

**«ФИЗИКА-ҚУЁШ» ИЛМИЙ ИШЛАБ ЧИҚАРИШ БИРЛАШМАСИ
ФИЗИКА-ТЕХНИКА ИНСТИТУТИ, ИОН-ПЛАЗМА ВА ЛАЗЕР
ТЕХНОЛОГИЯЛАРИ ИНСТИТУТИ ВА САМАРҚАНД ДАВЛАТ
УНИВЕРСИТЕТИ ҲУЗУРИДАГИ ФАН ДОКТОРИ ИЛМИЙ
ДАРАЖАСИНИ БЕРУВЧИ 16.07.2013.ФМ/Т.12.01 РАҚАМЛИ
ИЛМИЙ КЕНГАШ**

ИОН-ПЛАЗМА ВА ЛАЗЕР ТЕХНОЛОГИЯЛАРИ ИНСТИТУТИ

НЕМАТОВ ШЕРЗОД ҚАЛАНДАРОВИЧ

**ФОТОСИНТЕТИК ТИЗИМЛАРДА ХЛОРОФИЛЛ
ФЛУОРЕСЦЕНЦИЯСИНИНГ СПЕКТРАЛ-КИНЕТИК
ХАРАКТЕРИСТИКАЛАРИ**

01.04.05 – Оптика (физика-математика фанлари)

ДОКТОРЛИК ДИССЕРТАЦИЯСИ АВТОРЕФЕРАТИ

Тошкент – 2015 йил

Докторлик диссертацияси автореферати мундарижаси
Оглавление автореферата докторской диссертации
Content of the thesis of doctoral dissertation

Нематов Шерзод Қаландарович Фотосинтетик тизимларда хлорофилл флуоресценциясининг спектрал-кинетик характеристикалари	3
Нематов Шерзод Қаландарович Спектрально-кинетические характеристики флуоресценции хлорофилла в фотосинтезирующих системах.....	25
Nematov Sherzod Qalandarovich Spectral and kinetic characteristics of chlorophyll fluorescence in photosynthetic systems	47
Эълон қилинган ишлар рўйхати Список опубликованных работ List of published works.....	67

**«ФИЗИКА-ҚУЁШ» ИЛМИЙ ИШЛАБ ЧИҚАРИШ БИРЛАШМАСИ
ФИЗИКА-ТЕХНИКА ИНСТИТУТИ, ИОН-ПЛАЗМА ВА ЛАЗЕР
ТЕХНОЛОГИЯЛАРИ ИНСТИТУТИ ВА САМАРҚАНД ДАВЛАТ
УНИВЕРСИТЕТИ ҲУЗУРИДАГИ ФАН ДОКТОРИ ИЛМИЙ
ДАРАЖАСИНИ БЕРУВЧИ 16.07.2013.ФМ/Т.12.01 РАҚАМЛИ
ИЛМИЙ КЕНГАШ**

ИОН-ПЛАЗМА ВА ЛАЗЕР ТЕХНОЛОГИЯЛАРИ ИНСТИТУТИ

НЕМАТОВ ШЕРЗОД ҚАЛАНДАРОВИЧ

**ФОТОСИНТЕТИК ТИЗИМЛАРДА ХЛОРОФИЛЛ
ФЛУОРЕСЦЕНЦИЯСИНИНГ СПЕКТРАЛ-КИНЕТИК
ХАРАКТЕРИСТИКАЛАРИ**

01.04.05 – Оптика (физика-математика фанлари)

ДОКТОРЛИК ДИССЕРТАЦИЯСИ АВТОРЕФЕРАТИ

Тошкент – 2015 йил

Докторлик диссертацияси мавзуси Ўзбекистон Республикаси Вазирлар Маҳкамаси ҳузуридаги Олий аттестация комиссиясида 12.05.2015/В2015.1.ФМ198 рақам билан рўйхатга олинган.

Докторлик диссертацияси Ўзбекистон Республикаси Фанлар академияси Ион-плазма ва лазер технологиялари институтида бажарилган.

Диссертация автореферати уч тилда (ўзбек, рус, инглиз) Илмий кенгаш веб-саҳифасига (www.fti-kengash.uz) ва «Ziyonet» ахборот таълим порталига (www.ziyonet.uz) жойлаштирилган.

Илмий маслаҳатчи: **Захидов Эркин Агзамович**
физика-математика фанлари доктори, профессор

Расмий оппонентлар: **Бахрамов Сагдулла Абдуллаевич**
физика-математика фанлари доктори, профессор
Жумабаев Абдувоҳид Жумабаевич
физика-математика фанлари доктори, профессор
Юсупов Джавдат Бакиджанович
физика-математика фанлари доктори

Етакчи ташкилот: **Ўзбекистон Миллий университети**

Диссертация ҳимояси Физика-техника институти, Ион плазма ва лазер технологиялари институти ва Самарқанд давлат университети ҳузуридаги 16.07.2013.ФМ/Т.12.01 рақамли илмий кенгашнинг 2015 йил «___» _____ соат ___ даги мажлисида бўлиб ўтади (Манзил: 100084, Тошкент, Бодомзор йўли кўчаси, 2б-уй. Тел./факс: (99871) 235-42-91, e-mail: lutp@uzsci.net).

Докторлик диссертацияси Физика-техника институти Ахборот-ресурс марказида ___ рақами билан рўйхатга олинган (Манзил: 100084, Тошкент, Бодомзор йўли кўчаси, 2б-уй. Тел.: (99871) 235-30-41). Диссертация билан АРМда танишиш мумкин.

Диссертация автореферати 2015 йил «___» _____ да тарқатилди.

(2015 йил _____ даги ___ рақамли реестр баённомаси).

С.Л. Лутпуллаев

Фан доктори илмий даражасини берувчи
илмий кенгаш раиси, ф.-м.ф.д., профессор

А.В. Каримов

Фан доктори илмий даражасини берувчи
илмий кенгаш котиби, ф.-м.ф.д., профессор

И.Г. Атабаев

Фан доктори илмий даражасини берувчи илмий кенгаш
ҳузуридаги илмий семинар раиси, ф.-м.ф.д., профессор

Кириш (Докторлик диссертацияси аннотацияси)

Диссертация мавзусининг долзарблиги ва зарурати. XXI асрда янги авлод энергия манбаларини яратиш муаммоси инсоният олдида турган энг муҳим масалалардан бири ҳисобланади. «Ер аҳолисининг тез суръатда ўсиши ва жон бошига тўғри келадиган ўртача энергия талабининг доимий ортиб бориши, кейинги юз йилликда энергия ишлаб чиқариш ҳажмининг ҳозирги 15 ТВт дан 40 ТВт гача оширилиши зарурлигини кўрсатади»¹. Ҳозирги вақтда бутун дунё бўйича фойдаланилаётган аксарият бирламчи энергия манбаларини қайта тикланмайдиган ва чекли ресурслар ташкил этади. Бундан ташқари бу каби қайта тикланмайдиган манбалар қазилма ёқилғилар (кўмир, нефть, газ) сирасига кириб, фойдаланилганда ҳам ҳудудий, ҳам глобал миқёсда атроф-муҳитнинг ифлосланишига олиб келади, инсон соғлиғига ва турмуш сифатига салбий таъсир кўрсатади. Инсониятнинг ўсиб бораётган турмуш даражасини сақлаб қолиш учун қайта тикланувчи энергия манбаларидан ҳам жадаллик билан фойдаланиш, бу муаммони самарали ҳал қилишда асосий ўринни эгаллайди.

Шу билан бирга табиатда ҳам глобал миқёсда қуёш нури энергияси алмашинуви ва тўпланиши жараёни кечади ва тирик организмларнинг фаолиятини таъминлашга сарфланади. Фотосинтез ёруғлик энергиясини махсус биомолекулаларнинг кимёвий боғланиш энергиясига айлантирувчи физик-кимёвий жараёнлар мажмуаси бўлиб ҳисобланади. Олиб борилган таҳлиллар шуни кўрсатадики, сунъий фотосинтезни яратиш йўлида тадқиқотчилар физик механизмларнинг самарадорлиги ва структуравий схемаларнинг оптималлиги юзасидан ҳозиргача ўз ечимини топмай келаётган муаммоларга дуч келишмоқда. Шунга қарамасдан, сунъий фотосинтезловчи тизимларнинг турли моделларини яратишда катта ютуқларга эришилмоқда. Яқиндагина Toshiba компанияси ҳозирда рекорд кўрсаткич бўлган – 1,5% самарадорликка эга сунъий фотосинтезловчи тизим моделини намоиш этди.

Ушбу ҳолат фотосинтезловчи тизимлардаги флуоресцент нурланишининг физикавий хусусиятлари, энергия ўзгартирилиши самарадорлиги ва ушбу кўрсаткичларнинг ўсимлик ўсиши ва ривожланишини мониторинглаш воситаси сифатида қўлланиш имкониятларини ўрганиш, ҳозирда дунё миқёсида ўта долзарб бўлган энергия муаммосини ҳал этишда муқобил энергия манбаси бўлиши мумкин бўлган сунъий фотосинтезловчи мосламани яратишнинг илмий асосларини ишлаб чиқишда асос бўлиб, ушбу илмий тадқиқотнинг долзарблигини белгилайди.

Табиатнинг ўзгарувчанлиги, минерал моддалар етишмаслиги ва ўсимликларнинг ўзига хос физиологик хусусиятлари фотосинтез фаоллигини кескин пасайтириши мумкин. Ушбу таъсирлар табиатини очиб бериш ва

¹ Criswell D.R. Energy Prosperity within the 21st Century and Beyond: Options and the Unique Roles of the Sun and the Moon, innovative solutions to CO₂ stabilization, Watts R. Ed. // Cambridge: Cambridge Un. Press, 2002. – 68 p.

ноқулай, стресс шароитлар таъсирида турли кишлоқ хўжалиги экинлари фотосинтез фаоллигини тезкор баҳолашнинг самарали (структуравий ва функционал яхлитлигини ўзгартирмасдан) методларини, замонавий физиканинг сўнги ютуқларига асосланган илмий ишланмалар ва технологиялар асосида яратиш муҳим илмий ва амалий аҳамиятга эга бўлиб, диссертация мавзусининг заруратини белгилайди.

Тадқиқотнинг республика фан ва технологиялари ривожланишининг устувор йўналишларига боғлиқлиги. Тадқиқот иши республика фан ва технологиялари ривожланишининг 2-«Энергетика, энергия- ва ресурстежамкор» ва 3 – «Қайта тикланувчи энергия манбаларидан фойдаланиш ва ривожлантириш» каби устувор йўналишларига мувофиқ ҳолда бажарилган.

Диссертациянинг мавзуси бўйича халқаро илмий-тадқиқотлар шарҳи. Фотосинтетик энергия ўзгартирилиши табиатини, ўсимлик ва фотосинтезловчи бактериялардаги фотосинтез самарадорлигига структуравий хоссалар ва ташқи стресс омиллар таъсирини ўрганиш ҳамда табиий фотосинтезловчи тизимлар каби самарали ишловчи сунъий фотосинтезловчи мосламаларни яратиш бўйича етакчи мамлакатларнинг илмий марказлари, университет ва илмий-тадқиқот институтларида, жумладан Осака университети (Япония), Чикаго университети (АҚШ), Макс Планк Биохимия университети (Германия), Цюрих политехника университети (Швейцария), Маре университети (Англия), Италия миллий тадқиқот маркази ва М.В. Ломоносов номидаги Москва давлат университетларида (Россия) илмий изланишлар олиб борилмоқда.

Диссертация тадқиқоти йўналишида жаҳон миқёсида бир қанча долзарб масалалар ечилган бўлиб, жумладан, куйидаги муҳим илмий натижаларга эришилган: фотосинтезловчи тизимлар структуравий-функционал характеристикалари, энергетикаси ва ўсимликлардаги фотосинтезнинг бирламчи жараёнлари, квант ва энергетик самарадорлиги флуоресцент-спектроскопия усуллари қўллаган ҳолда Цюрих политехника университети (Швейцария) ва М.В. Ломоносов номидаги Москва давлат университети (Россия) ҳамда Осака университети (Япония) ва Маре университетларида (Англия) фотосинтез самарадорлиги кўрсаткичини оширишда энергия ўзгартиришнинг содда схемалари сифатида энг мақбул таркибий пигментлардан фойдаланиб сунъий фотосинтез амалга оширилган.

Бугунги кунда фотосинтезнинг физик механизмлари, уларнинг хлорофилл флуоресценцияси билан ўзаро боғлиқлиги, бутун фотосинтезловчи организмлар ва улардан ажратиб олинган турли препаратларда кечадиган фотохимёвий жараёнларнинг вақтий ва энергетик хоссаларини атрофлича тадқиқ қилиш ва турли ташқи стресс омиллар таъсирини баҳолашнинг тезкор ва самарали усуллари яратиш каби устувор йўналишларда илмий-тадқиқот ишлари олиб борилмоқда.

Муаммонинг ўрганилганлик даражаси. Фотосинтетик тизимларнинг куёш нурланиши фотосинтетик-фаол радиацияси кенг спектрини биомолекулалар энергиясига ўзгартиришдаги ноёб имкониятлари, бу каби энергия ўзгартиришнинг юқори самарадорлигини таъминловчи физик

механизмлар ва яна юзлаб фемтосекунддан то ўнлаб миллисекунд вақт билан характерланадиган фотосинтезнинг бирламчи жараёнлари турли босқичларини ўрганиш шу соҳа олимлари орасида катта қизиқиш уйғотиб келган.

