имени М.В. Ломоносова, Россия) и S.L. Chin (Центр оптики, фотоники и лазеров университета Laval Квебек, Канада). В этих экспериментах, и в экспериментах многих других групп, на излучении со средней длиной волны 800 нм были получены филаменты, длина которых превышала сотни метров. В этих работах были также отмечены эффект генерации суперконтинуума, формирование цветных колец, а также эффект рефокусировки излучения.

Интерес к явлению самофокусировки не ослабевает и сейчас, так например, создан совместный французско – немецкий проект Teramobile который объединяет исследователей из пяти исследовательских центров Франции и Германии. В проекте для исследования явления филаментации используется лазер мощностью 5 тераВатт, при длительности импульса в 100 фемтосекунд, с энергией в импульсе 350 мДж. Для исследования явления филаментации в воздухе в последнее время сообщается о использовании лазерной системы Extreme Light (XL)-II с длительностью импульса в 30 фемтосекунд и энергией в импульсе 640 мДж. Большую перспективу имеют исследования по созданию фемтосекундной лазерной системы космического базирования, которую проводит европейское космическое агентство. Целью этого проекта является использование явления филаментации для зондирования атмосферы установкой находящейся в космосе, регистрация же излучения будет проводится приемниками на земле, что позволит на порядок повысит чувствительность метода.

Степень изученности проблемы. Исследования, проведенные многими научными группами позволили создать самосогласованную физическую картину самофокусировки и филаментации мощного ультракороткого лазерного излучения в прозрачных, изотропных, конденсированных средах и в газах. Особое место в этих исследованиях занимает филаментация лазерного излучения в атмосфере, так как наибольшие перспективы практического применения этого явления открываются при распространении ультракоротких лазерных импульсов в атмосфере. Благодаря этим исследованием понятен процесс динамической локализации энергии излучения в пространстве и во времени, который проявляется как протяженная узкая святящаяся нить – филамент (группа Chin Канада). Были обнаружены и исследованы процессы генерации излучения суперконтинуума и коническая эмиссия (группа Mourou США), сопровождающие процесс филаментации. Были изучены и установлены основные законы образования множества филаментов в одном пучке лазерного излучения – мультифиламентация (франко – германская группа) и обнаружен процесс «блуждания» филамента (група Кандидова МГУ).

Во многих исследованиях подчеркивалась стохостизация процесса филаментации излучения вследствие влияния атмосферной турбулентности и несовершенства геометрии лазерного пучка, однако не было проведено системного анализа процесса филаментации с использованием статистических методов исследования. Остались в стороне также вопросы, связанные с точностью измерений при регистрации излучения, рассеянного различными объектами в многокомпонентной атмосфере и прошедших определенное расстояние в турбулентной атмосфере до регистрации на фотоприемнике.

Связь диссертационного исследования с планами научно-исследовательских работ высшего образовательного учреждения, где выполнена диссертация. Диссертационная работа выполнялась в ходе научно исследовательских работ по выполнению грантов Фонда поддержки фундаментальных исследований Академии наук Республики Узбекистан; «Исследование влияния турбулентности атмосферы на процесс формирования и распространение филаментов ультракоротких лазерных импульсов» 2006-2007 годы, контракт № 61-06, «Исследование процесса формирования и распространение мультифиламентов ультракоротких лазерных импульсов в атмосфере» в 2008-2009 годы, контракт № 38-08, «Исследование процесса филаментации ультракоротких лазерных импульсов в атмосферном аэрозоле» 2010-2011 годы контракт № 14-10. В последующие годы работа выполнялась в соответствии с планом научных работ кафедры Оптики и лазерной физики (ныне кафедра Фотоники) Физического факультета Национального Университета Узбекистана.

Целью исследований, выполненных в процессе работы над диссертацией, были изучение процесса распространение мощных ультракоротких лазерных импульсов в турбулентной атмосфере, используя статистические методы обработки результатов, которые применяются при исследовании случайных процессов, а также определение предельных точностей измерения слабых оптических полей, каковыми являются излучения, регистрируемые при лазерном зондировании и сверхдальней локации с использованием филаментации лазерного излучения.

В соответствии с поставленной целью сформулированы и решены следующие **задачи исследования:**

разработка методики, алгоритма и программы для моделирования турбулентности атмосферы соответствующей заданным значениям характеристик атмосферной трассы;

получение рекуррентного выражение описывающего изменение траекторий лучей в изотропных средах, при наличии керровской нелинейности, в приближении «метода лучевых траекторий»;

создание программного обеспечение для определения длины нелинейного фокуса ультракоротких лазерных импульсов в турбулентной атмосфере, и исследование влияния турбулентности на процесс формирования филамента;

влияние атмосферного аэрозоля на распространение ультракоротких импульсов лазерного излучения в атмосфере и на процесс самофокусировки излучения;

влияние пространственной формы импульса в начальной плоскости на распространение лазерного импульса и на формирование филамента в условиях турбулентности атмосферы;

зависимости числа филаментов в мультифиламенте от мощности лазерного излучения и от расстояния, пройденного импульсом в керровской среде;

влияние теплового изменения показателя преломления, вследствие поглощении излучения, на распространение серии ультракоротких импульсов в турбулентной атмосфере, при заданном ветровом режиме;

определение зависимости относительной дисперсии фотоотсчетов β_n^2 от времени отбора и распределения величины интегральной интенсивности от времени отбора, при регистрации слабого излучения;

определение связи между корреляционной функцией фотоотсчетов и статистическими характеристиками интенсивности излучения при различных временах отбора;

учет влияния «мертвого времени» приемника на распределение вероятностей фотоотсчетов. Распределение вероятностей фотоотсчетов необходима для определения флуктуации интенсивности излучения прошедшего турбулентную атмосферу.

Объектом исследования является мощный ультракороткий лазерный импульс, распространяющийся в турбулентной атмосфере в режиме самоканалирования.

Предметом исследования является процесс самофокусировки мощного ультракороткого лазерного импульса в турбулентной атмосфере под воздействием нелинейного эффекта Керра, и явление филаментации лазерного излучения вследствие динамического баланса между керровской фокусировкой излучения и дефокусировкой со стороны низкоплотной плазмы созданной излучением.

Методы исследования: для решения поставленных задач в диссертации использованы аналитические методы для получения рекуррентных выражений описывающих распространение элементарных лучей в изотропных средах, а также использованы методы математического моделирования для выявления закономерностей влияющих на процесс филаментации излучения в турбулентной атмосфере содержащей аэрозоли и использован метод модельного эксперимента для изучения влияния распределения флуктуаций поля на точность определения фототока при регистрации слабого оптического излучения.

Научная новизна исследования заключается в следующем:

впервые, получено рекуррентное выражение описывающее изменение траекторий лучей в аксиально симметричной среде, которая соответствует условию формирования и распространения филамента. В дальнейшем условие

аксиально-симметричности среды может быть снято за счет использования градиента распределения интенсивности;

впервые, показано возможность применение модели случайных линз при моделировании распространения излучения в турбулентной атмосфере и атмосфере содержащей аэрозоли, методом лучевых траекторий, что способствовало уменьшению флуктуаций при определении средней длины формирования филамента;

исследовано влияние атмосферного аэрозоля на распространение ультракоротких импульсов и на формирование филамента в атмосфере и впервые установлено степень влияния аэрозолей в зависимости от размеров аэрозоля на распространение лазерных импульсов;

исследовано влияние эллиптичности пучка на процесс распространения ультракороткого лазерного импульса, и на формирование филамента при мощности импульса в десятки раз превышающем критическую мощность самофокусировки, и установлено, изменяя эллиптичность пучка можно управлять длиной нелинейного фокуса и длиной самого филамента;

исследовано влияние теплового изменения показателя преломления среды, в вследствие поглощения излучения, на распространение ультракоротких импульсов в атмосфере, впервые показано возможность возникновения волноводного канала вследствие поглощения излучения и его смещение вместе с импульсом под воздействием бокового ветра;

впервые по экспериментальным распределениям вероятностей фотоотсчетов для негауссова поля впервые установлена зависимость относительной дисперсии фотоотсчетов β_n^2 от времени отбора. Установлено, что общий характер распределения интегральной интенсивности не зависит от времени отбора. От времени отбора зависит лишь параметр распределения;

впервые экспериментально показана, что измерение лишь одной корреляционной функции интенсивности дает полную информацию о статистических характеристиках фотоотсчетов лазерного излучения, прошедшего турбулентную атмосферу в широком диапазоне времен отбора, включая $T \approx \tau_c$.

Практические результаты исследования выражаются в разработке алгоритма и создания програмного продукта для генерирования фазовых моделируюших атмосферную турбулентность методом скользащего суммирования, с заданнами характеристиками турбулентности. Показано, эллиптичность пучка способствует увеличению длины нелинейного фокуса при самофокусировке и длины филамента при филаментации. Установлено, при распространении серии ультракоротких лазерных импульсов в атмосфере, вследствие частичного поглощения излучения предыдущего импульса для последующего импульса создаётся волноводный канал, который может смешаться по влиянием бокового ветра, и увлекать последующий лазерный импульс. Разработан алгоритм и создана программа для определения влияния «мертвого времени» приемника на статистику фотоотсчетов, которая

оперативно позволяет ввести соответствующие поправки в распределение фотоотсчетов.

Достоверность результатов исследований обеспечена обоснованностью методологии исследования, применением обоснованных методов и подходов статистической и нелинейной оптики, использованием качественной и количественной оценки результатов. Достоверность сделанных выводов основывается согласованностью с результатами других авторов, работающих в области исследований распространения ультракоротких лазерных импульсов в атмосфере.

Научная и практическая значимость результатов исследования. Научная значимость результатов исследований диссертационной работы заключается в том что, полученные результаты расширяют представление о процессе самофокусировки ультракоротких лазерных импульсов в турбулентной среде. Предложен новый метод моделирования процесса распространения ультракоротких лазерных импульсов в изотропных прозрачных средах. Разработанный метод позволяет определить среднею длину филаментации в квазиреальном режиме исследований и осуществить планирование экспериментов при зондировании атмосферы с помощью ультракоротких лазерных импульсов.

Практическая значимость результатов определяется необходимостью учета возникновение волноводного канала при распространении серии импульсов ультракоротких лазерных импульсов и его смещение под воздействием боковой составляющей ветра, что необходимо учитывать в фемтосекудных лидарах удаленной диагности атмосферы и других объектов, а также возможностью оптимизации работы лазерных локационных устройств работающих на сверхдальних расстояниях, с исследованием результатов полученных при изучении распределения интенсивности излучения при различных временах отбора.

Внедрение результатов исследования. Рекуррентные соотношения, полученные для описания траектории лучей в цилиндрически - слоистых средах были использованы в ряде исследованиях описанных в зарубежных публикациях (S. Johnson, F. Kuppers, S. Pau *Efficiency of continuous-wave solar pumped semiconductor laser,* Optics & Laser Technology, Volume 47, April 2013,

Pages 194-198; P. Reusswig, S. Nechayev, M. Tomes, T. Carmon, M. Baldo, and C. Rotschild *Efficient incoherent pumping for high-Q micro-lasers*, OSA Technical Digest (online) (Optical Society of America, 2012); H. Costa, J. Almeida, D. Liang, D. Garcia, M. Catela, B. D. Tibúrcio, C R. Vistas *Design of a multibeam solar laser station for a megawatt solar furnace* SPIE, Engineering Volume 59 · № 8 , AUGUST 2020 https://doi.org/10.1117/1.OE.59.8.086103); Vistas, C. R., Liang, D., Garcia, D., Tibúrcio, B. D., & Almeida, J. (2020). 32 W TEM 00-Mode Side-Pumped Solar Laser Design. Applied Solar Energy, 56(6), 449-457. Использование полученных результатов позволило авторам увеличит мощность накачки активных элементов, не допуская самофокусировки

излучения в активной среде, и достичь более высоких показателей по эффективности преобразования энергии накачки различных лазеров.

Результаты полученные в диссертации по восстановлению статистики фотоотсчетов по одной реализации корреляционной функции фотоотсчетов были использованы при выполнении работ в рамках Государственной научно – прикладной программы, при выполнении гранта № ИТД 15-020 «Разработка лазерного фотон-корреляционного спектрометра для диагностики рассеивающих сред» (2009 – 2011 годы) в Национальном университете Узбекистана (справка № 01/11-7609 Национального университета Узбекистана от 24 ноября 2021 года). Использование результатов полученных в диссертации позволило определит распределение фотоотсчетов из корреляционной функции фототсчетов, что способствовало улучшению эффективности разработанной установки.

Результаты работ описанные в диссертации, характеризующие процесс самофокусировки и информация о методах управления этим процессом были использованы при выполнении работ в рамках Государственной программы фундаментальных исследований, при выполнении гранта № Ф2-49 “Квазисинхронные взаимодействия сверхкоротких лазерных импульсов в средах с пространственной модуляцией квадратичной и кубической нелинейной восприимчивостью” (2012-2016 годы), в Ташкентском государственном техническом университете (справка № 01/9-14-3302 Ташкентского государственного технического университета от 22 ноября 2021 года). Использование результатов полученных в диссертации позволило исключить филаментацию ультракоротких импульсов и таким образом уменшить число факторов, влияющих на процесс генерации второй и третьей гармоники.

Рекурентные соотношения описывающие процесс распространения ультракоротких лазерных импульсов в различных средах, полученные в диссертации, были использованы при выполнения работ в рамках Государственной программы фундаментальных исследований, при выполнении гранта № ОТ-Ф2-49 “Исследование и создание методов генерации и усиления мощного субпетаваттного фемтосекундного лазерного излучения и его взаимодействия с веществом”, в институте Ионно-плазменных и лазерных технологий, выполненной в 2017-2020 –тых годах. Использование результатов полученных в работе Касимова А.К. позволило избежать филаментацию излучения в исследуюмых средах, что позволило исключить разрушение объектов исследования.

Апробация результатов исследования. Результаты диссертационной работы докладывались и обсуждались на 16 международных и республиканских конференциях.

Опубликованность результатов исследований. Полученные по теме диссертации результаты изложены в 36 научных трудах, из них 11 научные статьи в рецензируемых журналах, в том числе 5 в иностранных журналах, и 6 статьей в республиканских научных журналах рекомендованных Высшей

аттестационной комиссией Республики Узбекистан для публикации основных научных результатов докторских диссертаций, 10 тезисов в международных научных конференциях, 14 тезисов в республиканских конференциях, получено одно свидетельство регистрации программного продукта для ЭВМ.

Структура и объём диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения, списка опубликованных работ, списка использованной литературы и приложения. Она изложена на 192 страницах и содержит 49 рисунков.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во **введении** обоснованы актуальность и востребованность темы диссертации, сформулированы цель и задачи исследования, определены объект, предмет и методы исследования, изложена научная новизна, научно практическая значимость полученных результатов, обоснована достоверность результатов, приведены краткие сведения о внедрении результатов, апробация работы и структура диссертации.

В первой главе диссертации «**Распространению лазерного излучения в изотропных средах и филаментации ультракороткого лазерного импульса в атмосфере»** на основе анализа литературы показано что, развитие лазерной физики, позволившее на порядки увеличить качество лазерного излучения, совершенствование приемников излучения и методов регистрации излучения, позволили успешно решить целый ряд задач по лазерной локации и зондированию атмосферы. Так, например, возможность создания широкополосного лидара для зондирования загрязнений атмосферы и прогнозирования погоды, защита различных объектов от ударов молнии и сверхдальнее обнаружение целей при лазерной локации и т.д., является перечислением лишь небольшой части возможных применений явления филаментации. Филаментация - это внешнее проявление фундаментального процесса самовоздействия мощного ультракороткого лазерного излучения распространяющегося в прозрачной среде. Динамическое взаимодействие двух нелинейных процессов, таких как, самофокусировка излучения, в результате эффекта Керра, и дефокусировка того же излучения со стороны низкоплотной плазмы, созданной туннельной ионизацией молекул среды при распространении импульса, создает условия для фазовой и частотной самомодуляции излучения. Поэтому филаментация сопровождается генерацией интенсивного излучения в широком диапазоне длин волн (суперконтиниум). Такое излучение открывает большие возможности для дистанционного спектроскопического анализа состава атмосферных газов. Возможность переноса излучения практически без потерь на значительные расстояния с последующей генерацией суперконтиниума, является привлекательной перспективой, как для зондирования, так и для лазерной локации. Показано что явление филаментации представляет собой фундаментальный процесс и оно свойственно всем прозрачным изотропным

средам. Указано, что процесс филаментация в атмосфере носит случайный характер и для его описания необходимо привлечение методов статистической обработки данных.

Во второй главе «**Турбулентность атмосферы и её проявление при распространении оптического излучения**» приведено описание характеристик атмосферы и приведены методы используемые при описании случайно-неоднородных сред. Показано что, для описания случайных флуктуаций показателя преломления атмосферы n_1 необходимо привлечение методов статистической физики и одной из наиболее важных статистических характеристик случайного процесса n_1 является пространственная автокорреляционная функция, которая определяется как,

$$\mathbf{R}_n(\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2) = \langle n_1(\mathbf{r}_1), n_2(\mathbf{r}_2) \rangle, \tag{1}$$

где угловые скобки обозначают усреднение по ансамблю.

Так как n_1 в атмосфере есть пространственно – стационарный случайный процесс, в трехмерном пространстве, т.е. процесс статистически стационарен, то его автокорреляционная функция зависит лиш от разности координат и её можно записать в виде

$$\mathbf{R}_n(\mathbf{r}) = \langle n_1(\mathbf{r}_1), n_1(\mathbf{r}_1 - \mathbf{r}) \rangle, \tag{2}$$

где $\mathbf{r} = \boldsymbol{r_1} - \boldsymbol{r_2} = (\Delta x, \Delta y, \Delta z)$. Согласно теореме Винера - Хинчена автокорреляционная функция случайного процесса связана со спектральной плотностью мощности этого процесса Фурье преобразованием [18, 55]. Тогда спектральная плотность мощности случайного процесса n_1 определяется как трехмерный фурье-образ величины $\mathbf{R}_n(\mathbf{r})$

$$\Phi_т(\varkappa) = \frac{1}{(2\pi)^3} \iiint_{-\infty}^{+\infty} \mathbf{R}_n e^{i\kappa r}\, d^3\mathbf{r} \tag{3}$$

где $\boldsymbol{\varkappa} = (\varkappa_x, \varkappa_y, \varkappa_z)$ – так называемый волновой вектор, который можно рассматривать как вектор пространственной частоты, каждая компонента которого измеряется в единицах радиан на метр.