Россия Фанлар академияси академиги А.Б.Рубин фотосинтез жараёнини турли босқичларини ўрганган ва физик-кимёвий механизмларини очиб берган. Ушбу соҳада бир қатор нуфузли илмий изланишлар олиб борилган булардан 1961 йилда М.Кальвин фотосинтез қоронғилик реакцияси кетма-кетлигини аниқлаган ва 1988 йилда Ж.Дйизенхофер, Х.Мичел ва Р.Хуберлар фотосинтетик реакция маркази молекуляр структурасини очиб берган. Ўсимликлар фотосинтетик фаоллиги мониторинги учун флуоресцент методларнинг амалий қўлланилишида У.Шрайбер томонидан яратилган импульс-амплитуда модуляцияли флуорометри (ИАМ флуорометр) ва Р.Страссер томонидан яратилган ўсимликлар самарадорлиги анализаторлари (РЕА анализатор) катта роль ўйнади ва бу ўз навбатида фотосинтез жараёни тадқиқотларини лаборатория шароитидан «очиқ далада», табиий шароитда олиб бориш имконини яратди.

Ўзбекистонда Ион-плазма ва лазер технологиялари институти «Конденсирланган муҳитлар физикаси» лабораторияси мудири ф.-м.ф.д., проф. Захидов Э.А. раҳбарлигида табиий фотосинтезловчи мажмуалар (турли ўсимликлар ва фотосинтез ҳодисаси кечувчи бактериялар) нинг флуоресцент-спектроскопик хоссаларини комплекс ўрганиш бўйича илмий изланишлар олиб бормоқда. Олинган натижалар асосида ўсимликларнинг турли ташқи таъсирларга реакциясини тезкор ва самарали баҳолаш имконини берувчи флуоресцент методи ишлаб чиқилган ва амалиётга жорий этилган. Ҳозирги кунда ушбу лаборатория олимлари томонидан табиий фотосинтезловчи мажмуалар таркибий пигментларидан ташкил топган сунъий энергия ўзгартирувчи қурилманинг ишлаш принциплари таклиф этилмоқда.

Замонавий физик методлар, электрон микроскоп, тезкор лазер спектроскопияси, абсорбцион-флуоресцент тадқиқотлар ва фотосинтетик аппаратда турли структуравий-функционал бирликларни ажратиб олиш усулларининг қўлланилиши ўсимликлар ва бактериялар фотосинтези механизмларини очиб беришда катта имкониятлар яратмоқда. Лекин бугунги кунгача бу соҳада яна бир қатор муайян саволлар очиқ қолмоқда. Булардан бир қанчаси ёруғликнинг фотосинтетик энергия ўзгартирилиши самарадорлигига стресс омилларнинг таъсири бўйича: давомий юқори интенсивликли ёритилиш, сув етишмаслиги, ноқулай ҳарорат таъсирида фотосинтез фаоллиги сезиларли пасайиши натижасида фотосинтетик аппарат деградацияга учрайди.

Бугунги кунда табиий фотосинтетик аппарат хоссаларини худди ўзидек такрорловчи, лекин бир мунча самарали кўринишдаги сунъий фотосинтезловчи тизимлар яратиш бўйича етарли даражада тадқиқот ишлари олиб борилмаган.

Диссертация мавзусининг диссертация бажарилаётган илмий-тадқиқот муассасасининг илмий ишлари билан боғлиқлиги. Тадқиқот

иши Ион-плазма ва лазер технологиялари институтининг №ZB2-2003 (CRDF) «Фотосинтезловчи тизимларни ўрганиш ва уларнинг функционал самарадорлигини баҳолашнинг флуоресцент методини яратиш» (2004-2005) ва «Ўзбекистон - Корея - 2008», «Ўсимликлар фотосинтетик аппаратидаги ёруғлик энергияси иссиқлик диссипациясини фотоакустик метод ёрдамида ўрганиш» (2008-2011), №Ф2-ФА-Ф147 «Фотосинтезнинг бирламчи жараёнларида қуёш энергиясини юқори самарали ўзлаштирилишининг физикавий механизмларини ўрганиш» (2012-2016) ва №ФА-А4-Ф047 «Қишлоқ хўжалиги экинларида фотосинтез самарадорлигини мониторинглаш учун флуоресцент методлари ва асбоб-ускуналарни ишлаб чиқиш» (2015-2017) мавзусидаги тадқиқотлар доирасида бажарилган.

Тадқиқотнинг мақсади хлорофилл флуоресценцияси спектрал-кинетик характеристикаларини қўллаган ҳолда ўсимликлар ва фотосинтезловчи бактерияларда кечадиган қуёш энергияси фотосинтетик ўзгартирилиши самарадорлигининг физик асосларини ишлаб чиқиш ва флуоресцент назоратининг энг муҳим параметрларини аниқлашдан иборат.

Белгиланган мақсадга эришиш учун қуйидаги **тадқиқот вазифалари** қўйилган:

фотосинтетик тизимлар хлорофилл флуоресценциясини узлуксиз, юқори вақтий катталикли импульс ва бир вақтнинг ўзида кучсиз узлуксиз ва кучли импульсли нурланиш билан «иккиланган» уйғотиш орқали ўрганишнинг тадқиқот методлари ва ускуналарини яратиш;

фотосинтезловчи тизимлар флуоресценцияси индукция кинетикасини тадқиқ этиш ва фотосинтезловчи организмлардаги фотосинтез бирламчи жараёнлари фаоллиги ва самарадорлигини аниқлаш учун индукция параметрларини ўлчашнинг методларини ишлаб чиқиш;

импульс амплитудали модуляция методи ёрдамида «дала» шароитида ўсимликлар фотосинтетик фаоллиги ва уларнинг суткалик ўзгаришлари мониторингини ўтказиш;

структуравий хоссалари билан флуоресценция параметрлари орасидаги ўзаро боғлиқликни аниқлаш мақсадида фотосинтетик аппаратлари ген модификация қилинган структурага эга фотосинтезловчи бактериялар бактериохлорофилларининг қисқа ва узун тўлқинли флуоресценцияларини ўрганиш;

фотосинтездаги «структура-энергетика-функционаллик» орасидаги ўзаро боғлиқликни хона ва криоген ҳароратларда фотосинтезловчи тизимлар абсорбцион-флуоресцент характеристикалари ёрдамида ўрганиш;

реакция марказлари электрон ташилиш занжиридаги зарядлар қўчиш жараёнининг физик табиати ва кинетикасини, кечикувчи флуоресценциянинг нано-, микро- ва миллисекундли компонентлари ёрдамида ўрганиш;

турли фотосинтезловчи бактерияларга асосланган қўп компонентли ячейкалардаги қуёш энергияси ўзгартирилиши энергетик самарадорлигини улар индивидуал ютилиш спектрларини ҳисобга олган ҳолда тадқиқ этиш.

Тадқиқотнинг объекти сифатида ўсимлик барглари (махаллий ғўза навлари, шпинат), фотосинтезловчи бактерияларнинг яхлит намуналари ва

уларнинг функционал бирликлари (фотосинтезловчи мембрана, ёруғлик йиғувчи антенна, реакция маркази) ва мономерли фотосинтетик пигментлар (органик эритмада эритилган) – хлорофиллар, бактериохлорофиллар танланган.

Тадқиқотнинг предмети атроф – муҳитнинг муқобил шароитларида ва турли стресс омиллар таъсирида бўлган фотосинтезловчи организмларда ёруғлик энергиясининг ютилиши ва ёруғлик йиғувчи антеннага кўчиши, реакция марказида ташилиши ва тақсимланиши каби физик-кимёвий жараёнлардан иборат.

Тадқиқотнинг усуллари. Диссертация ишида абсорбцион ва флуоресцент спектроскопия методлари қўлланилган. Флуоресценциянинг турли (тез ва кечикувчи) компонентларини ўлчашда юқори сезгирликка ва юқори такрорий частотага (10 кГц гача) эга импульс-даврий уйғотилган қисқа импульсли строб-интеграллаш методидан фойдаланилган.

Тадқиқотнинг илмий янгилigi қуйидагилардан иборат:

фотосинтезловчи тизимларнинг *in vitro* ва *in vivo* режимлардаги фотосинтез бирламчи жараёнлари физик табиатини (ёруғлик энергиясининг ютилиши, ёруғлик йиғувчи антеннага кўчиши, реакция марказида ташилиши ва тақсимланиши) очиб бериш имконини берувчи флуоресценция параметрларини қайд қилиш методларининг илмий асослари яратилган;

турли стресс факторлар таъсиридаги фотосинтезловчи организмлар тез ва кечикувчи флуоресценцияси спектрал-кинетик характеристикалари ёрдамида фотосинтез фаоллигини мониторинг қилишнинг янги методикаси ишлаб чиқилган;

илк бор кечикувчи флуоресценция ва тез флуоресценция индукция кинетикаси параметрлари ёрдамида фотосистема II реакция марказидаги электрон ташилиш занжирининг турли соҳаларидаги электрон ташилиш тезлиги ва вақтий характеристикалари тажрибада аниқланган;

ўсимлик барглари қоронғилик флуоресценциясининг фотосинтетик мембрана ёруғлик йиғувчи антенналари ва реакция марказлари бир бутунлигининг кўрсаткичи бўлиб хизмат қилиши ва бу бир бутунликнинг бузилиши қоронғилик флуоресценцияси интенсивлигининг ошишига олиб келиши исботланган;

ёруғлик уйғонишларининг ёруғлик йиғувчи антеннада кўчиши ва уларнинг реакция марказида эгалланиши қонуниятлари, фотосинтетик аппарат структурасига оид икки физик модель («озеро» ва «лужи» моделлари) ёрдамида очиб берилган;

хлорофиллар, бактериохлорофиллар ва уларнинг бир қатор бирикмалари яқин инфракизил соҳада ишловчи фотосенсибилизаторлар сифатидаги перспектив бирикмалар бўлиши тажрибада асослаб берилган. Ўраб турган молекулалар табиатига боғлиқ ҳолда бу бирикмаларда ютилиш ва флуоресценция спектрлари сифат жиҳатидан ўзгаришларга учраши аниқланган;

илк бор кўп ўтишли яримўтказгичли фотовольтаик мосламага муқобил тарзда бир гуруҳ фотосинтезловчи бактериялардан ташкил топган,

натижавий энергетик самарадорлиги 50% дан юқори бўлган энергия ўзгартирувчи мосламанинг илмий асослари яратилган.

Тадқиқотнинг амалий натижаси. Ўсимликлар ва фотосинтезловчи бактериялар фотосинтетик фаоллигини аниқлашнинг методлари яратилган, асбоб-ускуна воситалари ишлаб чиқилган, улар ёрдамида турли кишлок хўжалиги экинларининг ўсиши ва ривожланишини мониторинг қилиш ҳамда экинларга атроф - муҳитнинг турли ташқи ноқулай таъсирларини баҳолаш имкониятлари очиқ берилган. Таклиф этилаётган спектрнинг кўзга кўринувчи ва инфракизил соҳасини ютувчи бир гуруҳ фотосинтезловчи бактериялардан иборат система қуёш нурунинг кенг соҳасини юқори самарали ўзгартирувчи мосламага асос бўлиб хизмат қилиши кўрсатилган.

Тадқиқот натижаларининг ишончлилиги тадқиқотларда ўзига хос объектлар, яъни фотосинтезловчи организмларни тадқиқ этишда оптика ва лазер физикасининг замонавий методлари ва ёндашувларининг қўлланилгани билан асосланган. Тадқиқот шартлари синчиклаб таҳлил қилинган, юқори аниқликка эга замонавий ўлчов асбоблари қўлланилган ва тадқиқот натижалари пухта анализ қилинган. Хулосалар фотосинтез бирламчи жараёнлари физик механизмларини ўрганишга бағишланган асосий назарий ишлар ҳолатига ва бошқа муаллифлар натижаларига тўла мос келади.

Тадқиқот натижаларининг илмий ва амалий аҳамияти. Ушбу диссертацияда олинган натижаларнинг илмий аҳамияти шундан иборатки, фотосинтезловчи организмлардаги фотосинтез бирламчи жараёнлари флуоресцент назорати концепцияси ишлаб чиқилган ва гетерогенли ёруғлик йиғувчи антеннада ёруғлик уйғонишлари энергиясининг кўчиши ва унинг турли суббирликлари орасида тўғри ва тесқари ташилиши тезлигига боғлиқ ҳолда қайта тақсимланиш жараёнлари назарий асослаб берилган.

Тадқиқот натижаларининг амалий аҳамияти шундан иборатки, таклиф этилган илмий-техник ечим ўсимликлар фотосинтетик жадаллигини сон жиҳатдан аниқлаш ва атроф-муҳитнинг ноқулай таъсирларини баҳолаш учун кишлок хўжалиги экинлари флуоресцент мониторинги амалий методини ва турли ютилиш соҳаларига эга бўлган, қуёш спектри асосий қисмини қопловчи, энергия ўзгартиришда фотосинтезловчи бактериялар гуруҳидан иборат самарали энергия ўзгартирувчи мосламаларни яратишда ишлатилиши мумкин.