Показано, что изотропной среде, при моделировании распространения лазерного излучения, достаточно использование автокорреляционной функции флуктуаций показателя преломления среды, в плоскости перпендикулярной направлению распространения излучения. В этом случае необходимо использовать двухмерную автокорреляционную функцию и связанную с ней, двухмерную спектральную плотность мощности $n_1\ (r)$ в плоскости с фиксированной координатой z. Эта двумерная спектральная плотность мощности представляется функцией $F_n\left(\varkappa_x, \varkappa_y;\ z\right)$. Двумерная автокорреляционная функция $B_n(\boldsymbol{\rho}; z)$, связана с двумерной спектральной плотностью мощности соотношениями

$$F_n\ (\boldsymbol{\varkappa}; z) = \frac{1}{(2\pi)^2} \iint_{-\infty}^{+\infty} B_n\ (\boldsymbol{\rho}; z) \exp(i\varkappa\rho)\, d^2\boldsymbol{\rho} \tag{4}$$

$$B_n\ (\boldsymbol{\rho}; z) = \iint_{-\infty}^{+\infty} F_n\ \ (\boldsymbol{\varkappa}; z) \exp(-i\varkappa\rho)\, d^2\boldsymbol{\varkappa} \tag{5}$$

где теперь $\boldsymbol{\varkappa} = (\varkappa_X, \varkappa_Y)$, $\boldsymbol{\rho} = (\Delta x, \Delta y)$, и по определению автокорреляционная функция $B_n(\boldsymbol{\rho}; z)$ – смешанный момент второго порядка есть

$$B_n(\boldsymbol{\rho}; z) = \langle n_1(\boldsymbol{\rho}_1; z) * n_1(\boldsymbol{\rho}_1 - \boldsymbol{\rho}; z) \rangle \qquad (6)$$

При моделировании распространения излучения, влияние непрерывной турбулентности атмосферы, сводится к случайному изменению фазы волны. Поэтому влияние непрерывной среды можно заменить действием дискретных экранов, в которых фаза излучения изменяется скачкообразно в соответствии с тем значением, которое она приобрела бы распространяясь, в непрерывной среде. Фазовый экран, имитирующий влияние турбулентности, был разработан нами [А12], на основе модели Кармана, с использованием метода скользящего суммирования, в котором двухмерный спектр пространственных флуктуаций показателя преломления считался имеющим вид

$$F_n(k_x, k_y, k_z) = 0.33 C_n^2 * (k^2 + k_0^2)^{-11/6} \left[\exp\left(-\frac{k^2}{k_m^2}\right)\right] \qquad (7)$$

где, k_x, k_y, k_z - координаты в частотном пространстве, $k_0 = 2\pi/L_0$ и $k_m = 5.95/l_0$ – минимальная и максимальная частота флуктуаций, L_0 и l_0 – внешний и внутренний масштабы турбулентности, и C_n^2 - структурная характеристика показателя преломления атмосферы.

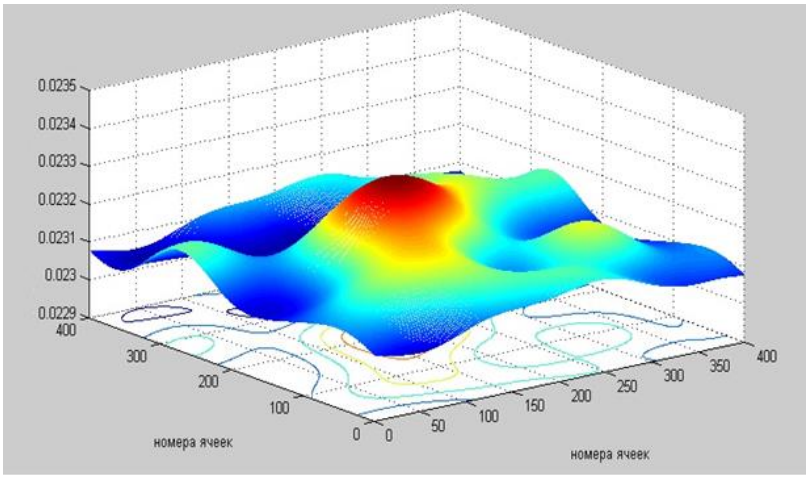


Рис.1. Набег фазы поля излучения за единичным фазовым экраном в радианах.. Ось абсцисс и ось ординат - номера пространственных ячеек с шагом 5*10^{-5} м.

На рис.1 приведено значения набега фазы поля излучения на фазовым экране для случайной реализаций состоянии турбулентности атмосферы. Такой набег фазы волны соответствует прохождению излучением трассы в турбулентной атмосфере длиной 1м.

Величина структурной постоянной, в этой серии фазовых экранов, предполагалась равной C_n^2 = 5.0*10^{-14} м$^{-2/3}$. Как сказано выше, это значение соответствует сильной турбулентности атмосферы. Внешний масштаб турбулентности ограничен высотой трассы над землей и равен L=1м. Внутренний масштаб турбулентности считался равным l=0.001м. Как видно из рис.1 крупномасштабные возмущения показателя преломления привели к общему положительному набегу фазы, на которое наложены мелкомасштабные флуктуации. Здесь же на плоскости *x0y* показаны линии равного набега фаз. Более темные линии соответствуют меньшему набегу фаз.

Для проверки соответствия полученных результатов реальным экспериментальным значениям была рассчитана структурная функция фазы излучения на фазовом экране. Расчеты были проведены на основе выражения адаптированного для определения структурной функции фазы излучения,

$$D_\varphi(r_1, r_2) = \langle(\varphi_1(r_1) - \varphi_1(r_2)^2\rangle \quad (8)$$

В силу того, изменение фазы излучения напрямую связаны с изменением показателя преломления атмосферы, можно предположить что структурная функция фазы будет изменятся по закону

$$D_\varphi(r) = C_\varphi^2 * r^{2/3} \quad (9)$$

где C_φ^2 – величина характеризующая амплитуду флуктуаций фазы излучения набираемой вследствие распространения излучения в турбулентной среде. Как показал анализ результатов, структурная функция фазы фазовых экранов, полученных с помощью разработанной нами программного продукта, хорошо описывается зависимостью $r^{2/3}$. Наблюдались небольшие случайные отклонения данных полученных в машинных экспериментах, от расчетных, определенных по формуле (9). Эти отклонения обусловлены конечностью числа усредняемых величин при определении структурной функции фазы.

Исходя из выше сказанного можно предположить что разработанная модель с достаточной точностью воспроизводит влияние атмосферной турбулентности на лазерное излучение распространяющееся в атмосфере на трассах с небольшой длиной. На длинных трассах необходимо учесть эффект насыщения флуктуаций интенсивности.

В третьей главе **«Определение средней длины нелинейного фокуса»** для определения нелинейного фокуса при самофокусировке ультракоротких лазерных импульсов использован метод лучевых траекторий (Ray – tracing metods). Исходя из гауссовости пространственного распределение интенсивности на выходе лазера, и пропорциональности нелинейной добавки $n_2(I)$ к показателю преломления атмосферы n_0, интенсивности излучения, среду можно считать аксиально симметричной. Это допущение позволяет свести задачу определения нелинейного фокуса к рассмотрению распространения лазерного излучения в цилиндрически слоистой среде. По аналогии с уравнением траектории луча в сферически - слоистой среде для аксиально слоистой среды можно записать,

$$\frac{dr}{dx} = \frac{\sqrt{1+\frac{2n_2}{n_0}\frac{dI}{dr}dr - cos^2\theta}}{cos\theta} \quad (10)$$

где, r - поперечная координата, n_0 - показатель преломления среды, dI/dr - производная интенсивности по поперечной координате, θ - угол, который луч, принадлежащий лазерному пучку, составляет с осью *z*.

После ряда преобразований приращение поперечной координаты dr на каждом шаге dz можно определить как,

$$dr = \left[\frac{n_2}{n_0}\frac{dI}{dr} + \sqrt{\left(\frac{n_2}{n_0}\frac{dI}{dr}\right)^2 + \frac{cos^2\theta(1-cos^2\theta)}{dz^2}}\right] * \frac{dz^2}{cos^2\theta} \quad (11)$$

Используя полученное выражение, была разработана компьютерная модель, где площадь поперечного сечения излучения разбивалась квадратной сеткой 100x100 с шагом $\Delta x = \Delta y = 0.12$ мм. В пределах ячейки интенсивность и, следовательно, нелинейная добавка $n_2(I)$ к показателю преломления атмосферы предполагались постоянными. В расчетах рассматривается траектория лучей, координаты которых в плоскости $z=0$, определялись методом Монте – Карло в соответствии с двухмерным гауссовским распределением.

На рис. 2 приведены результаты экспериментов по определению длины пути проходимой излучением до начала филаментации в зависимости от мощности излучения с учетом (кривая 1) и без учета (кривая 2) влияния дифракции и при наличии турбулентности, с учетом дифракции (кривая 3). Как видно из графиков, с увеличением мощности импульса вследствие того, что излучение до начала филаментации проходит незначительное расстояние по сравнению с дифракционной длиной, влияние дифракции проявляется слабее. Относительное удлинение расстояния до начала филаментации с учетом дифракции при P=8*P_{cr} составило 8%. При уменьшении мощности импульса влияние дифракции усиливается и при P=2*P_{cr} , составило 55%. Для условий, реализованных в наших расчетах влияние дифракции при $P \geq 5 * P_{cr}$ незначительно. При меньших значениях мощности необходимо учитывать влияние дифракции на длину формирования нелинейного фокуса.

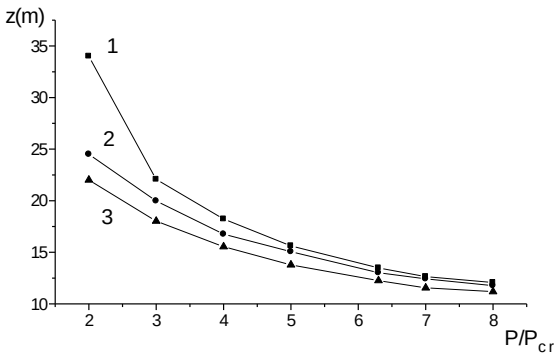


Рис.2. Длина образования нелинейного фокуса в зависимости от мощности лазерного импульса в регулярной среде, 1 – с учетом дифракции, 2 – без учета дифракции, 3 – с учетом дифракции в турбулентной атмосфере

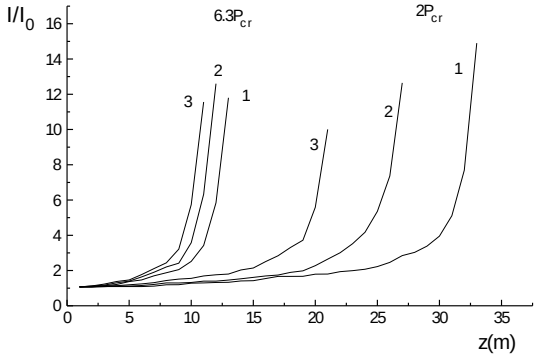


Рис.3. Относительное изменение максимума интенсивности в центральном поперечном сечении импульса с мощностью P=6.3P_{cr}, и P=2P_{cr} в регулярной среде (1), и в турбулентной атмосфере при двух значения C_n^2 (C_n^2(3) > C_n^2(2).

На рис. 3 приведена зависимость пиковой интенсивности в центральном временном слое от пройденного расстояния. Влияние турбулентности приводит к ускорению процесса нарастания пиковой интенсивности. На на

графике приведены зависимости значения интенсивности от расстояния для двух значений мощности и при двух различных значениях C_n^2. Здесь же для сравнения приведена зависимость интенсивности в отсутствии турбулентности. Как и следовало ожидать при одинаковой турбулентности и $P=2*P_{cr}$ влияние турбулентности проявлялось сильнее, чем при $P=6.3*P_{cr}$. Увеличение турбулентности в каждом случае приводило к уменьшению длины формирования нелинейного фокуса. Для описания влияния ансамбля аэрозольных частиц используется метод, предложенный в для описания неоднородностей самой среды. Этот метод предложено распространить и на дисперсную среду. На основе предложенного метода, дисперсная среда представляется в виде последовательности слоев шириной Δz, и все частицы, которые находятся в одном дисперсном слое, сосредо-точены в одной плоскости, в так называемом аэрозольном экране. Влияние турбулентности атмосферы описывается другим фазовым экраном. На рис.4 приведены результаты проведенных экспериментов. Эксперименты были проведены для двух значений мощностей в центральном слое; **a-** P_0 = 30*10^9 Вт, **b -** P_0 = 300*10^9 Вт, которые в 5 и 50 раз превышают критическую мощность самофокусировки в воздухе. Линия 1 - в каждой группе соответствует экспериментам, полученным для случая влияния только керровской нелинейности, линии 2 - эксперименты с учетом влияния турбулентности и керровской нелинейности, линии 3 – эксперименты с учетом влияния аэрозолей и керровской нелинейности. Аэрозоль предполагались монодисперсной с диаметром частиц d = 30 мкм.

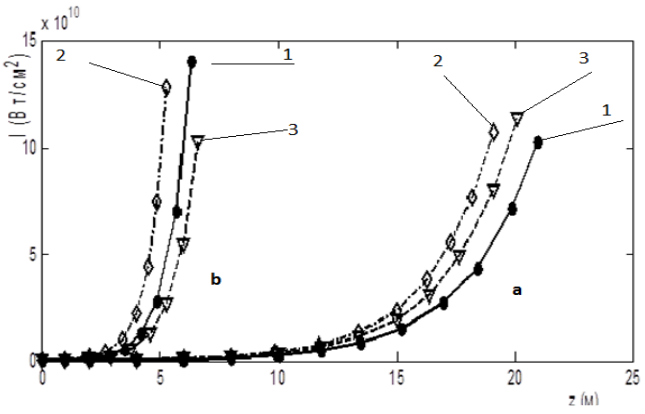


Рис.4. Зависимость интенсивности излучения в центральном временном слое импульса от пройденного расстояния.

Как видно из представленных графиков, P_0 = 30*10^9 Вт (Рис.4. **a),** влияние и турбулентности, и аэрозолей ускорило процесс фокусировки, однако влияние аэрозолей сказывается меньше чем турбулентности. При - P_0 = 300*10^9 Вт (Рис.4. **b)** влияние турбулентности ускорило процесс фокусировки, влияние аэрозолей вызвало замедление процесса фокусировки.

Наибольшее влияние на распространение излучения и на формирование филаментов оказывают крупные аэрозоли. Это объясняется тем что, в импульсе с большой мощностью иметься участки с размерами порядка аэрозолей и мощностью превышающей критическую мощность самофокусировки. Такие участки испытывают фокусировку, и длина формирования филамента сокращается. При меньших мощностях, фокусировка на аэрозолях вносит неоднородности на формирующиеся центры

фокусировки, обусловленные нелинейностью среды, что приводит к пространственной неустойчивости пучка. Это увеличивает вероятность распада центра фокусировки. Как показали эксперименты, аэрозоли меньших размеров (d~2 мкм и менее) практически не оказывают влияние на процесс формирования филаментов вне зависимости от пиковой мощности излучения.

На основе проведенных численных экспериментов можно утверждать что, влияние атмосферного аэрозоля на распространение ультракоротких импульсов лазерного излучения в атмосфере зависит от пикового значения мощности излучения, и от размеров аэрозолей. При больших пиковых мощностях крупные аэрозоли вызывают ускорение процесса фокусировки. При малых мощностях влияние крупных аэрозолей замедляет процесс формирования филамента. Аэрозоли с малыми размерами практически не оказывают влияния на формирование филаментов.

В четвертой главе «**Филаментация ультракоротких лазерных импульсов в приближении волновой оптики»** приведены результаты численных экспериментов по исследованию филаментации лазерного излучения, полученных с использованием волнового приближения в сочетании с методом фазовых экранов. Использование метода фазовых экранов основывается на ряде предположений, которые накладывают на среду и на излучение определенные ограничения. С учетом этих ограничений, комплексную амплитуду поля $\boldsymbol{E}(\mathbf{r},z,t)$ можно записать в виде,

$$2ik_0\frac{\partial \boldsymbol{E}}{\partial \mathrm{z}} = \Delta_\perp \boldsymbol{E} - k_0\frac{\partial^2 k}{\partial \omega^2}\frac{\partial^2 \boldsymbol{E}}{\partial \eta^2} + k_0^2\frac{\varepsilon_{\text{нл}}+\boldsymbol{\varepsilon}_{\text{но}}}{\varepsilon}\boldsymbol{E} - ik_0\alpha_\Sigma \boldsymbol{E}, \qquad (12)$$

где $\eta = t - z/u_{\text{гр}}$ - время в сопровождающих координатах, $k_0 = \omega\sqrt{\varepsilon\varepsilon_0\mu_0}$ - волновое число для невозмущенной среды, ε_0, μ_0 – электрическая и магнитная постоянные, $\varepsilon = \mathrm{Re}\,(\boldsymbol{\varepsilon})$, $\varepsilon_{\text{нл}} = \mathrm{Re}\,(\boldsymbol{\varepsilon}_{\text{нл}})$, $\varepsilon_{\text{но}} = \mathrm{Re}\,(\boldsymbol{\varepsilon}_{\text{но}})$. Коэффициент затухания подчиняется следующим соотношениям

$$\alpha_\Sigma = \alpha + \alpha_{\text{не}} + \alpha_{\text{но}}, \qquad \alpha = -k_0\mathrm{Im}(\boldsymbol{\varepsilon}),$$
$$\alpha_{\text{нл}} = -k_0\,\mathrm{Im}(\boldsymbol{\varepsilon}_{\text{нл}}), \qquad \alpha_{\text{но}} = -k_0\,\mathrm{Im}(\boldsymbol{\varepsilon}_{\text{но}}), \qquad (13)$$

Метод фазовых экранов хорошо описывает характеристики сплошной среды, если расстояние между экранами Δz мало по сравнению с длинами характерного изменения поля по эволюционной координате. К этим длинам относятся: длина нелинейности $L_{\text{нл}}$, длина дисперсии $L_{\text{дп}}$, дифракционная длина $L_{\text{дф}}$, длина экстинкции. Это условие можно записать в виде

$$\Delta z \ll min\left\{L_{\text{нл}}, L_{\text{дп}}, L_{\text{дф}}, \alpha^{-1}\right\} \qquad (14)$$

При выполнении условия (14) эффекты нелинейности, дисперсии, дифракции и поглощения слабо влияют на изменение светового поля на слое Δz. Это позволяет представить слой нелинейной случайно – неоднородной среды с толщиной Δz системой из двух экранов. Один из них имитирует флуктуации диэлектрической постоянной обусловленные неоднородностью среды, другой флуктуации наведенные внешним полем. Исходя из условий эксперимента можно пренебречь влиянием материальной дисперсией и поглощениям излучения. Влияние плазмы учитывается введением

ограничения на величину интенсивности и тогда распространение ультракоротких лазерных импульсов можно описать уравнением

$$2ik_0\frac{\partial E}{\partial z} = \Delta_\perp E + 2k_0 n_2|E^2|E + 2k_0 n_1 E \qquad (15)$$

которое, решается методом расщепления по физическим факторам. Исходя из выше сказанного была разработана компьютерная модель процесса формирования и распространения филаментов в турбулентной атмосфере. Используя разработанную модель было исследовано влияние эллиптичности пучка на филаментацию лазерных импульсов. Проведенные численные эксперименты показали что, эллиптичность пучка приводит к удлинению расстояния формирования филаментов в целом по пучку, в результате чего общая длина мультифиламента удлиняется по сравнению с круглым пучком. В тоже время число филаментов в поперечном сечении эллиптического пучка, в среднем, меньше чем в круглом пучке. Эти выводы хорошо согласуются с результатами других авторов, где отмечено увеличение длины филамента при придании пучку эллиптичной формы с помощью системы линз.