Тадқиқот натижаларининг жорий қилиниши. Тадқиқотлар асосида ишлаб чиқилган флуоресцент методи кишлок хўжалиги амалиётида, жумладан, Геномика ва биоинформатика марказида ген нокаути усули ёрдамида яратилган 8 та навли пахта барглари (2013–2014) флуоресцент параметрларини аниқлашда қўлланилган. Олинган натижалар шуни кўрсатдики, ген нокаути методи асосида яратилган пахта навларида фотосинтез фаоллиги назорат навларга нисбатан 25–30% ошган ва бунда флуоресценция кўрсаткичлари ушбу кишлок хўжалиги экинлари ўсиши ва ривожланишини мониторинг қилиш ва сон жиҳатдан баҳолашда ишончли, тезкор ва принципиал янги усул бўлиб хизмат қилади, тўлиқ вегетация даврида камида 5–6 марта, айнан бир навдан 10 тадан ўсимликда ўлчашлар

бажариб, ўртача қиймат асосида аниқ маълумотлар олиш имконини берган. Ушбу ҳолат ЎзР ҚСХВ Пахта уруғчилиги Республика марказининг 03.06.2015 даги диссертация натижаларини амалиётга жорий қилиш ҳақидаги маълумотномасида ўз аксини топган.

Тадқиқот натижаларининг апробацияси. Тадқиқотнинг асосий натижалари бир қатор халқаро конференцияларда: «Яримўтказгичлар ва амалий физика 17-халқаро симпозиуми» (Жезу, Корея, 2014), Ўзбекистон - Корея симпозиумларида (Сеул, 2007, 2011 ва Тошкент, 2010), молекуляр спектроскопия бўйича халқаро конференцияларда (Самарқанд, 2009, 2013), ёш олимлар конференцияларида (Тошкент, 2009, 2010, 2014), «Конденсирланган муҳитлар физикаси» лабораторияси ва Ион-плазма ва лазер технологиялари институти бирлашган семинарларида апробациядан ўтказилган.

Тадқиқот натижаларининг эълон қилиниши. Диссертация мавзуси бўйича жами 28 та илмий иш нашр этирилган, жумладан, 10 та илмий мақола, шундан 3 та халқаро журналларда ҳамда 18 та тезис халқаро ва республика конференциялар тўпламларида чоп этилган.

Диссертациянинг ҳажми ва тузилиши. Диссертация кириш, бешта боб, хулоса, фойдаланилган адабиётлар рўйхати, 192 саҳифадан иборат матн, 51 та расм ва 2 та жадвалдан иборат.

ДИССЕРТАЦИЯНИНГ АСОСИЙ МАЗМУНИ

Кириш қисмида диссертация мавзусининг долзарблиги ва зарурати асосланган, тадқиқотнинг республика фан ва технологиялари ривожланишининг устивор йўналишларига мослиги кўрсатилган, мавзу бўйича хорижий илмий-тадқиқотлар шарҳи, муаммонинг ўрганилганлик даражаси келтирилган, тадқиқот мақсади, вазифалари, объекти ва предмети тавсифланган, тадқиқотнинг илмий янгилиги ва амалий натижалари баён қилинган, олинган натижаларнинг назарий ва амалий аҳамияти очиб берилган, тадқиқот натижаларининг жорий қилиниши, нашр этилган ишлар ва диссертация тузилиши бўйича маълумотлар берилган.

Диссертациянинг биринчи боби **«Фотосинтезловчи тизимларда ёруғлик энергияси ўзгартирилиши жараёнларининг флуоресцент спектроскопияси»**да хлорофиллар ва бактериохлорофиллар флуоресценцияси хоссасини ўрганиш бўйича адабиётлар шарҳи келтирилган: айрим молекулаларда уйғонган электрон ҳолатнинг пайдо бўлиши ва сўниши, фотосинтетик мембранада бу молекулалар гуруҳлашувининг ёруғлик ютилиши жараёнига таъсири, ёруғлик уйғонишларининг бу молекулалар бўйлаб экситон кўринишда ёруғлик йиғувчи антеннага кўчиши ва уйғонишларнинг фотохимёвий реакция марказида тутилиши-реакция марказида зарядлар ташилиши ва тақсимланиши. Фотосинтетик аппарат структуравий-функционал шаклланиши ва улар флуоресценциясининг турли стресслар таъсирида ўзгаришлари қараб чиқилган. Хулоса қилинганки, флуоресценция давомийлиги, квант чиқишлари ҳамда фотосинтез турли пигмент-оқсилли комплекслари кечикувчи флуоресценцияси асосий характеристикаларини тадқиқ этиш, фотосинтез самарадорлигининг ўсимликлар фотосинтетик аппарати ва фотосинтезловчи бактериялар структуравий-функционал хоссаларига боғлиқлигини аниқлашда кенг имкониятларга эга бўлган метод бўлиб хизмат қилади.

Диссертациянинг иккинчи бобида **«Фотосинтезловчи тизимлар флуоресценциясини ўрганишга мўлжалланган тадқиқот методлари ва қурилмалари»** келтириб ўтилган. Қўйилган вазифадан келиб чиққан ҳолда турли уйғотиш схемалари, флуоресценция тез компонентлари ва кечикувчи флуоресценция турли вақтий компонентларини қайд қилишнинг турли тизимлари қўлланилган. Бундан келиб чиққан ҳолда флуоресценцияни уйғотиш манбаи сифатида узлуксиз ва/ёки импульс-давомийли лазерлар, ёруғлик нурловчи диодлари, лампалардан фойдаланган ҳолда тадқиқот қурилмалари ишлаб чиқилган.

Табиий, кундузги ёруғлик (дала) шароитида ўсимлик баргларидаги фотосинтез жараёнлари фаоллиги, яъни ўсимликлар ўсиши ва ривожланишини ўрганиш учун икки ёруғлик - кучсиз узлуксиз ва кучли импульсли нурланиш асосида ишлайдиган, кундузги юқори интенсивликли ёруғлик шароитида фотосинтетик жараёнлар характеристикаларини сон жиҳатдан аниқлаш имконини берувчи импульс-амплитудали модуляция флуорометри қўлланилган.

Импульс-амплитудали модуляция флуорометри қуйидаги спектрал-вакций ва қувватий параметрлар билан характерланади (1-расм): флуоресценция ёруғлик нурловчи диоднинг давомийлиги ~ 3 мкс ва частотаси 20 кГц гача бўлган импульслар билан уйғотилади; бу ёруғлик қисқа тўлқинли фильтр ($\lambda < 670$ нм) орқали ўтади ва фотоприёмник олдида ёруғлик импульсларининг тўғри тушишининг олдини олувчи узун тўлқинли фильтр ($\lambda > 700$ нм) жойлаштирилган. Юқори селектив импульсли 3 мкс импульс билан уйғотилган флуоресценциядан бошқа сигнални қайд қилмайдиган кучайтиргич тизими мавжуд. Фотоприёмник сифатида PIN фотодиоддан фойдаланилган. Бу қурилма ёрдамида бошланғич флуоресценция F_0 , фотосистема II даги фотохимёвий жараёнларнинг максимал квант чиқиши $\Phi_{ФСП}$, фотохимёвий (q_P) ва нофотохимёвий (q_N) флуоресценция сўнишлари ўлчанган. Ўлчаш ёруғлигининг интенсивлиги $\sim 1,2$ Вт/м², таъсир ёруғлигининг интенсивлиги $\sim 24-48$ Вт/м², тўйинтирувчи ёруғлик импульсининг интенсивлиги эса ~ 600 Вт/м² га тенг. Тўйинтирувчи импульс 1 с давомийлик билан ҳар ~ 20 с да берилган.

Ўрганилган ўсимлик баргида фототўйиниш жараёнини келтириб чиқариш учун алоҳида ёруғлик манбаидан (нуқтавий лампа), оптик нур-тола ёрдамида 400–700 нм спектрал оралиғидаги ва интенсивлиги 480 Вт/м² гача бўлган фотосинтетик актив радиациядан фойдаланилган.

Қурилманинг ўлчаш блоки ўлчанилаётган нурнинг ўта паст интенсивлигида ҳам ёруғлик кучининг чегаравий ўзгаришларига ҳам жуда чидамли (кундузги ёритилганликдан юқори бўлган ёруғлик оқими). Бу, асосан, фотосистема II даги фотохимёвий жараёнларнинг максимал квант чиқиши - $\Phi_{ФСП}$ флуоресценциянинг бошланғич ва максимал қийматларини аниқлашда жуда муҳим.



1-расм. Импульс-амплитудали модуляция флуорометрининг ишлаш принципи

Дастлабки тадқиқотларимизда импульс-амплитудали модуляция флуорометрининг лаборатория варианты иккиланган модуляцияли узлуксиз дамланадиган Nd³⁺:YAG лазерининг иккинчи гармоникаси (532 нм, 400 нс, 10 кГц) ва бокскаринтегратор ВСІ - 280 асосида ишлаб чиқилган бўлиб, вақтий ва энергетик параметрлари ҳамда сезгирлиги жиҳатидан импульс-амплитудали модуляция флуорометридан анча устун ва ўсимлик барглари флуоресценция индукциясининг турғун кинетик ўзгаришларини ўлчаш имконини берган.

Юқорида келтириб ўтилган, биз томондан ишлаб чиқилган ва дала шароитида мониторинг олиб бориш имконини берувчи метод ЎЗР ФА Генетика институти тадқиқот даласида, Швейцария Федерал политехника университети, ЕТН, Цюрих, Швейцария (Др. И.Фрачебоуд ва Др. Й.Лейпнер) ва Италия миллий тадқиқот маркази, СНС, Рим, Италия (Др. А.Масаччи) олимлари билан ҳамкорликда узоқ вақтли сув танқислиги шароитида ўстирилган турли навли ғўзалар фотосинтетик фаоллигини қиёсий ўрганишда қўлланилган. Бу тўйинтирувчи импульслар методи қўлланилганда флуоресценция секин ўзгаришлари таҳлили катта аҳамият касб этган ва параллел равишда фотохимёвий ва нофотохимёвий сўнишлар ўзгаришининг динамикасини аниқлаш имконини берган.

Фотосинтезловчи тизимларни лаборатория ва табиий дала шароитларда ўлчашда қўлланилган ёруғлик ўлчови, яъни метрикаси келтириб ўтилган.

Диссертациянинг учинчи боби «**Фотосинтезловчи бактериялар – фотосинтетик энергия ўзгартирилиш физик механизмларини тадқиқ этиш учун модел объект**» фотосинтезловчи бактерияларнинг абсорбцион-флуоресцент характеристикаларини тадқиқ этишга бағишланган. Ютилиш, флуоресценция ва флуоресценция уйғотиш спектрларини таҳлил қилиш орқали бактериохлорофилл молекулаларининг энергетикаси ўрганилган.

Пурпур *Blastochloris Viridis* бактериясининг табиий ва ген модификацияли намуналари бактриохлорофиллари узун тўлқинли ИҚ соҳа абсорбцион-флуоресцент спектрларини қиёсий ўрганиш шуни кўрсатдики, *Blastochloris Viridis* фотосинтетик аппарати функционал структурасининг ген инженерия методи ёрдамидаги модификацияси фотосинтез энергетикасининг сифатий ўзгаришларига олиб келди ва бу уларнинг ютилиш ва флуоресценция спектрларида намоён бўлди.

Кўрсатиб ўтилганки, реакция марказида электронларнинг тескари ташилишидан ҳосил бўлувчи кечикувчи флуоресценция, электронлар кўчиши секин этаплари кинетикаси ва термодинамикасини ўрганишда маълумотларга бой қурилма бўлиб хизмат қилиши мумкин. Ген-модификацияли реакция марказларига эга *Blastochloris Viridis* мисолида хинонли акцепторлардаги электрон кўчиш энергетикасини кечикувчи флуоресценция турли вақтий компонентлари интенсивликлари нисбатига қараб сон жиҳатдан характерлаш мумкинлиги кўрсатилган.

Ўлчашларда юқори турғунлик ва аниқликка эришиш учун кечикувчи флуоресценция турли вақтий компонентларининг абсолют интенсивликлари эмас, балки уларнинг муносабатлари ўлчанган. Тез кечувчи флуоресценция ва кечикувчи флуоресценция i вақтий компонентларининг муносабатлари қуйидагича аниқланади:

$$I_{T\Phi} / I_{K\Phi}^i = [(k_q^i \eta_{T\Phi}) / (k_\Phi)] \exp[G^i / (k_B T)] \quad (1)$$

бунда k_q^i – i радикал жуфтлик тўғри парчаланишининг доимий тезлиги, k_Φ – флуоресценциянинг доимий тезлиги, $\eta_{B\Phi}$ - тез кечувчи флуоресценция квант эффективлиги. i - ва j - муносабат эса кечикувчи флуоресценциянинг вақтий компонентлари:

$$I_{K\Phi}^i / I_{K\Phi}^j = (k_q^j / k_q^i) \exp[(G^j - G^i) / (k_B T)], \quad (2)$$

k_q^i ва k_q^j нинг маълум қийматлари радикал жуфтлик эркин энергияси фарқини ($G^j - G^i$) ҳисоблаш имконини беради ва бу қайси бирининг рекомбинацияси ушбу компоненталарни ҳосил қилишини кўрсатади.