Были проведены эксперименты по выявлению влияния турбулентности атмосферы на процесс формирования и распространения филаментов в атмосфере. Проведенные эксперименты показали, что в поперечном сечении пучков на одинаковом расстоянии от начальной плоскости, филаментов больше в случае распространении по трассе с большей турбулентностью. На основании проделанных численных экспериментов можно утверждать, что увеличение турбулентности атмосферы, при прочих равных условиях, приводит к увеличению числа филаментов в поперечном сечении пучка. Увеличение числа филаментов в поперечном сечении приводит к увеличению потерь на ионизацию, что в свою очередь сокращает общую длину филаментации. На рис. 5 приведена зависимость средней длины формирования N – того филамента в зависимости от порядкового номера филамента в пучке, для двух значений пиковой мощности.

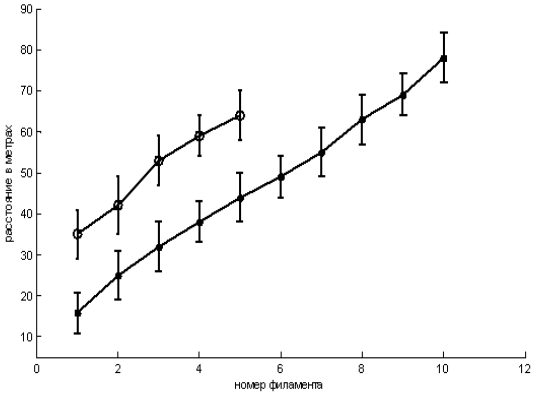


Рис.5. Расстояние z до начала формирования очередного N – того филимента при различных пиковых мощностях импульса P_0 =1.0*10^{11} Вт (светлые кружки), и при P_0 =5.0*10^{11} Вт (темные кружки).

При мощностях излучения значительно превышающих критическую мощность, с увеличением расстояния z число филаментов в пучке возрастает. С увеличением мощности лазерного импульса филаменты начинают формироваться ближе к выходной апертуре лазера. Как видно из рис.5, вследствие случайного разброса расстояний до начала филамента, в общем случае нельзя с уверенностью сказать, сколько филаментов будет

образовываться от импульса к импульсу на заданном расстоянии от источника излучения. В связи с этим, для получения информации о количестве определяемых компонент в единичном объёме атмосферы, при широкополосном зондировании, необходимо применение статистических методов обработки информации.

При распространении серии импульсов, помимо эффекта Керра, вследствие неравномерного распределения интенсивности и частичного поглощения излучения в атмосфере, в трассе распространения излучения возникает градиент температур, что в свою очередь создает дополнительный волноводный канал. Для проверки этого предположения был разработан программный продукт моделирующий фазовые экраны коррелированные во времени. Это позволило учесть эволюцию состояния атмосферы во времени.

Используя коррелированные экраны в сочетании с методом расщепления по действующим факторам, были проведены численные эксперименты результаты которой приведены ниже. На рис.6 приведены координаты x - составляющих радиусов-векторов, проведенных в плоскости $X0Y$ от начала координат совпадающей с центром пучка в начальной плоскости, к точке начала филамента для двух различных значений скорости ветра. На рисунке по оси абсцисс отложены порядковые номера импульсов в серии, по оси ординат - расстояния смещения, нормированные на радиус пучка в начальной плоскости. На рис.6 кривая 1 соответствует отсутствию среднего ветра в направлении, поперечном направлению распространения излучения, кривая 2- средней скорости ветра $v_{\text{ср}}$ =0.2 м/с. Флуктуации поперечной составляющей скорости ветра считались распределенными нормально с дисперсией $\sigma = 0.5$. Как показали эксперименты, под воздействием бокового ветра тепловой канал смещается и увлекает за собой лазерный импульс. Величина среднего смещения x-координаты начала филамента зависит от соотношения $\frac{t}{\tau}$, и достигает максимума при когда это соотношения равно 0.5, то есть когда максимум возмущения показателя преломления наведенного тепловым воздействием смещается под воздействием ветра на половину радиуса пучка. При отсутствии бокового ветра среднее смещение отсутствует и нелинейный фокус случайным образом «блуждает» по поперечной плоскости. Как

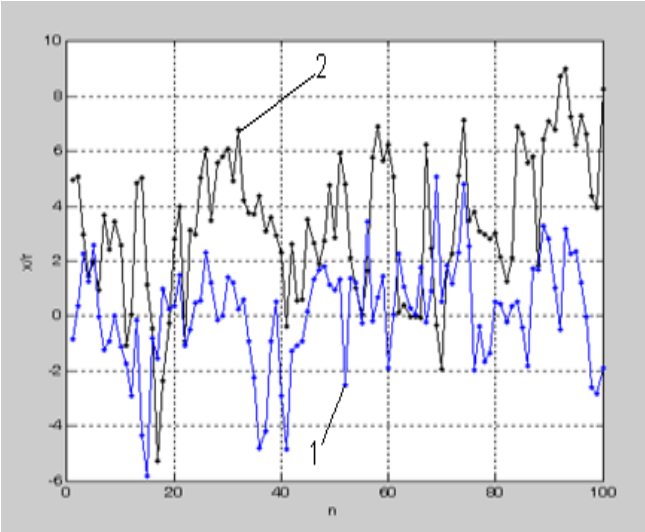


Рис.6.Флуктуации x-координаты начала филамента при коррелированных турбулентных экранах и наличия ветра. 1-средняя скорость ветра равна нулю, 2-средняя скорость ветра *0.2 м/с*.

показали проведенные эксперименты при моделировании прохождения серии импульсов лазерного излучения в атмосфере необходимо учитывать не только изменение состояния атмосферы за счет турбулентности и керровской нелинейности, но и смещение лазерного пучка за счет теплового действия излучения на атмосферу и бокового ветра.

Пятая глава «**Фундаментальные пределы точности регистрации электромагнитного излучения оптического диапазона»** исследованию квантового характера излучения на процесс регистрации излучения в установках широкополосного зондирования атмосферы. Современные методы регистрации излучения основаны на явлении фотоэффекта (внешнем или внутреннем). Процесс выбивания фотоэлектрона из вещества имеет принципиально квантовый, т.е. сугубо случайный характер. Поэтому при всякой фотоэлектрической регистрации света неизбежны флуктуации тока (числа фотоэлектронов), обусловленные квантовыми эффектами взаимодействия излучения с веществом. При регистрации слабого излучения используют метод счета фотонов. В случае отсутствия флуктуаций интенсивности излучения дисперсия фотоотсчетов равна

$$\sigma_n^2 = \langle n^2 \rangle - \langle n \rangle^2 = \langle n \rangle \qquad (16)$$

где n – число отсчетов в выборке, σ_n^2 – дисперсия фотоотсчетов. При наличии флуктуаций интенсивности (что соответствует приему излучения в турбулентной атмосфере) дисперсия фотоотсчетов равна

$$\sigma_n^2 = \langle n^2 \rangle - \langle n \rangle^2 = \langle n \rangle + \alpha^2 * (\langle U^2 \rangle - \langle U \rangle^2) = \langle n \rangle + \alpha^2 \sigma_U^2 \qquad (17)$$

Таким образом, дисперсия числа фотоотсчетов (флуктуации фототока) при регистрации излучения со флуктуирующей интенсивностью всегда больше чем в регулярного излучения. Нами были проведены эксперименты по исследованию РВФ при временах отбора порядка времени корреляции интенсивности, лабораторных условиях, что позволило обеспечить стационарность и контроль основных параметров трассы в степени, недоступной для натурно-атмосферного эксперимента. Исследования проводились для трех различных состояний наведенной турбулентности, которые, судя по значениям β_n^2 , соответствуют слабой и средней турбулентности в реальной атмосферной трассе. Для каждого состояния турбулентности трассы РВФ определялось при 10 значениях времен отбора. Число отсчетов в каждом эксперименте по определению РВФ составило ~10^6, что обеспечивало достаточное статистическое усреднение. С целью исключения случайных ошибок и обеспечения достаточной точности исследований, для каждого времени отбора *T*, РВФ определялось по 10 раз. Величины, характеризующие распределение фотоотсчетов, определялись путем усреднения по всем реализациям при одинаковых значениях времен отбора. На рис.7 приведены усредненные по всем реализациям корреляционные функции фотоотсчетов для трех различных состояний

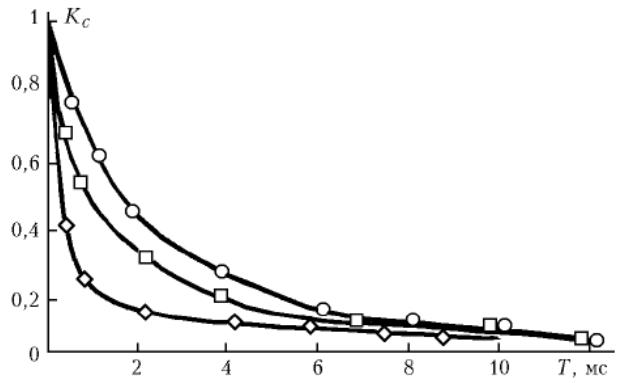


Рис.7. Корреляционные функции фотоотсчетов при различных состояниях турбулентности. Сплошная линия – усредненные значения, точки – усредненные экспериментальные значения: где ∘ – при τ_c = 3,63 мс; □ - τ_c = 2,48 мс; ◊ - τ_c = 0,68 мс Величина геометрических фигур соответствует среднеквадратическому отклонению.