1-жадвалда ёввойи ва ёруғликда ўстирилган гибрид *Blc. Viridis* бактериялари кечикувчи флуоресценция тез ва секин компонентлари (I_{mez} ва $I_{секин}$) интенсивлигининг улар субмиллисекундли компонентлари ($I_{смсек}$) интенсивликларига муносабатларининг тажрибада ўлчанган қийматлари ва улардан ҳисоблаб топилган G^i қийматлари келтирилган. Қоронғиликда ўстирилган гибридда кечикувчи флуоресценция мавжуд эмаслиги қайд этилган. Ёруғликда ўстирилган гибридда субмиллисекундли компонента интенсивлиги ёввойи намуна билан бир хил, $I_{mez}/I_{смсек}$ муносабат эса ёввойи намунага қараганда икки баробар кичикроқ. Бунда $I_{секин}/I_{смсек}$ муносабат иккала намунада ҳам бир хил бўлиб чиққан. Кечикувчи флуоресценциянинг бу каби қонуниятлари жадвалда келтирилгани каби G^i қийматларида ҳам акс этган.

1-жадвал

Ёввойи ва гибрид *Blastochloris Viridis* бактерияси кечикувчи флуоресценцияси турли вақтий компонентлари интенсивликлари муносабати

Бактериялар тури	$I_{mez}/I_{смсек}$	$G^I - G^A$	$I_{секин}/I_{смсек}$	$G^A - G^B$
Ёввойи намуна	$5,9 \cdot 10^{-4}$	534 мЭВ	$1,18 \cdot 10^{-4}$	116 мЭВ
Ёруғликда ўстирилган гибрид	$3,5 \cdot 10^{-4}$	486 мЭВ	$1,03 \cdot 10^{-4}$	112 мЭВ
Қоронғиликда ўстирилган гибрид	$< 10^{-7}$	-	$< 10^{-7}$	-

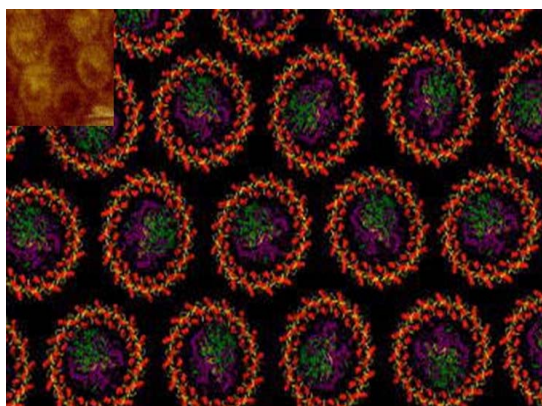
Қайд этилганки, ген-модификацияли реакция марказларига эга фотосинтезловчи бактериялар кечикувчи флуоресценция секин компоненталарини қиёсий ўрганиш, хинонли акцепторлар энергетикаси ва мос равишда электрон ташилиш кинетикасидаги ўзгаришларни аниқлаш имконини беради.

Икки турдаги пурпур – *Blc. Viridis* ва *Rba. Sphaeroides* фотосинтезловчи бактериялар ёруғлик йиғувчи антеннаси структуралари, ютилиш ва флуоресценция спектрлари ва флуоресценция индукцияси кинетикаси ҳақидаги маълумотлар асосида структура хоссасининг ёруғлик энергиясини ўзгартиришда юқори қийматларни таъминловчи, фотосинтетик мембрана ёруғлик йиғувчи антенналарида энергиянинг кўчиши ва реакция марказида тутилиши каби жараёнларга таъсири ўрганилган.

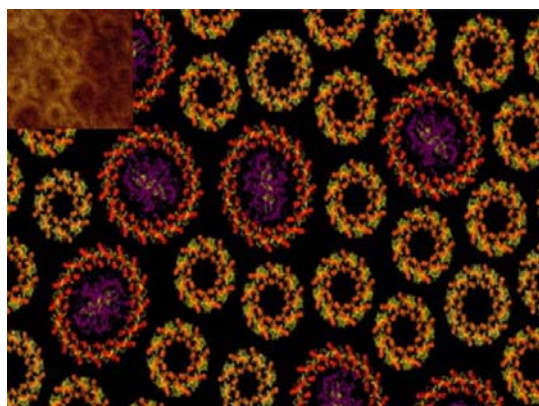
2-расмда *Blc. Viridis* (а) ва *Rba. Sphaeroides* (б) фотосинтезловчи мембраналарининг атом қувватли микроскопда олинган илк ва махсус дастурда қайта ишланган (юқори чап бурчак) тасвирлари кўрсатилган.

Расмлардан аниқ кўриниб турибдики, агар *Bls. Viridis* фотосинтезловчи мембранаси фотосинтетик бирликлари зич ўралган, тартибли структурага эга бўлса, *Rba. Sphaeroides* да ёруғлик йиғувчи антенна – реакция марказ

комплекслари, ушбу организмлар ёруғлик йиғиш хусусиятини оширувчи тасодифий жойлашган қўшимча ёруғлик йиғувчи антенна 2 комплекслари билан навбатлашиб жойлашган: ёруғлик йиғувчи антенна 1 – реакция марказ ва ёруғлик йиғувчи антенна 2 муносабатлари бактериялар ўсиш шароитига боғлиқ бўлиб, кенг чегарада ўзгариши мумкин.



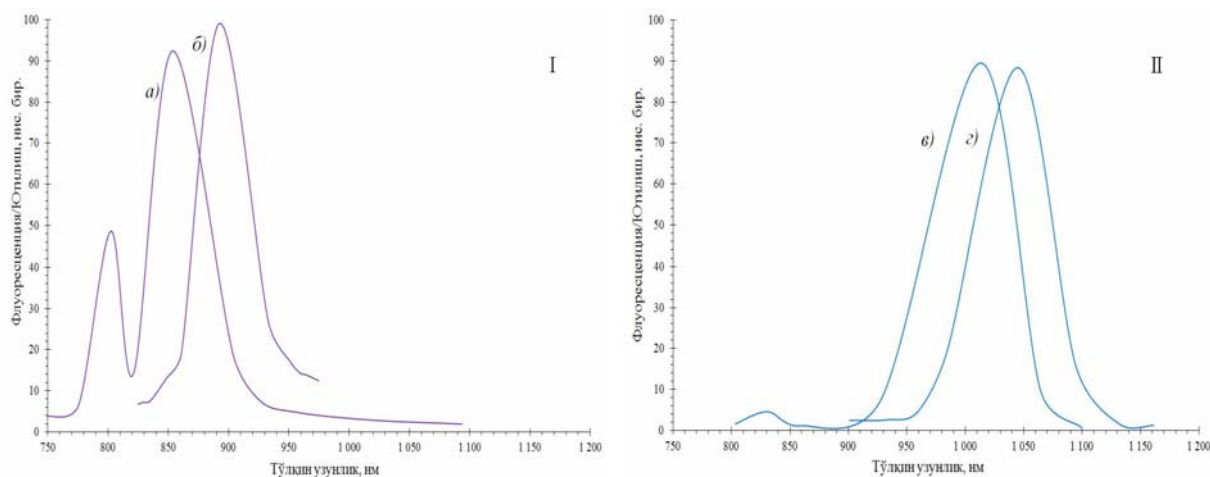
а



б

2-расм. Пурпур бактериялар *Blc. Viridis* (а) ва *Rba. Sphaeroides* (б) фотосинтезловчи мембраналарининг атом қувватли микроскопда олинган тасвири

Қаралган фотосинтезловчи бактериялар спектрал характеристикалари атом қувватли микроскоп ёрдамида олинган тасвирдан аниқланган асосий қонуниятни тасдиқлаган. 3-расмда *Rba. Sphaeroides* ва *Blc. Viridis* бактериялари бактериохлорофилл а ва бактериохлорофилл б молекулалари Q_y -полосаларига мос келувчи ИҚ-ютилиш ва флуоресценция спектрлари кўрсатилган.



3-расм. *Rba. Sphaeroides* (I) ва *Blc. Viridis* (II) фотосинтетик мембраналари ИҚ ютилиш (а, в) ва флуоресценция (б, з) спектрлари

Blc. Viridis ютилиш ва флуоресценция спектрлари суббирлик ёруғлик йиғувчи антенна 1 га тегишли бўлган бактериохлорофилл б молекуласининг биргина полосасига эга. *Rba. Sphaeroides* да эса бактериохлорофилл а молекулалари икки антенна суббирликлари - ёруғлик йиғувчи антенна 1 ва

бактериохлорофилл 2 да турли спектрал формага эга ва мос равишда ютилиш спектрида иккита максимум мавжуд. Лекин флуоресценция спектрида қисқа тўлқинли максимум мос равишдаги уйғонишларнинг тезда сўниши ҳисобига кучсиз кўринган.

Флуоресценция спектрал-кинетик характеристикаларини ўрганиш пурпур бактериялар фотосинтетик мембраналари фотосинтетик бирликлари ичидаги ва орасидаги ёруғлик уйғонишлари кўчиши самарадорлигини баҳолаш имконини беради.

Юқорида келтирилганлардан ташқари ушбу бобда хлорофиллар, бактериохлорофиллар ва уларнинг қатор бирикмалари, оптик спектрнинг узун тўлқинли соҳасида ишловчи фотосенсибилизатор сифатидаги истиқболли бирикмалар бўлиши кўрсатилган. Ушбу молекулалар ёруғликни узун тўлқинли соҳада юқори қийматларда ютишдан ташқари препаратни фотодинамик терапияда қўллашга асос бўлувчи синглет кислород уйғотишда юқори квант чиқишларига эга. Ушбу гуруҳнинг бир қатор молекулалари мисолида уларнинг биохужайрадаги агригацияси холида абсорбцион-флуоресцент характеристикаларнинг ўзгариши мумкинлигини ҳисобга олиш зарурлиги асосланган.

Диссертациянинг тўртинчи боби «**Хлорофилл флуоресценцияси характеристикалари ёрдамида ўсимликлардаги стресс-эффектларни мониторинг қилиш**»да атроф-муҳитнинг турли шароитларидаги ўсимлик барглари электрон ташилиш тезлиги флуоресценция тез компоненти ва кечикувчи флуоресценция миллисекундли компоненти индукцияси орқали тадқиқ қилинган. Флуоресценция тез компоненти ва кечикувчи флуоресценцияни бир вақтнинг ўзида ўлчаш фотосинтез реакция марказларида электрон кўчиш жараёни ҳақида кенг маълумотлар бериши кўрсатиб ўтилган. Агар флуоресценция тез компонентаси бутун фотосистема II даги электрон ташилиш тезлигини сон жиҳатдан характерласа, кечикувчи флуоресценция электрон ташилиш занжири турли соҳасида электрон кўчиш самарадорлигини аниқловчи дифференциал характеристика бўлиб хизмат қилиши асосланган.

Шу билан бирга ушбу бобда электрон ташилиш занжири турли соҳасидан тесқари ташилишга алоқадор бўлган кечикувчи флуоресценциянинг турли вақтий компонентлари ўрганилган. Юқорида таъкидлаб ўтилганларни ҳисобга олган ҳолда пахта баргларининг турли ҳарорат ва турли нурланиш интенсивликларидаги кечикувчи флуоресценциясининг Q_B дан Q_A га тесқари кўчишни ҳисобга олувчи ва олмайдиған, давомийлиги миллисекунд (1 - 5 мсек) ва микросекунд (10 - 50 мсек) бўлган вақтий компонентлари аниқланган.

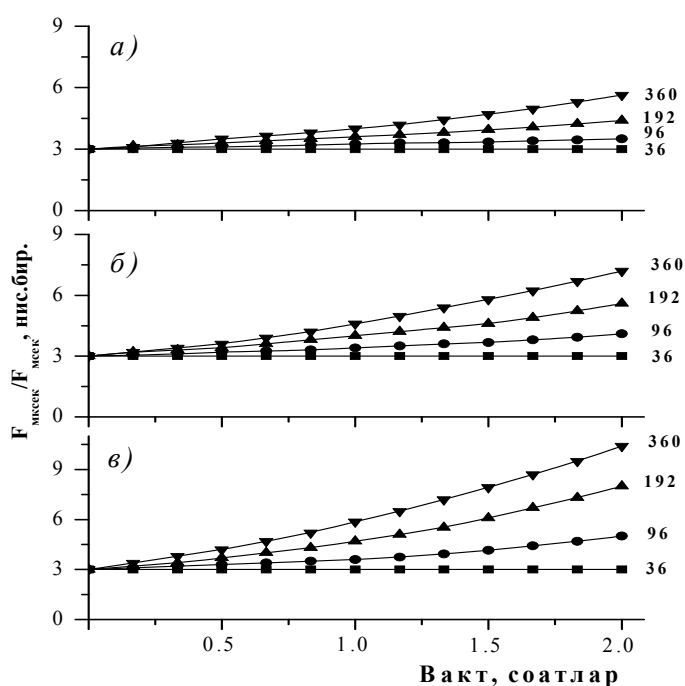
4а-расмда 25°C ҳароратдаги маълумотлар келтирилган. Фотосинтетик актив радиациянинг 36 Вт/м² қийматида фотосинтетик аппаратнинг ёруғликдан тўйиниши кузатилмаған ва кечикувчи флуоресценция иккита компоненти интенсивликлари нисбати $F_{\text{мксек}}/F_{\text{мсек}}$ вақт ўтиши билан ўзгармаған. Лекин ёритилиш интенсивлигининг ошиши DI оксилениннг зарар кўриши ва фаол бўлмаған марказлар сонининг ошишига олиб келади ҳамда

фотосинтетик электрон ташилиш оқими пасаяди. Бу эса Q_B акцепторда тескари оқим эҳтимолини ва кечикувчи флуоресценциянинг давомийлиги 200 мксек бўлган компонентаси интенсивлигининг ошишига ва ўз навбатида занжирнинг охири соҳаларидан тескари кўчишга асосланган кечикувчи флуоресценция миллисекундли компонентининг пасайишига олиб келади.

Ёруғликдан тўйиниш эффекти $F_{\text{мксек}}/F_{\text{мсек}}$ нисбат вақтий силжишларнинг ноқулай ҳарорат шароитларида яққол намоён бўлган: 4б- ва 4в-расмларда мос равишда 20°C ва 42°C ҳароратларда ўлчанган маълумотлар кўрсатилган. 20°C да пахтадаги фотосинтез фаоллигининг пасайиши 42°C дагига қараганда кучлироқ у эса $F_{\text{мксек}}/F_{\text{мсек}}$ нисбат вақтий силжишларнинг кескин четлашишлари билан тушунтирилган.

Шундай қилиб, фотосистема II фотохимёвий жараёнлари квант чиқишлари, кечикувчи флуоресценция турли вақтий компонентлари, турли стресс шароитларда фотосинтезловчи тизимлар функционалиги, ўсимликлардаги ёруғлик таъсирида тўйиниш динамикаси, табиати ва фотосинтетик аппаратда ёруғлик таъсирида заифлашув пайтида электрон ташилиш тизимида электрон кўчиш жараёнлари ҳақида кенг маълумот берувчи қурилма бўлиб хизмат қилади. Ушбу параметрлар кучли ёруғлик ва ноқулай ҳарорат шароитларида ўсимликлар турли функционал хоссаларини қиёсий ўрганишда хизмат қилиши мумкин.

Фотосинтетик мембрана реакция марказларида экситонларнинг тутилиши ва, умуман, фотосинтез самарадорлигини аниқловчи ёруғлик йиғувчи антенна ва реакция маркази орасидаги энергетик боғлиқлик, ҳароратнинг критик чегарага $t_c \sim 40^\circ\text{C}$ яқинлашиши билан кескин пасаяди ҳамда F_0 қоронғилик флуоресценциянинг мос равишда ошишига олиб келади. Ўсимлик навларидаги ўзига хос хусусият ва ўсиш шароити фотосинтетик мембрана липид-оксилли таркибида аксини топади ва ўз навбатида t_c ни аниқлайди. Ушбу ҳолатни ҳисобга олган ҳолда t_c нинг ўсимликлар тури ва ўсишдаги ҳарорат режимига боғлиқлиги ўрганилган.



4-расм. Кечикувчи флуоресценция микросекунд (10-50 мкс) ва миллисекунд (1-5 мс) компонентлари интенсивликлари нисбатининг $F_{\text{мкс}}/F_{\text{мс}}$ нурланишнинг турли интенсивликлари ва турли ҳароратлардаги ўзгаришлари

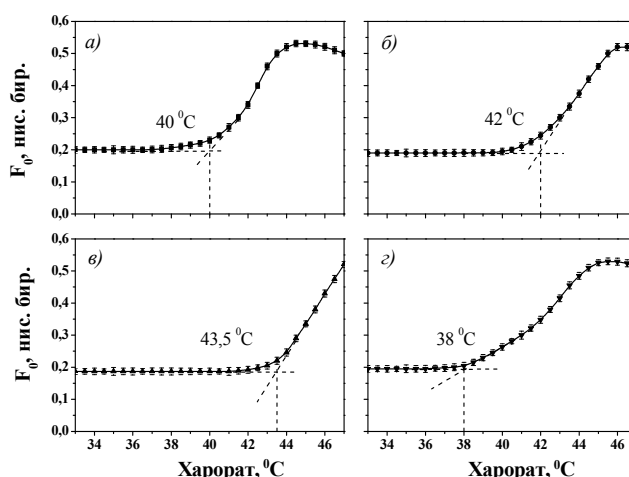
5-расмда 15°C (а), 25°C (б) ва 35°C (в) ҳароратларда ўстирилган пахтада ва таққослаш учун 30 Вт/м² ёруғликда ўстирилган шпинатда (г) ўлчанган F_0 нинг ҳароратга боғлиқлиги кўрсатилган.

Расмдан кўришиб турибдики, иссиқсевар пахтада t_c шпинатга қараганда юқори ва бундан келиб чиқадики, пахтанинг юқори ҳароратда ўстанлиги t_c нинг юқори бўлишини ва F_0 нинг кескин ошишини таъминлайди. Қаттиқ тизимлар, шу жумладан, мембрана ҳам паст ҳарорат ва t_c га яқинлашганда бирдан юмшайди, бунинг натижасида хлорофилл-оксилли комплекс орасидаги масофа ошади. Бу ўз навбатида улар орасидаги энергетик (экситонли) алоқани кескин пасайтиради. Бу тадқиқот натижалари шуни тасдиқладики, хлорофилл флуоресценцияси, фотосинтетик мембрана физик-кимёвий хоссасини ва ўз навбатида ҳарорат таъсирида структуравий турғунлиги ва унинг суюқлиги ўзгаришларини назорат қилишда самарали метод ҳисобланади.

Фотосинтетик аппаратнинг сув танқислигига жавоби табиатини атрофлича тушуниш учун дала шароитидаги ўсимликларда бир вақтнинг ўзида хлорофилл флуоресценцияси ва газ алмашинуви жараёнлари ўрганилган. Натижалар шуни кўрсатганки, пахта ўсимлиги сув танқислигига “фотодыхания” тезлигини ошириш билан реакция беради ва ёруғлик уйғонишлари энергиясининг ҳаддан зиёд тўпланишини ва табиийки, синглет кислород ва супероксидли радикаллар ҳосил бўлишининг олдини олади.

Диссертациянинг бешинчи боби «**Фотосинтезловчи тизимлардаги куюш нурланиши ўзгартирилишининг энергетикаси**»да, фотосинтез жараёнидаги энергия ўзгартирилишининг абсолют кўрсаткичлари таҳлил қилинган. Сув танқислиги шароитида «тўплаш эффектини» аниқлаш мақсадида назоратдаги ва сув танқислиги шароитида «стресс» ўстирилган пахта барглари фотосистема II фотокимёвий жараёнлари квант самарадорлиги ўзгаришларининг суткалик динамикаси ўлчанган (6-расм).

Кундузги юқори интенсивликли ёруғлик вақтида фотосистема II фаоллигининг пасайиши билан аниқланадиган фотосистема II фотокимёвий жараёнлари квант самарадорлигининг минимал сатҳи, назоратдаги намунада 0,43 «стресс» ҳолатидаги намунада 0,61 ни ташкил этган. Расмдан кўринадикки, «стресс» ҳолатидаги намунада пасайиш амплитудаси назоратдагига қараганда кичик, бу сув танқислигига мослашган намунада кундузи “фотодыхания” қийматининг ошиши билан тушунтирилган.



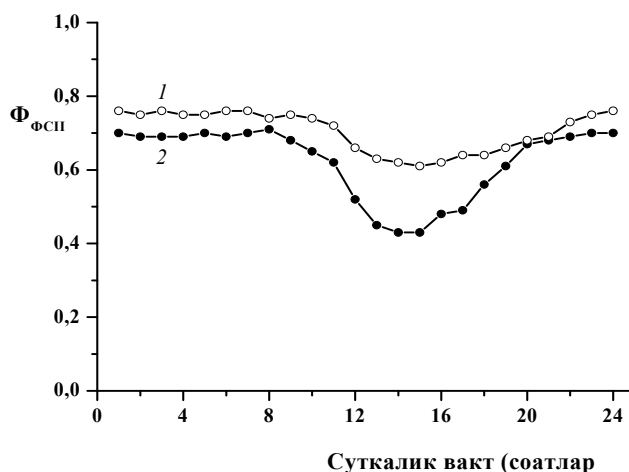
5-расм. Қоронғулик флуоресценцияси (F_0) нинг ҳароратга боғлиқлиги

Фотосистема II фотохимёвий жараёнлари квант самарадорлиги суткалик ўзгаришлари асимметриясига эътибор бериш лозим: «стресс» ҳолатидаги намунада назоратга қараганда бу қиймат сезиларли даражада юқори. Фикримизча, бу сув танқислигида қайта тикланиш жараёнлари секин компоненталарининг ошиши билан боғлиқ. Шундай қилиб, фотосистема II фотохимёвий жараёнлари квант самарадорлиги $\Phi_{\text{ФСИ}}$ суткалик ўзгаришлари қуёш радиацияси таъсирида ёруғликдан тўйиниш характери ва кўлами хақида кенг маълумот беради.

Турли ташқи омиллар таъсири шароитидаги фотосинтез энергетик самарадорлигини ўрганиш натижалари келтириб ўтилган. Узоқ муддатли ёруғлик таъсирида фотосистема II реакция марказлари реакция лаёқатининг ўзгаришлари, бу реакция марказлари фаоллигининг сусайиши ва тикланиши ва уларга боғлиқ равишда хлорофилл флуоресценциясининг ўзгаришлари тадқиқ этилган. Паст ва юқори интенсивликли ёруғликда ўстирилган ўсимликлар фотосистема II реакция марказлари фотоинактивацияси ва улар ишлаш қобилияти тикланишининг вақтий катталиклари флуоресценция ёрдамида аниқланган. Фотосинтезловчи бактериялар ва яримўтказгичли фотовольтаик қуёш энергияси ўзгартиргичлари энергетик характерис-тикаларини қиёсий ўрганиш натижалари келтирилган.

Қуёш радиацияси энергияси, асосан, 350 нм – 1200 нм спектрал соҳада тўпланган бўлиб, ўсимликлар фотосинтезида унинг 700 нм гача бўлган соҳаси ва бактерияларда кечадиган фотосинтезда эса 1100 нм гача бўлган ИҚ соҳаси ҳам ўзлаштирилади. Агар ўсимликлар фотосинтези амалий нуқтаи назардан ўта муҳим табиий энергия ўзгартирувчи сифатида қаралса, унда фотосинтезловчи параметрлари бактериялар биомасса айланишининг юқори тезлиги 40% гача етадиган истиқболли спектрал соҳага эга эканлиги ва ген инженерия усули ёрдамида бу каби фототроф организмларнинг спектрал-энергетик характеристикаларини ўзгартириш мумкинлиги уларни қуёш энергетикасида қўллашнинг катта имкониятларини кўрсатиб беради.

Спектрнинг яқин ИҚ соҳасида турли ютилиш поласаларига эга бўлган фотосинтезловчи бактериялар мос гуруҳининг спектрал-энергетик характеристикаларини тадқиқ этиш натижалари келтирилган: ёввойи типли *Blc. Viridis*, *Rhodospirillum (R.) Rubrum*, *Rhodobacter (Rba.) Sphaeroides*, яшил-



6-расм. Фотосистема II фотохимёвий жараёнлари квант самарадорлиги ўзгаришлари суткалик динамикаси. «стресс» (1) ва назоратдаги (2) намуналар

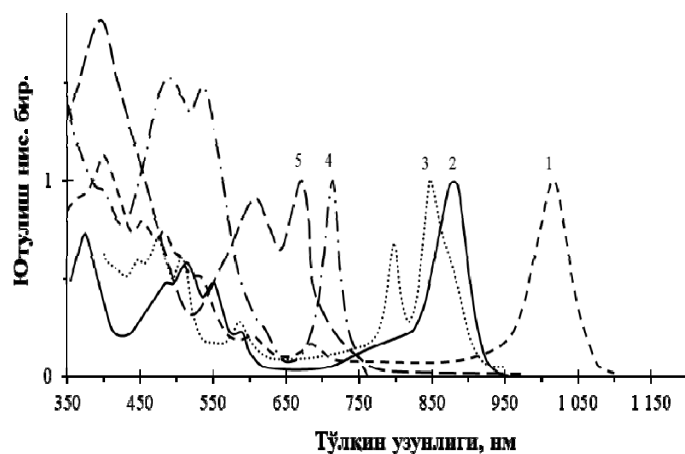
оч сарик бактерия *Chloriobium Phaeobacteriodes* ва цианобактерия *Synechocystis*.

7-расмда юқорида кўрсатилган организмлар ёввойи типларидан ажратиб олинган фотосинтезловчи мембраналарнинг паст концентрацияли физиологик эритмадаги ютилиш спектрлари кўрсатилган.