наведенной турбулентности. Время корреляции интенсивности считалось равным среднему значению времен корреляции фотоотсчетов, полученных в эксперименте. Среднеквадратическое отклонение значений времен корреляций интенсивности не превышало 7% для каждого состояния турбулентности трассы, что указывает на достаточную стационарность оптических характеристик трассы распространения.

Как показали результаты экспериментов, РВФ негауссова поля, при $T \approx \tau_c$, значительно отличается от известных приближенных распределений.

На рис.8 приведена зависимость экспериментальных коэффициентов асимметрии от времени отбора при стационарной турбулентности с $\sigma^2 = 0.49$. Для сравнения здесь же приведены коэффициенты асимметрии распределений: а) Пуассона; б) Диамента–Тейча, определенного на основании использования выражения для моментов энергии поля и их связи с факториальными моментами фотоотсчетов; в) Диамента–Тейча, рассчитанного с использованием вероятностей отсчетов для соответствующего распределения («усеченное» распределение Диамента–Тейча, см. ниже).

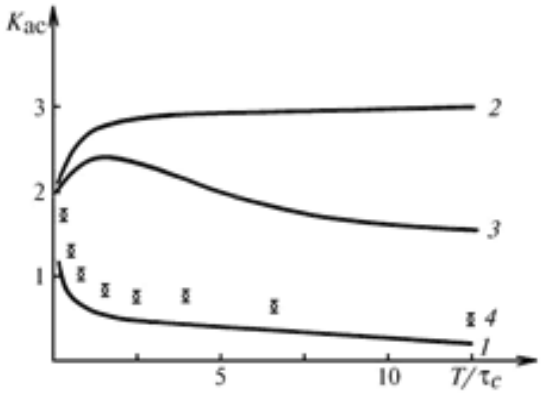


Рис.8. Зависимость коэффициента асимметрии от времени отбора: *1* – K_{ac} распределения Пуассона; *2* – Диамента–Тейча; *3* – Диамента–Тейча с усечением; *4* – экспериментальные значения с σ^2 = 0,62.

Ввиду непригодности известных распределений для описания экспериментальных РВФ при $T \approx \tau_c$, было необходимо найти новые распределения, которые могли бы описать экспериментальные результаты. В связи с этим нами была проделана работа по определению характера изменения интегральной интенсивности соответствующей условиям нашего эксперимента. Как показали численные расчёты распределение интегральной интенсивности можно описать логнормальным распределением с дисперсией зависящей от времени отбора. Результаты

многочисленных экспериментов позволяют утверждать, что общий характер распределения интегральной интенсивности не зависит от времени отбора. От времени отбора зависит лишь параметр распределения. И если соответствующие значение σ_U^2 и среднее число отсчетов из соответствующего эксперимента подставить в распределение Диамента–Тейча, то последнее с большой точностью опишет экспериментальное распределение фотоотсчетов, полученное при $T \approx \tau_c$. Для получения полного соответствия между экспериментом и теорией необходимо теоритическое распределение «усекать» на уровне экспериментальных значений. Для проверки этого утверждения было проведено сравнение экспериментальных и теоретических распределений на уровне четвертых моментов. На рис. 9 приведены графики коэффициентов эксцесса соответствующих распределений. Как видно из графиков, даже на уровне четвертых моментов предложенное распределение хорошо описывает экспериментальные результаты. Совпадение распределений на уровне четвертого момента свидетельствует о высокой точности описания РВФ лазерного излучения, прошедшего турбулентную среду, распределением Диамента–Тейча с параметром σ_U^2 (T/τ_c), в широком диапазоне времен отбора при логнормальном распределении интенсивности.

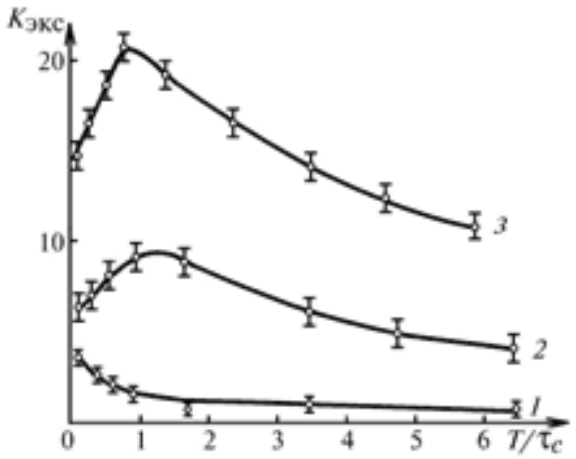


Рис.9. Зависимость коэффициента эксцесса от времени отбора для трех различных состояний турбулентности. *1* – τ_c = 0,68 мс; *2* – τ_c = 2,48 мс; *3* – τ_c = 3,63 мс

Обычно при регистрации слабого оптического излучения в режиме счета фотонов приемное устройство состоит из фотоэлектрического преобразователя, дискриминатора, схемы формирования стандартных импульсов. Каждый из указанных элементов обладает конечным быстродействием, в результате чего часть одноэлектронных импульсов не регистрируются, поэтому характеристики фотоэлектронов (первичного потока) и фотоотсчетов (вторичного потока) отличаются друг от друга.

Для учета влияния «мертвого времени» счетного устройства была разработана программа, генерирующая потока фотоэлектронов с заданными корреляционной функцией и распределением вероятностей, и функцией учета «мертвого времени». Как показали численные эксперименты, влияние МВ на моменты распределения до значений $\Delta t/T < 10^{-5}$ пренебрежимо мало. Начиная со значений $\Delta t/T \approx 10^{-5}$, постепенно увеличивается влияние эффекта МВ и при значениях $\Delta t/T \approx 10^{-4}$ искажения момента четвертого порядка составляют порядка *4-8%* . Более низкие

моменты, как и следовало ожидать испытывают меньшие искажения, хотя при значениях $\Delta t/T \approx 10^{-3}$ искажения момента первого порядка, т.е. среднего, составляет *5-7%*. При еще большем увеличении соотношения $\Delta t/T$ происходит быстрое увеличение влияния эффектов «мертвого времени» счетчика и результаты сильно искажаются.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе на основе проведенных исследований получены следующие наиболее важные результаты :

1. Разработан алгоритм и создан програмный продукт для генерирования фазовых экранов моделируюших атмосферную турбулентность методом скользащего суммирования. Предложена и реализована методика сравнения создаваемых фазовых экранов с реальным воздействием непрерывной среды на фазу излучения путем сравнения структурных характеристок показателя преломления атмосферы и набега фазы на фазовом экране.
2. Создана модель позволяющая описать распространение ультракоротких импульсов лазерного излучения в атмосфере в приближении лучевых траекторий. Получено рекуррентное выражение описывающее изменение траекторий лучей в аксиально - симметричной среде, которая позволяет моделировать процесс распространение и филаментацию ультракоротких лазерных импульсов в различных средах и, в частности, в атмосфере. В дальнейшем условие аксиально-симметричности среды может быть снято за счет использования градиента распределения интенсивности.
3. Разработано программное обеспечение для определения длины нелинейного фокуса в изотропной, неоднородной среде. Установлено что, влияние турбулентности атмосферы приводит как к сокращению средней длины формирования филамента, так и к значительным флуктуациям длины образования нелинейного фокуса.
4. Установлено что влияние атмосферного аэрозоля на распространение ультракоротких импульсов лазерного излучения в атмосфере зависит от пикового значения мощности излучения, и от размеров аэрозолей. При больших пиковых мощностях крупные аэрозоли вызывают ускорение процесса фокусировки. При малых мощностях влияние крупных аэрозолей замедляет процесс формирования филамента. Аэрозоли с малыми размерами практически не оказывают влияния на формирование филаментов.
5. Установлено что, пространственное распределение интенсивности излучения в плоскости апертуры оказывает кардинальное влияние на процесс распространения и самофокусировки излучения в среде. Изменяя эллиптичность пучка в начальной плоскости можно удлинять расстояния формирования филаментов в целом по пучку, и управлять общей длиной мультифиламента.
6. Показано что, при больших мощностях излучения, филаментация начинается на меньших расстояниях от источника излучения. Установлено

что, среднее число филаментов в мультифиламенте увеличивается с расстоянием линейно, однако число филаментов в мультифиламенте носит случайный характер.

7. Показано что, лазерный импульс в следствии частичного поглощения излучения в среде испытывает влияние теплового изменения показателя преломления среды уже при сравнительно малых мощностях излучения и относительно небольших расстояниях распространения. Впервые установлено что, при распространении серии импульсов в атмосфере, наиболее сильное влияние теплового воздействия проявляется, когда возмущения наведенные в показателе преломления атмосферы успевают сместится к приходу следующего импульса на половину радиуса пучка.

8. Впервые, по экспериментальным распределениям фотоотсчетов для негауссова поля впервые установлена зависимость относительной дисперсии фотоотсчетов β_n^2 от времени отбора. Установлено, что общий характер распределения интегральной интенсивности не зависит от времени отбора. От времени отбора зависит лишь параметр распределения.

9. Впервые экспериментально показана, измерение лишь одной корреляционной функции фотоотсчетов дает полную информацию о статистических характеристиках флуктуации интенсивности лазерного излучения, прошедшего турбулентную атмосферу в широком диапазоне времен отбора, включая $T \approx \tau_c$. При этом отпадает необходимость набора большого количества отсчетов с целью получения распределения фотоотсчетов, которую можно определить из корреляционной функции.