Қаралаётган спектрларда умумий қонуниятни пайқаш мумкин: спектрнинг қисқа тўлқинли қисмида кучли ютилиш, *Core* соҳаси, яъни асосий фотосинтетик пигментлар – бактериохлорофиллар ва қўшимча пигментлар – каротиноидларнинг учта максимумли соҳаси билан боғланган, ~ 350 – 550 нм соҳада кузатилади. Узун тўлқинли қисмида эса кучли ютилиш худди шу бактериохлорофилларнинг фақат алоҳида жойлашган унча кенг бўлмаган Q_y зонасида кузатилади. Бу зоналар спектрал ҳолати бактериохлорофиллар турига ва уларнинг мембранадаги оксилли муҳитига боғлиқ ҳолда 720 нм дан 1020 нм гача ўзгариши мумкин.

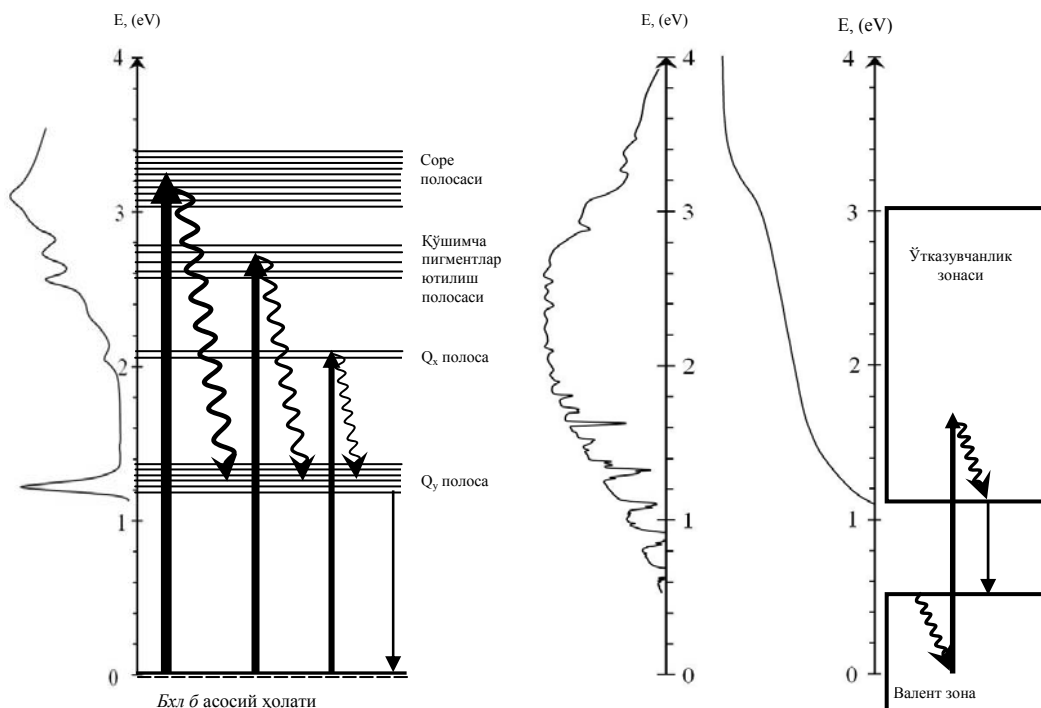
Шундай қилиб, соддалаштирилган модел сифатида қаралаётган фотосинтезловчи бактериялар спектрларини фақат иккита ютилиш соҳасидан ташкил топган, деб қабул қилиш мумкин: намуна турига боғлиқ ҳолда 350 – 550 нм соҳадаги кенг қисқа тўлқинли соҳа ва максимумлари 720 – 1020 нм соҳадаги анча тор (~100 нм) узун тўлқинли соҳа.

8-расмда бактериал фотосинтез ва фотовольтаик ячейкада қуёш ёруғлиги йиғилишининг мос равишда *Blastochloris Viridis* бактерияси ва кристалл кремний мисолидаги қиёсий энергетик диаграммаси тасвирланган. *Blastochloris Viridis* мембранаси ва кристалл кремний ютилиш спектрлари (мос равишда энергетик диаграммадан чапда кўрсатилган) ва худди шундай Ер сиртидаги қуёш нурланиши (расм ўртасида) квант энергиясига боғлиқ ҳолда эВ ларда берилган. *Blastochloris Viridis* фотосинтезловчи мембраналарида ~1.1 – 3.5 эВ соҳадаги қуёш нурланиши энергияси турли тўлқин узунликларида турли даражада ютилади ва 1020 нм соҳадаги тўлқин узунлигида тўпланади: турли энергияли ёруғлик квантлари ўз энергиясини қисман йўқотиб, жуда қисқа вақтда (~ 10^{-12} сек) бактериохлорофил b нинг Q_y соҳасига мос келувчи энг қуйи уйғонган энергетик сатҳга ўтади ва фотохимёвий реакцияларни фаоллаштириш учун реакция марказига узатилади. Моҳияти жиҳатидан худди шундай кўриниш кристалл кремнийда ҳам ўринли бўлади. Тақиқланган зона энергиясидан энергияси катта бўлган ёруғлик квантлари критик бўлган тўлқин узунлигидан кичик тўлқин узунлик



7-расм. Фотосинтетик *Blc. Viridis* (1), *Rhodospirillum Rubrum* (2), *Rhodobacter Sphaeroides* (3), *Chloriobium Phaeobacteriodes* (4) ва *Synechocystis* (5) бактериялари ютилиш спектрлари

билан валент зонадан ўтказувчанлик зонасига электронларни уриб чиқариши мумкин. Бунда электронлар энергияси «ички фотоэффект» чақирадиган квантлар энергиясига боғлиқ ҳолда турлича бўлади. Лекин бу электронлар жуда қисқа вақт ичида валент зонанинг энг қуйи соҳасига релаксация бўлади ва улар фотоэлектрик эффектни пайдо қилади.



8-расм. Фотосинтетик бактерия *Blactochloris Viridis* ва кремнийли фотовольтаик ячеяда куёш нури ўзгартирилиши жараёнларининг қиёсий энергетикаси

Қаралаётган иккала жараёнда ҳам юқори даражадаги квант самарадорликка эга эканлигига қарамасдан, квантлар энергиясининг катта қисмини *Blactochloris Viridis* ёруғлик йиғувчи антеннада бактериохлорофилл б молекулаларининг энг қуйи уйғонган ҳолатига ёки кристалл кремнийда ҳам электронларнинг ўтказувчанлик зонасининг энг қуйи соҳаларига ўтганда йўқотиши натижасида иккала тизимда ҳам ёруғлик тўплаш энергетик самарадорлиги юқори бўлмайди.

Яримўтказгичли фотовольтаик ячеяларда юқори қийматли энергетик самарадорликка эришиш учун бир вақтнинг ўзида турли тақикланган зона энергиясига эга бўлган турлича материаллардан бир неча ўтишлар ҳосил қилинади. Худди шундай схемадан фотосинтетик куёш энергияси ўзгартирувчиларида ҳам фойдаланиш мумкинлиги атрофлича кўриб чиқилган.

Куёш энергиясининг фотосинтетик ўзгартирилишини сифат жиҳатидан баҳолашда спектр бўйича текис тақсимланишида шуни ҳисоблаш мумкинки, энергиянинг маълум бир спектрал соҳадаги улуши унинг кенлигига пропорционалдир. Унда *Blactochloris Viridis*да 350 – 550 нм соҳада ютилган нурланиш улуши $(550 - 350 \text{ нм}) / (1200 - 350 \text{ нм}) = 0.24$ муносабат билан аниқланади. Ёруғлик тўплаш жараёнида квантлар энергияси 3.54 эВ – 2.26 эВ

дан (ўртача 2.9 эВ) 1.22 эВ гача камаяди ва шундай қилиб, бундай қисқа тўлқинли нурланиш энергиясини узун тўлқинли Q_y полосага узатиш самарадорлиги ўртача 0.42 ни ташкил этади. Худди шу полосада ютилган нурланиш тўпланиши $80 \text{ нм}/(1200 - 350 \text{ нм}) = 0.095$ билан 1.0 га тенг энергетик самарадорликка эга бўлади. Шундай экан, квантлар бунда энергиясини йўқотмайди. Якунида *Blactochloris Viridis* ёруғлик йиғувчи антенналардаги умумий ёруғлик тўпланишини куйидагича энергетик самарадорликка эга деб ҳисоблаш мумкин: $0.24 \times 0.42 + 0.095 \times 1.0 \approx 0.20$.

Қолган фотосинтетик бактериялар учун ўтказилган ҳисоблашлар куйидагича энергетик самарадорлик қийматларини кўрсатган: *R. Rubrum* да умумий ёруғлик тўплаш энергетик самарадорлиги 0.19, *Rba. Sphaeroides* да 0.26, *Chloriobium Phaeobacteriodes* да 0.19 ва цианобактерия *Synechocystis* да 0.14 қийматларни мос равишда ташкил этган.

Ўрганилган бактерияларда қуёш нурланишининг турли тўлқин узунликлари таъсирида уйғотиладиган фотосинтезнинг энергетик самарадорлиги ~ 0.20 атрофида бўлган. Лекин бу каби фотосинтезловчи организмларнинг биргаликдаги фаолиятида бу самарадорлик 0.50 дан ошган. Бу самарадорликнинг янада оширилиши, ютилиш спектрларини оптималлаштириш ва қўлланилаётган фотосинтезловчи бактериялар комбинациясига боғлиқ ҳолда амалга оширилиши мумкин. Турли фотосинтезловчи бактерияларнинг биргаликда ишлаши уларнинг физиологик ўхшашлигини ҳисобга олган ҳолда амалга оширилади. Кўрсатиб ўтилган шарт бажарилганда фотосинтезловчи бактериялар биологик қуёш энергияси ўзгартирувчиларини яратишга асос бўлади.

ХУЛОСА

1. Хлорофилл флуоресценцияси спектрал-кинетик параметрлари ёруғлик энергиясининг фотосинтетик аппарат ёруғлик йиғувчи антенналарида ютилиши, кўчиши ҳамда зарядларнинг реакция марказларида ташилиши ва тақсимланишини сон жиҳатдан характерлаш имконини бериши кўрсатиб ўтилган.
2. Илк бор тажрибада кўрсатилганки, ёруғликнинг бевосита антеннадан қайта нурланиши билан боғлиқ бўлган хлорофилл тезкор флуоресценцияси фотосинтез самарадорлигининг интеграл ва электронларнинг тескари ташилишидан ҳосил бўладиган кечикувчи флуоресценция эса реакция марказининг турли қисмлари самарадорлигининг дифференциал кўрсаткичи бўлиб хизмат қилади.
3. Антеннада ёруғлик уйғонишларининг (экситонлар) кўчиши ва уларнинг реакция марказларида тутилиши қонуниятлари импульс-амплитудали модуляция флуорометрида ўлчанган ўзгарувчан флуоресценция ёрдамида аниқлаш имкониятлари очиқ берилган.
4. Илк бор кечикувчи флуоресценциянинг давомийлиги наносекунддан юзлаб миллисекундгача бўлган турли вақтий компонентлари ёрдамида фотосинтез реакция марказларида зарядларнинг тескари ташилиш

жараёнини ўрганиш имконини берувчи тадқиқот методи ишлаб чиқилган ва қурилмаси яратилган.

5. Флуоресценция параметрлари ёрдамида фотоинактивация ва фотомуҳофаза жараёнларининг бир вақтдаги ҳаракатини сон жиҳатдан характерлаш имкониятлари кўрсатиб берилган: фотоинактивация ва фотохимоя жараёнлари баланси ёрдамида функционал реакция марказлари сонининг ўзгаришларини тавсифловчи математик ифодалар киритилган.
6. Илк бор кечикувчи флуоресценциянинг турли вақтий компонентлари ёрдамида стресс шароитидаги фотохимёвий реакция марказлари турли соҳаларидаги электрон ташилиш тезлигини аниқлаш имкониятлари тадқиқотлар натижасида кўрсатиб берилган.
7. Эритмадаги бактериохлорофилл *b* молекулалари оксидланиш даражасини флуоресценция максимумлари интенсивликларининг муносабатига қараб аниқлашнинг содда спектрал методи таклиф этилган.
8. Илк бор тадқиқотлар натижасида хлорофиллар, бактериохлорофиллар ҳамда уларнинг бир қатор бирикмалари ютилиш ва флуоресценция спектрлари ўраб турган молекулалар табиатига боғлиқ ҳолда катта ўзгаришларга учраши ва яқин инфрақизил соҳадаги янги перспектив фотосенсибилизаторлар сифатидаги бирикмалар бўлиши мумкинлиги кўрсатиб берилган.
9. Фотосинтетик *Blastochloris viridis* бактерияси фотосинтетик аппарати функционал структурасининг ген инженерия усули билан ўзгартирилиши, ютилиш ва флуоресценция спектрларида ўз аксини топувчи фотосинтез энергетикасининг сифат жиҳатидан ўзгаришларига олиб келиши ўрнатилган. Бир гуруҳ фотосинтезловчи бактериялардан ташкил топган, натижавий энергетик самарадорлиги 50% дан юқори бўлган янги типдаги энергия ўзгартирувчи мослама таклиф этилган.