10. Показано что, время необходимое для восстановления счетчика при фотоносчетных оказывает значительное влияние на статистику фотоотсчетов. Разработан алгоритм и создан программный продукт для определения влияния «мертвого времени» приемника на статистику фотоотсчетов, которая оперативно позволяет ввести соответствующие поправки в экспериментальное распределение фотоотсчетов.

SCIENTIFIC COUNCIL No.DSc.02/30.12.2019.FM.65.01 ON AWARDING OF SCIENTIFIC DEGREES AT THE INSTITUTE OF ION-PLASMA AND LASER TECHNOLOGIES

NATIONAL UNIVERSITY OF UZBEKISTAN

KASIMOV ABDUGAPPAR KAKHAROVICH

PROPAGATION OF LASER RADIATION IN ISOTROPIC MEDIA

01.04.05 – Optics

ABSTRACT OF DOCTORAL DISSERTATION (DSc)
ON PHYSICAL AND MATHEMATICAL SCIENCES

TASHKENT – 2022

The subject of doctoral dissertation is registered at the Supreme Attestation Commision at the Cabinet of Ministers of the Republic of Uzbekistan under number B2017.2.DSc/FM76.

The dissertation has been prepared at the National University of Uzbekistan.

The abstract of the dissertation in three languages (Uzbek, Russian, English (resume)) has been posted on the website of the Scientific Council (http://iplt.uz/) and on Information-educational portal "ZiyoNet" (http://www.ziyonet.uz/).

Scientific consultant:	**Sagdilla Bakhramov** doctor of physical and mathematical sciences
Official opponents:	**Rahmatullayv Iloys,** doctor of physical and mathematical sciences
	Semenov Denis doctor of physical and mathematical sciences
	Boltayv Ganjaboy doctor of physical and mathematical sciences
Leading organization:	**Tashkent State Technical University named after Islam Karimov**

The defense will take place on «22» 02 2022 at 14^{30} at the meeting of the Scientific Council number DSc.02/30.12.2019.FM.65.01 at the Institute of Ion-Plasma and Laser Technologies, (Address: 100125, Uzbekistan, Tashkent city, 33, Durmon yuli str. Phone: (99871) 262-42-54, e-mail: info@iplt.uz.

The doctoral dissertation is can be looked throughin the Information-Resource Centre of theInstitute of Ion-Plasma and Laser Technologies (is registered № 1) (Address: 100125, Uzbekistan, Tashkent city, 33, Durmon yuli str. Phone: (99871) 262-42-54 Phone: (99871) 262-32-54.)

The abstract of the dissertation is sent out on «09 02 2022.

(mailing report № 1 on «09» 02.2022).

Kh.B. Ashurov
Chairman of Scientific Councilon Award of Scientific Degrees, Doctor of Technical Sciences, Professor

I.D. Yadgarov
Scientific Secretary of Scientific Councilon Award of Scientific Degrees, Doctor of Physical and Mathematical Sciences

B.E. Umirzakov
Chairman of Scientific Seminar under Scientific Council on Award of Scientific Degrees, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, Professor

INTRODUCTION (abstract of DSc thesis)

Topicality and necessity of the thesis. The rapid development of laser physics in the past decades has made it possible to create devices that generate pulsed optical radiation with durations in the femtosecond range. The localization of energy in such small time and space intervals made it possible to bring the strength of the radiation fields to values comparable to and higher than the intra-atomic field values. Such a high intensity of radiation propagating in an isotropic medium causes a whole range of nonlinear processes that open up new prospects for the use of laser radiation, among which the phenomenon of filamentation stands out for its obvious practical applications. So, for example, the possibility of creating a broadband LIDAR for sensing atmospheric pollution and forecasting the weather, protecting various objects from lightning strikes and ultra-long-range target detection during laser ranging, etc.

Conformity of the research to the priority areas of science and technology development of the Republic of Uzbekistan. The research carried out in the course of work on the dissertation corresponds to the priority directions of the development of science and technology in the Republic of Uzbekistan for 2012-2020, noted in the paragraph "PFI-2 Research of topical problems of physics, astronomy and astrophysics."

The goal of the research is to study the process of propagation of high-power ultrashort laser pulses in a turbulent atmosphere, using statistical methods of processing the results that are used in the study of random processes.

The object of the research is a powerful ultrashort laser pulse propagating in a turbulent atmosphere in the self-channeling mode.

The scientific novelty of the research is as follows:

For the first time, a recurrent expression is obtained that describes the change in ray trajectories in an axially symmetric medium, which corresponds to the condition of the formation and propagation of a filament. In the future, the condition of axial symmetry of the medium can be removed by using the gradient of the intensity distribution.

For the first time, the possibility of using the model of random lenses in modeling the propagation of radiation in a turbulent atmosphere and an atmosphere containing aerosols using the method of ray trajectories was shown, which contributed to a decrease in fluctuations in determining the average length of filament formation.

The influence of atmospheric aerosol on the propagation of ultrashort pulses and on the formation of a filament in the atmosphere is investigated, and the degree of influence of aerosols depending on the size of the aerosol on the propagation of laser pulses is established.

The effect of the ellipticity of the beam on the propagation of an ultrashort laser pulse and on the formation of a filament at a pulse power tens of times higher than the critical self-focusing power has been investigated.

The influence of the thermal change in the refractive index of the medium, due to absorption of radiation, on the propagation of ultrashort pulses in the atmosphere at a given wind regime is investigated.

From the experimental probability distributions of photocounts for a non-Gaussian field, the dependence of the relative variance of photocounts β_n^2on the sampling time has been established for the first time. It was found that the general nature of the distribution of the integral intensity does not depend on the sampling time. Only the distribution parameter depends on the sampling time.

It is experimentally shown for the first time that the measurement of only one correlation function of intensity provides complete information on the statistical characteristics of photocounts of laser radiation that has passed through a turbulent atmosphere in a wide range of sampling times, including $T \approx \tau_c$.

Implementation of the research results. The recurrence relations obtained to describe the trajectory of rays in cylindrically - layered media were used in a number of studies described in foreign publications (S. Johnson, F. Kuppers, S. Pau Efficiency of continuous-wave solar pumped semiconductor laser, Optics & Laser Technology, Volume 47, April 2013, Pages 194-198; P. Reusswig, S. Nechayev, M. Tomes, T. Carmon, M. Baldo, and C. Rotschild Efficient incoherent pumping for high-Q micro-lasers, OSA Technical Digest (online) (Optical Society of America, 2012); H. Costa, J. Almeida, D. Liang, D. Garcia, M. Catela, BD Tibúrcio, C R. Vistas Design of a multibeam solar laser station for a megawatt solar furnace SPIE, Engineering Volume 59 No. 8, AUGUST 2020; Vistas, C. R., Liang, D., Garcia, D., Tibúrcio, B. D., & Almeida, J. (2020). 32 W TEM 00-Mode Side-Pumped Solar Laser Design. Applied Solar Energy, 56 (6), 449-457). The use of the results obtained allowed the authors to show the possibility of achieving significantly higher results in the conversion efficiency of various lasers.

The technique for reconstructing the photon density distribution function from the photon correlation function, obtained in the framework of the thesis, was used at the Department of Optics and Laser Physics of the National University of Uzbekistan in 2009-2011. No. ITD 15-020 (Development of a laser photon-correlation spectrometer for a diagnostic sensitive environment) (reference № 01/11-7609 of the National University of Uzbekistan dated November 24, 2021). The use of these results made it possible to determine the photon distribution density function from the photon correlation function using the relation given in the thesis, and thereby increase the efficiency of the developed device.

Information on the process of self-focusing during the propagation of ultrashort laser pulses in the atmosphere, obtained on the basis of scientific work within the framework of the dissertation, was used in a fundamental project carried out at the Department of General Physics of the Tashkent State Technical University in 2012-2016 No. F2-49 "Quasi-synchronous interaction of ultrashort laser pulses with environment in quadratic and cubic nonlinear absorbing media with spatial modulation "(Reference № 01/9-14-3302 from Tashkent State Technical University dated November 22, 2021). The use of these results made it possible to prevent the phenomenon of filamentation during the propagation of ultrashort laser pulses in

inert gases and to reduce the factors affecting the generation of secondary and tertiary harmonics in inert gases.

Structure and volume of dissertation. Dissertation consists of introduction, five chapters, conclusion, list of references and supplement. The dissertation contains 192 pages of printed text including 49 figures.

СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ

ЭЪЛОН ҚИЛИНГАН ИШЛАР РЎЙХАТИ

I бўлим (I часть; part I)

A1. Bakhramov S.A., Kasimov A.K., Payziev Sh.D. *Peculiarities in propagation of high-power ultra-short laser pulses in the atmosphere.* // Atmospheric and oceanic optics. 2008. V. 21. No. 01. P. 69-72.

A2. Бахрамов С.А., Касимов А.К., Пайзиев Ш.Д. *Мультифиламентация ультракоротких лазерных импульсов в турбулентной атмосфере*, УФЖ, т.14, №3, с.166-174, 2012

A3. Bakhramov S. A., Kasimov A. K., Paiziev Sh. D., *Account for the detector's "dead time" using Monte Carlo method* // Atmospheric and oceanic optics. 2001, v.14, № 8, p. 665.

A4. Bakhramov S.A., Kasimov A.K., Payziev Sh.D., Payzieva D.E. *Statistics of photocounts of laser radiation passed through the turbulent atmosphere for non-Gaussian radiation fields.* // Atmospheric and oceanic optics. 2003. V. 16. No. 04. P. 295-298.