**НАУЧНЫЙ СОВЕТ ПО ПРИСУЖДЕНИЮ УЧЕНОЙ СТЕПЕНИ
ДОКТОРА НАУК 16.07.2013.ФМ/Т.12.01 при ФИЗИКО-ТЕХНИЧЕСКОМ
ИНСТИТУТЕ НАУЧНО-ПРОИЗВОДСТВЕННОГО ОБЪЕДИНЕНИЯ
«ФИЗИКА-СОЛНЦЕ», ИНСТИТУТЕ ИОННО-ПЛАЗМЕННЫХ И
ЛАЗЕРНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ И САМАРКАНДСКОМ
ГОСУДАРСТВЕННОМ УНИВЕРСИТЕТЕ**

ИНСТИТУТ ИОННО-ПЛАЗМЕННЫХ И ЛАЗЕРНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

НЕМАТОВ ШЕРЗОД КАЛАНДАРОВИЧ

**СПЕКТРАЛЬНО-КИНЕТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ
ФЛУОРЕСЦЕНЦИИ ХЛОРОФИЛЛА В ФОТОСИНТЕЗИРУЮЩИХ
СИСТЕМАХ**

01.04.05 – Оптика (физико-математические науки)

АВТОРЕФЕРАТ ДОКТОРСКОЙ ДИССЕРТАЦИИ

Ташкент – 2015 год

Тема докторской диссертации зарегистрирована под номером 12.05.2015/B2015.1.FM198 в Высшей аттестационной комиссии при Кабинете Министров Республики Узбекистан.

Докторская диссертация выполнена в Институте ионно-плазменных и лазерных технологий Академии Наук Республики Узбекистан.

Автореферат диссертации на трех языках (узбекский, русский, английский) размещен на веб-странице Научного совета по адресу (www.fti-kengash.uz) и Информационно-образовательном портале «Ziynet» по адресу (www.ziynet.uz).

Научный консультант:	Захидов Эркин Агзамович доктор физико-математических наук, профессор
Официальные оппоненты:	Бахрамов Сагдулла Абдуллаевич доктор физико-математических наук, профессор Жумабаев Абдувохид Жумабаевич доктор физико-математических наук, профессор Юсупов Джавдат Бакиджанович доктор физико-математических наук
Ведущая организация:	Национальный университет Узбекистана

Защита состоится «___» _____ 2015г. в ___ часов на заседании Научного совета 16.07.2013.FM/Т.12.01 при Физико-техническом институте, Институте ионно-плазменных и лазерных технологий и Самаркандском государственном университете (адрес: 100084, г.Ташкент, ул. Бодомзор йули - 2б. Тел./Факс: (+99871) 235-42-91, e-mail:lutp@uzsci.net).

С докторской диссертацией можно ознакомиться в Информационно-ресурсном центре Физико-технического института (зарегистрирована за № ___) (адрес: 100084, г.Ташкент, ул. Бодомзор йули - 2б. Тел.: (+99871) 235-30-41).

Автореферат диссертации разослан «___» _____ 2015г.
(протокол рассылки № _____ от _____ 2015г.).

С.Л. Лутпуллаев

Председатель Научного совета по присуждению
ученой степени доктора наук, д.ф.-м.н., профессор

А.В. Каримов

Ученый секретарь Научного совета по присуждению
ученой степени доктора наук, д.ф.-м.н., профессор

И. Г. Атабаев

Председатель научного семинара при Научном совете
по присуждению ученой степени доктора наук, д.ф.-м.н., профессор

Введение (Аннотация докторской диссертации)

Актуальность и востребованность темы диссертации. Проблемы создания новых поколений источников энергии являются одним из важнейших вызовов для человечества в XXI веке. «Быстрый рост населения Земли и постоянное увеличение среднедушевого потребления энергии указывают на то, что к середине нашего столетия выработка энергии должна увеличиться с нынешних 15 ТВт до ~40 ТВт»¹. В настоящее время большинство первичных источников энергии, используемых по всему миру, составляют невозобновляемые и ограниченные ресурсы. Кроме того, такие невозобновляемые источники относятся к ископаемому топливу (уголь, нефть, газ), использование которого вызывает загрязнение окружающей среды, отрицательно влияя на здоровье и качество жизни людей, как на региональном, так и глобальном уровне. Для эффективного решения этой проблемы, при сохранении растущего уровня жизни людей, ключевую роль должно сыграть более интенсивное использование новых возобновляемых источников энергии.

В живой природе также происходит глобальное преобразование и накопление энергии солнечного излучения, которая в последующем расходуется для поддержания жизнедеятельности всего живого. Фотосинтез, является как комплекс физико-химических процессов преобразования энергии света в энергию химических связей специальных биомолекул. Анализ показывает, что на пути создания искусственного фотосинтеза исследователи встречаются с проблемами, для которых по настоящее время не найдены принципиальные решения, в том числе связанные с эффективными физическими механизмами и оптимальными структурными схемами. Не смотря на это, достигнут значительный прогресс в создании различных модельных систем искусственного фотосинтеза. Компания Toshiba недавно представила свою версию модели искусственного фотосинтеза, обладающего рекордной на сегодняшний день эффективностью 1,5%.

При этом, изучение физической природы флуоресцентного излучения фотосинтезирующих систем, эффективности преобразования в них энергии, возможности применения флуоресцентных показателей в качестве инструмента мониторинга роста и развития растений, а также новых путей решения проблем энергетики, являющихся, в настоящее время, крайне актуальными на мировом уровне, служат основой для создания научных принципов искусственного фотосинтеза, которые могут быть новыми источниками альтернативной энергии и обосновывают актуальность данного научного исследования.

¹ Criswell D. R. Energy Prosperity within the 21st Century and Beyond: Options and the Unique Roles of the Sun and the Moon, innovative solutions to CO₂ stabilization, Watts R. Ed. // Cambridge: Cambridge Un. Press, 2002. – 68 p.

Изменчивость природных условий, нехватка минеральных веществ, а также специфические физиологические особенности растений могут значительно снизить эффективность фотосинтеза. Выявление природы такого воздействия и разработка быстрых, неразрушающих методов оценки фотосинтетической активности посевов различных селхозкультур при наличии указанных неблагоприятных условий на основе достижений современной физики, а также создание и применение на практике новых, передовых научных разработок и технологий представляет собой важную научно-практическую задачу и обуславливает востребованность темы диссертации.

Связь исследований с приоритетными направлениями развития науки и технологий в республике. Исследовательская работа выполнена в соответствии с приоритетными направлениями развития науки и технологий в республике: 2 – «Энергетика, энерго- и ресурсосбережение» и 3 – «Развитие и использование возобновляемых источников энергии».

Обзор международных научных исследований по теме диссертации. По изучению природы фотосинтетического преобразования света, воздействия структурных особенностей и внешних стресс факторов на эффективность фотосинтеза в растениях и фотосинтезирующих бактериях, а также путей создания искусственного фотосинтеза, обеспечивающих эффективное преобразование света, как и в природном фотосинтезе в научных центрах передовых стран, университетах и научно-исследовательских институтах, в частности, университете Осака (Япония), университете Чикаго (США), Биохимическом университете Макса Планка (Германия), Цюрихском политехническом университете (Швейцария), университете Маре (Англия), национальном исследовательском центре Италии и Московском государственном университете им. М.В. Ломоносова (Россия) активно проводится научно исследовательские работы.

По направлению исследований диссертации, на мировом уровне был решен ряд актуальных проблем и получены следующие важнейшие научные результаты: с применением флуоресцентно-спектроскопических методов были изучены структурно-функциональные характеристики, энергетика и первичные процессы фотосинтеза растений, квантовая и энергетическая эффективности фотосинтезирующих систем в Цюрихском политехническом университете (Швейцария) и Московском государственном университете им. М.В. Ломоносова (Россия), а также для повышения показателя эффективности фотосинтеза в Университете г.Осака (Япония) и университете Маре (Англия) были созданы системы искусственного фотосинтеза с применением наиболее оптимальных составных пигментов.

В настоящее время проводятся научно-исследовательские работы по таким актуальным направлениям, как изучение физических механизмов фотосинтеза, их взаимосвязь с флуоресценцией хлорофилла, временные и энергетические свойства фотохимических процессов в фотосинтезирующих организмах в целом, или в различных препаратах, выделенных из них, а

также, создание быстрых и эффективных методов контроля воздействия внешних стресс факторов.

Степень изученности проблемы. Уникальная способность фотосинтезирующих систем преобразовывать широкий спектр фотосинтетически активной радиации солнечного излучения в энергию биомолекул, физические механизмы, обеспечивающие высокую эффективность преобразования, а также различные этапы первичных процессов фотосинтеза, характеризующиеся временами от сотен фемтосекунд до десятков миллисекунд, представляют огромный интерес для исследователей в различных областях.

Академик академии Наук России А.Б.Рубин изучил различные этапы фотосинтеза и раскрыл их физико-химические механизмы. В этой области был проведен ряд важнейших научных исследований, из них в 1961 г. М.Кальвин установил последовательность «темновых» реакций фотосинтеза, а в 1988 г. Ж.Дйизенхофер, Х.Мичель и Р.Хубер открыли молекулярной структуры фотосинтетического реакционного центра. В практическом применении флуоресцентных методов для мониторинга фотосинтетической активности растений огромную роль сыграли разработки флуорометра импульсно-амплитудной модуляции излучения (РАМ-флуорометр) У.Шрайбера и анализатора эффективности растений (РЕА-анализатора) Р.Страссера, которые позволили «вывести» лабораторные измерения фотосинтеза «на поле» и позволили проводить натуральные эксперименты в естественных условиях.

В Узбекистане, в лаборатории «физики конденсированных сред» института Ионно плазменных и лазерных технологий, под руководством д.ф.-м.н., проф. Захидова Э.А. проводятся работы по комплексному изучению флуоресцентно-спектроскопических свойств природных фотосинтезирующих организмов (высшие растения и фотосинтезирующие бактерии). В результате этих исследований разработан и внедрен в практику флуоресцентный метод для быстрого и эффективного мониторинга реакции растений на различные внешние воздействия. В настоящее время сотрудниками данной лаборатории предложены принципы работы искусственных энергопреобразующих устройств на основе пигментов природного фотосинтеза.

Применение современных физических методов электронной микроскопии, сверхбыстрой лазерной спектроскопии, абсорбционно-флуоресцентных исследований, а также биохимических методов выделения различных структурно-функциональных единиц фотосинтеза позволили достичь значительных успехов в понимании механизмов различных процессов фотосинтеза растений и бактериального фотосинтеза. Однако до сегодняшнего времени остается открытым ряд принципиальных вопросов в этой области. Некоторые из этих вопросов касаются эффективности фотосинтетического преобразования света в стрессовых условиях: при длительном высокоинтенсивном освещении, недостаточности воды,

неблагоприятных температурах, скорость фотосинтеза значительно подавляется и происходит деградация фотосинтетического аппарата.

На сегодняшний день исследовательские работы для воспроизведения природного процесса фотосинтеза в упрощенном, но более эффективном виде для создания системы искусственного фотосинтеза, еще не проводятся на достаточном уровне.

Связь темы диссертации с научными работами научно-исследовательской организации, где выполнена диссертация. Исследовательская работа была выполнена в рамках исследований следующих проектов института Ионно-плазменных и лазерных технологий: № ZB2-2003 (CRDF) «Разработка флуоресцентных методов изучения фотосинтезирующих систем и оценка эффективности их функционирования» (2004-2005), «Узбекистан - Корея 2008» «Изучение процессов тепловой диссипации световой энергии в фотосинтетическом аппарате растений фотоакустическими методами» (2008-2011), № Ф2-ФА-Ф147 «Изучение физических механизмов высокоэффективного преобразования солнечной энергии в первичных процессах фотосинтеза» (2012-2016) и № ФА-А4-Ф047 «Разработка флуоресцентных методов и приборных средств мониторинга эффективности фотосинтеза в селхозкультурах» (2015-2017).

Целью исследования является разработка физических основ и определение оптимальных параметров флуоресцентного контроля, эффективности фотосинтетического преобразования солнечной энергии, используя спектрально-кинетические характеристики флуоресценции хлорофилла в растениях и фотосинтезирующих бактериях.

Для достижения этой цели сформулированы следующие **задачи исследования:**

создание экспериментальных установок и методов изучения флуоресценции хлорофилла в фотосинтезирующих системах при непрерывном возбуждении, импульсном возбуждении с высоким временным разрешением, а также при «двойном» возбуждении, одновременно со слабым непрерывным и сильным импульсным излучениями;

разработка методики исследования кинетики индукции флуоресценции фотосинтезирующих систем, а также измерение параметров индукции для определения активности и эффективности первичных процессов фотосинтеза в фотосинтезирующих организмах;

применение систем мониторинга фотосинтетической активности растений в «полевых» условиях методом импульс амплитудной модуляции, в том числе ее суточных изменений;

изучить флуоресценции бактериохлорофилла в фотосинтетических бактериях с генно-модифицированной структурой фотосинтетического аппарата для установления взаимосвязи между параметрами флуоресценции и структурными особенностями в них;

выявить взаимную связь «структура-энергетика-функционирование» в фотосинтезе с помощью абсорбционно-флуоресцентных характеристик фотосинтезирующих систем при комнатной и криогенных температурах;

изучить спектрально-кинетические характеристики быстрой и замедленной флуоресценции фотосинтезирующих организмов при воздействии неблагоприятных температур и высокоинтенсивного освещения, и разработать на этой основе методы оценки воздействия таких стрессов;

изучить физическую природу и быструю кинетику процессов переноса заряда по цепи транспорта электронов реакционного центра с помощью замедленной флуоресценции нано-, микро- и миллисекундной длительностей;

оценка энергетической эффективности преобразования солнечной энергии в многокомпонентных ячейках с различными фотосинтезирующими бактериями, с учетом индивидуальных спектров их поглощения солнечного излучения.