A5. Fazilov, A., Riskiev, T.T., Abdurakhmanov, A.A., Bakhramov, S.A., Makhkamov, Sh., Mansurov, M.M., Mukhamediev, E.J., Paiziev, Sh.D., Klychev, Sh.I., Saribaev, A.S., Kasimov, A.K. *Concentrated solar energy conversion to powerful laser radiation on neodymium activated yttrium-aluminum garnet.* Applied Solar Energy Vol 44, Issue 2, Pages 93-96, 2008.

A6. Бахрамов С.А., Касимов А.К., Пайзиев Ш.Д., Пайзиева Д.Э, *Корреляционные и статические характеристики фотоотсчетов лазерного излучения, прошедщего через турбулентную атмосферу*, УФЖ, т.54, №4, с.254-259, 2003

A7. Бахрамов С.А., Касимов А.К. Пайзиев Ш.Д. *Влияние турбулентности атмосферы на распространение ультракоротких импульсов,* Узбекский Физический Журнал, 2006, т. 8, № 1-2, с.68-73

A8. Bakhramov S.A., Kasimov A.K., Payziev Sh.D. *Statistical characteristics of laser radiation transmitted through the turbulent atmosphere for sampling times of the order of the intensity correlation time*. // Atmospheric and oceanic optics. 1997. V. 10. No. 08. P. 564-567.

A9. S. Bakhramov, A. Kasimov, and Sh. Payziyev. *Fluctuations of the filament onset of high-power laser radiation in a turbulent atmosphere*, Proc. SPIE 6733, 67332Y (2007) Full Text: [PDF (260 kB)] (6 pages).

A10. Бахрамов С. А., Касимов А. К., Исмаилов М. З. *Тепловое пространственное смещение ультракоротких лазерных импульсов при распространении в атмосфере.* Узбекский Физический Журнал, т.22 (2020), № 3, с. 166-173

A11. Касимов А.К. *Влияние атмосферного аэрозоля на распространение ультракоротких лазерных импульсов и формирование филаментов.* ДАН РУз, 2020, № 6, с. 35-39.

II бўлим (II часть; part II)

A12. Пайзиев Ш. Д., Касимов А. К. *Программа математической модели расчета термической линзы в твердотельных активных элементах лазеров*. Свидетельство об официальной регистрации программы для электронных вычислительных машин. № DGU 07005. 2019 г.

A13. Bakhramov, S., Kasimov, A., & Payziyev, Sh. (2010). *Modelling Of Fluctuations of Refractive Index of Atmosphere.* Program and Abstracts of the ninth Joint Uzbek-Korea Symposium Nanoscience: Problems and Prospects on Quantum Functional Materials and Devices, (p. 48). Uzbekistan: Heat Physics Department of Uzbekistan Academy of Sciences. https://inis.iaea.org/search/search.aspx?orig_q=reportnumber:%22INIS-UZ--171%22

A14. Бахрамов С.А., Касимов А.К., Пайзиев Ш.Д. *Влияние турбулентности атмосферы на распределение вероятностей фотоотсчетов зондирующего излучения.* Тезисы докл. Региональной конференции «Космические исследования, технологии и конверсия», Ташкент 2001, с 11-12

A.15 Бахрамов С.А., Касимов А.К., Пайзиев Ш.Д. *Моделирование процесса распространения мощных ультракоротких лазерных импульсов в атмосфере*. Материалы третьей международной конференции «Фундаментальные и прикладные вопросы физики», Ташкент, 2006, с. 352-354.

A16. Бахрамов С.А., Касимов А.К., Пайзиев Ш.Д., Пайзиева Д.Э. *Учет искажения оптических сигналов при прохождении через атмосферу.* Сборник материалов VII – Республиканской научно - практической конференции «Передовые технологии и методы в создании и эксплуатации авиакосмической техники» часть II, Ташкент, 2004, с. 134-138

A17. Касимов А.К. *Влияние турбулентности на формирование филаментов при распространении ультракороткого лазерного излучения в атмосфере*. Тезисы докл. IV Республиканской конференции по физической электронике UzPEC – 4, Ташкент, 2005, с. 165

A18. Касимов А.К. *Самофокусировка лазерного излучения в атмосфере в приближении геометрической оптики.* Труды научно-практического семинара «Лазерная физика, прикладные аспекты оптики и лазерной физики» Ташкент, 2006, с. 24-28

A19. Касимов А. К., Шайимов Ф. Ф., *Исследование распространения мощных ультракоротких лазерных импульсов в атмосфере* , Тезисы докл. III международной конференции по молекулярной спектроскопии, Самарканд, 2006, с. 50.

A20. Касимов А. К., *Влияние качества импульса на формирование филаментов при распространении ультракороткого лазерного излучения в атмосфере.* Материалы Всероссийской научно-практической конференции «Управление качеством образования, продукции и окружающей среды», г. Бийск, 2006, с. 198-201

A21. Бахрамов С.А., Касимов А.К., Пайзиев Ш.Д. *Распространение мощных лазерных импульсов в приближении геометрической оптики*. Труды Научно-

практической конференции «Лазерные технологии в промышленности медицине и сельском хозяйстве», Ташкент, 2007, с. 20-21.
А22. Бахрамов С.А., Касимов А.К., Пайзиев Ш.Д. *Средняя длина самофокусировки ультракороткого лазерного излучения в турбулентной атмосфере.* Материалы конференции «Школа голографии», Иркутск, 2007.
А23. Бахрамов С.А., Касимов А.К., Захидов К.Ю., Пайзиев Ш.Д., *Влияние турбулентности атмосферы на длину формирования нелинейного фокуса ультракоротких лазерных импульсов*. Материалы Республиканской конференции «Оптические методы в современной физике», Ташкент, 2008, стр. 107-108.
А24. Бахрамов С.А., Касимов А.К., Пайзиев Ш.Д., *Динамика развития мультифиламента в турбулентной атмосфере*. Материалы Республиканской научно-практической конференции, «Современная физика и ее перспективы», Ташкент, 2009, с. 20 – 23.
А25. Бахрамов С.А., Касимов А.К., Пайзиев Ш.Д., *Филаментация фемтосекундного лазерного импульса в атмосферном аэрозоле*. Сборник тезисов 5-той международной конференции по Физической Электронике UzPEC-5, Ташкент, 2009, с. 132.
А26. Бахрамов С.А., Касимов А.К., Пайзиев Ш.Д., *Формирование пучка филаментов в атмосфере*. Международная научно-практическая конференция «Инновация 2010». г. Ташкент.
А27. Бахрамов С.А., Касимов А.К., Пайзиев Ш.Д., *Характеристики самофокусировки ультракороткого лазерного излучения в турбулентной атмосфере.* Материалы 5-ой Всероссийской научно-практической конференции «Управление качеством образования продукции и окружающей среды», Бийск, 2011 , с. 231-234.
А28. Бахрамов С.А., Касимов А.К., Пайзиев Ш.Д., С*тохастическая филаментация эллиптических лазерных пучков в атмосфере.* Материалы Международной конференции «Актуальные проблемы физической электроники» , Ташкент 28 ноября 2012 г, стр. 128-129
А29. Касимов А.К., Муминов Б.С. *Моделирование влияния турбулентности атмосферы на распространение лазерного излучения*, «Физика фанининг бугунги ривожида истедодли ёшларни урни» Республика илмий амалий конференцияси материаллари, Ташкент 2014, стр.142-144 .
А30. Касимов А.К., Муминов Б.С. *Филаментация лазерных импульсов в турбулентной атмосфере*, «Фан тараккиетида ёшларни урни», Республика илмий амалий конференцияси материаллари, Ташкент 2014, стр. 92-95,
А31. Касимов А.К., Артыкова Н.Х. *Учет влияния дифракции на формирование филамента*, «Физика фанининг бугунги ривожида истедодли ёшларни урни» Республика илмий амалий конференцияси материаллари, Ташкент 2014, стр. 116-119.
А32. Касимов А.К., Артыкова Н.Х. *Применение методов матричной оптики в исследовании распространения лазерного излучения* «Фан тараккиетида

ёшларни урни» Республика илмий амалий конференцияси материаллари, стр. 135-138, 2014.

А33. Касимов А.К, Солиева Ф.М., Эшниязов У.А. *Формирование и развитие мультифиламентов в турбулентной атмосфере* материалы Республиканской конференции «Оптические методы в современной физике», стр. 117-119, 2016.

А34. Овлаева С.М., Мамаражабов С.С., Эралиева Ю.М., Касимов А.К., *Влияние пространственной корреляции интенсивности ультракоротких лазерных импульсов на процесс филаментации*. РИАК – XI, 2018, Ташкент.

А35. Касимов А. К., Авазова О. С., Мамадалиева М. А., *Влияние поглошения излучения на распространение ультракоротких импульсов лазерного излучения*. РИАК – XII, 2019, Ташкент, стр. 175-179.

А.36. Kasimov A.K., Mamadaliyeva M.A., Avazova O.S. “Смещение филаментов ультракороткихлазерных импульсов в атмосфере”. “Fan ta’lim va ishlab chiqarish integratsiyasi” mavzusidagi ilmiy amaliy konferensiya QarDU-2020.

Автореферат «Til va adabiyot ta’limi» журнали таҳририятида таҳрирдан ўтказилиб, ўзбек, рус ва инглиз тилидаги матнлар ўзаро мувофиқлаштирилди.

Босишга рухсат этилди:._____ йил
Бичими 60x84 1/16 , «Times New Roman»
гарнитурада рақамли босма усулида босилди.
Шартли босма табоғи 4,0. Адади: 100. Буюртма: № 05.05
Тел.: (99) 832 99 79; (97) 815 44 54
«IMPRESS MEDIA» МЧЖ босмахонасида чоп этилди.
Манзил: Тошкент ш., Яккасарой тумани, Қушбеги кўчаси, 6 уй.