Объектом исследования являются листья высших растений (хлопчатник местных сортов, шпинат), целые образцы фотосинтезирующих бактерий и выделенные из них функциональные субъединицы (фотосинтетические мембраны, светособирающие антенны, реакционный центр), а также мономерные (растворенные в органических растворах) фотосинтетические пигменты - хлорофиллы, бактериохлорофиллы.

Предметом исследования являются физико-химические процессы поглощения и миграции световой энергии в светособирающей антенне, разделения и переноса зарядов в реакционный центр фотосинтезирующих организмов в благоприятных окружающих условиях и при воздействии различных стресс-факторов.

Методы исследования. В диссертационной работе применены методы адсорбционной и флуоресцентной спектроскопии, в том числе с высоким временным разрешением, используя импульсный лазер на гранате с неодимом (532 нм, 100 пс) и азотный лазер (337 нм, 7 нс). Высокие чувствительности в измерении различных компонентов быстрой и замедленной флуоресценции достигнуты применением метода строб-интегрирования коротких импульсов при импульсно-периодическом возбуждении с высокими частотами повторения (до 10 кГц). Мониторинг фотосинтетической активности растений в полевых условиях проведен с применением флуорометра импульсно-амплитудной модуляции.

Научная новизна исследования состоит в следующем:

созданы научные основы методик регистрации параметров флуоресценции фотосинтезирующих систем в режимах *in vitro* и *in vivo*, позволяющие выявлять физическую природу (поглощения и миграции световой энергии в светособирающей антенне, разделения и переноса зарядов в реакционный центр) первичных процессов фотосинтеза;

разработаны новые методики мониторинга эффективности фотосинтеза с помощью спектрально-кинетической характеристики быстрой и замедленной флуоресценции фотосинтезирующих организмов при воздействии различных стресс факторов;

впервые экспериментально определены временные характеристики и скорость транспорта электронов в различных участках цепи транспорта

электронов в реакционный центр фотосистемы II по параметрам замедленной флуоресценции и кинетики индукции быстрой флуоресценции;

доказано, что темновая флуоресценция листьев растений может служить показателем интегрированности светособирающей антенны и реакционного центра в фотосинтетической мембране, а разрушение такой интеграции приводит к увеличению интенсивности такой флуоресценции;

выявлены закономерности миграции энергии светового возбуждения в светособирающей антенне и ее захвата в реакционный центр с двумя физическими моделями (модели «озера» и «лужи») структуры фотосинтетического аппарата;

экспериментально обосновано, что хлорофиллы, бактериохлорофиллы и ряд их производных являются перспективными соединениями в качестве фотосенсибилизаторов, работающих в ближнем ИК-диапазоне. Выявлено, что спектры поглощения и флуоресценции этих соединений могут претерпеть значительные изменения в зависимости от молекулярного окружения;

впервые разработаны научные основы энергопреобразующих устройств на основе группы фотосинтезирующих бактерий с суммарной энергетической эффективностью более 50% по аналогии с многопереходными полупроводниковыми фотовольтаическими устройствами.

Практические результаты исследования. Разработаны методы и приборные средства для определения фотосинтетической активности растений и фотосинтезирующих бактерий, что может использоваться для мониторинга роста и развития, различных сельхозкультур, а также для оценки воздействия на них неблагоприятных окружающих условий. Предложенная система из группы пурпурных фотосинтезирующих бактерий, поглощающих в разных частях видимого и ближнего ИК-диапазона спектра может служить высокоэффективным преобразователем широкой полосы солнечного излучения.

Достоверность результатов исследования обосновывается применением современных методов и подходов оптики и лазерной физики для исследований таких специфических объектов, как фотосинтезирующие организмы. Тщательно проанализированы условия эксперимента, использованы современные измерительные приборы с высокой точностью, тщательно обработаны результаты экспериментов. Выводы основаны на базовых положениях теоретических работ, посвященных изучению физических механизмов первичных процессов фотосинтеза, и полностью согласуются с результатами других авторов.

Научная и практическая значимость результатов исследования. Научная значимость результатов исследований настоящей диссертации заключается в разработке концепции флуоресцентного контроля первичных процессов фотосинтеза в фотосинтезирующих организмах и проведен теоретический анализ миграции энергии светового возбуждения в гетерогенной светособирающей антенне и перераспределения этой энергии

по различным ее субъединицам в зависимости от скоростей прямого и обратного переноса возбуждения между ними.

Практическая значимость результатов исследований заключается в том, что предложенные научно-технические решения могут быть применены для создания эффективных методов флуоресцентного мониторинга сельхозкультур, позволяющих количественно определять фотосинтетическую активность и оценивать эффект неблагоприятных окружающих условий, а также перспективных энергопреобразующих устройств из группы фотосинтезирующих бактерий с разными полосами поглощения, которые в сумме, покрывают преобладающую часть солнечного спектра.

Внедрение результатов исследования. На основе исследований разработан флуоресцентный метод, который применен в сельскохозяйственной практике, в частности для определения параметров флуоресценции листьев 8-ми генотипов хлопчатника, созданных методом генного нокаута в Центре геномики и биоинформатики (2013-2014). Полученные результаты показывают, что эффективность фотосинтеза в генотипах хлопчатника, созданных методами генного нокаута на 25-30% выше, чем в контрольных сортах и свидетельствуют о новых возможностях флуоресцентного мониторинга для количественной оценки роста, развития данных сельхозкультур; в период полной вегетации они дали возможность провести измерения не менее 5-6 раз с 10-кратным повтором на каждом образце растений, что качественно повысило достоверность результатов (имеется справка о внедрении от 03.06.2015г. Республиканского Центра Семеноводства Хлопчатника при МСВХ РУз.

Апробация результатов исследования. Основные результаты исследований апробированы в ряде международных конференций: «17-международный симпозиум по полупроводникам и прикладной физике» ISPSA-2014 (Жезу, Корея, 2014), в Узбекско - Корейских симпозиумах (Сеул 2007, 2011 и Ташкент 2010), в международных конференциях по молекулярной спектроскопии (Самарканд 2009, 2013), в научных конференциях молодых ученых (Ташкент 2009, 2010, 2014), а также на семинарах лаборатории «Физика конденсированных сред» и на объединенном семинаре Института ионно-плазменных и лазерных технологий.

Опубликованность результатов исследования. Полученные результаты по теме диссертации изложены в 28 научных трудах, из них 10 научные статьи, в том числе 3 в международных журналах и 18 тезисов опубликованы в трудах международных и республиканских конференций.

Объем и структура диссертации. Диссертация состоит из введения, пяти глав, заключения, список использованной литературы, 192 страницы основного текста, 51 рисунок и 2 таблицы.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во **введении** обоснованы актуальность и востребованность темы диссертации, определена связь исследований с основными приоритетными направлениями развития науки и технологий в республике, приведены обзор международных научных исследований по теме диссертации, степень изученности проблемы, сформулированы цель и задачи, выявлены объект, предмет и методы исследования, изложена научная новизна исследования, обоснована достоверность полученных результатов, раскрыта их теоретическая и практическая значимость, приведены краткие сведения о внедрении результатов и апробации работы, а также об объеме и структуре диссертации.

В первой главе **«Флуоресцентная спектроскопия процессов преобразования световой энергии в фотосинтезирующих системах»** диссертации проанализированы литературные данные по изучению свойств флуоресценции хлорофилла/бактериохлорофилла: образование и релаксация возбужденных электронных состояний в единичных молекулах, влияние группирования этих молекул в фотосинтетической мембране на процессы поглощения света, миграции светового возбуждения в виде экситонов по этим молекулам в светособирающей антенне и захват возбуждения фотохимическим реакционным центром; процессы разделения и переноса зарядов в реакционный центр. Рассмотрена структурно-функциональная организация фотосинтетического аппарата, изменение характеристик его флуоресценции под действием различных стрессов. Сделано заключение, что исследование длительности и квантового выхода флуоресценции, а также основные характеристики замедленной флуоресценции в различных пигмент-белковых комплексах фотосинтеза указывают, что флуоресценция хлорофилла может быть информативным инструментом для выявления зависимости эффективности фотосинтеза от структурно-функциональных свойств фотосинтетического аппарата растений и фотосинтезирующих бактерий.

Во второй главе диссертации приведены **«Методики и экспериментальные установки для изучения флуоресценции фотосинтезирующих систем»**. В зависимости от поставленных задач применялись различные схемы возбуждения и системы регистрации быстрой флуоресценции, а также различные временные компоненты замедленной флуоресценции. Исходя из этого были разработаны экспериментальные установки, в которых в качестве источника возбуждения флуоресценции использовались непрерывные и/или импульсно-периодические лазеры, светодиоды, лампы накаливания.

Для изучения фотосинтетических процессов в листьях растений при дневном освещении в естественных условиях их роста и развития (в полевых условиях) применялся прибор, основанный на использовании двух источников света – слабого непрерывного излучения и сильного излучения в виде повторяющихся импульсов (импульс-амплитудной модуляции), что

позволило измерять количественные характеристики фотосинтетических процессов в условиях высокоинтенсивного дневного освещения.

Флуорометр импульсно-амплитудной модуляции характеризуется следующими спектрально-временными и мощностными параметрами (рис. 1): флуоресценция возбуждается короткими импульсами светоизлучающего диода длительностью ~ 3 мкс и частотой повторения до 20 кГц; этот свет проходит через коротковолновый фильтр ($\lambda < 670$ нм), а перед фотоприемником размещается длинноволновый фильтр ($\lambda > 700$ нм), предотвращающий попадание на него импульсов возбуждения. Высокоселективная импульсная усилительная система проигнорирует все сигналы, за исключением флуоресценции, возбуждаемой 3 мкс-импульсами. В качестве фотоприемника используется PIN-фотодиод. Измеряются такие параметры, как начальная флуоресценция, F_0 , максимальный квантовый выход фотохимии в фотосистеме II (ФСII), $\Phi_{ФСII}$, а также фотохимическое (q_P), и нефотохимическое (q_N), тушения. Интенсивность измеряющего света составляла $\sim 1,2$ Вт/м², действующего света 24 - 48 Вт/м², а импульсов насыщающего света до 600 Вт/м². Насыщающий импульс с длительностью до 1 с подается каждые ~ 20 с.

Для инициирования фотоингибирования на лист изучаемого растения с помощью волоконного жгута от отдельного источника (точечная лампа), подавалось излучение фотосинтетически- активной радиации в спектральной области 400–700 нм и интенсивностью до 480 Вт/м².

Измеряющий блок системы крайне устойчив к предельным изменениям освещения (до величин потока, превышающих дневное освещение), даже при крайне низких интенсивностях измеряющего света. Это особенно важно для определения квантового выхода фотохимии в фотосистеме II – $\Phi_{ФСII}$, начальной и максимальной значение флуоресценции.

Для наших начальных экспериментов лабораторный вариант флуорометра импульсно-амплитудной модуляции был разработан на основе лазерного излучения – второй гармоники непрерывно-накачиваемого лазера Nd³⁺:YAG с двойной модуляцией (532 нм, 400 нс, 10 кГц) и бокскаринтегратора BCI-280 с временными, энергетическими параметрами и чувствительностью, превосходящих соответствующие показатели флуорометра импульсно-



Рис. 1. Схематический вид принципа измерения флуоресценции импульсно-амплитудной модуляции

амплитудной модуляции, что позволило получить более стабильные кинетические кривые индукции флуоресценции листьев хлопчатника.

Описанная выше методика мониторинга в полевых условиях, разработанная нами, была применена для сравнительного изучения фотосинтетической активности различных генотипов хлопчатника, выращенных при долгосрочной водной недостаточности, на экспериментальном поле Института генетики АН РУз совместно со специалистами из Федерального Политехнического Университета, ЕТН, г.Цюрих, Швейцария, (Др. И.Фрачебуод и Др. Й.Лейпнер) и Национального Исследовательского Центра Италии, CNS, Рим, Италия (Др. А.Масаччи). Анализ медленных изменений флуоресценции имеет существенно большее значение при использовании метода насыщающих импульсов, который позволяет параллельно определять также динамику изменений фотохимического и нефотохимического тушения.

Описана метрика освещенности в изучении фотосинтезирующих систем в лабораторных и природных условиях.

Третья глава «**Фотосинтезирующие бактерии – модельный объект для исследования физических механизмов фотосинтетического энергопреобразования**» диссертации посвящена абсорбционно-флуоресцентным исследованиям фотосинтезирующих бактерий. Путем анализа спектров поглощения, флуоресценции и возбуждения флуоресценции изучена энергетика молекул бактериохлорофилла.

Сравнительное изучение абсорбционно-флуоресцентных спектров длинноволновой ИК-полосы бактериохлорофилла в природных и генетически модифицированных образцах пурпурной бактерии *Blastochloris Viridis* показало, что модификация функциональной структуры фотосинтетического аппарата *Blastochloris Viridis* методами геной инженерии, приводит к качественным изменениям в энергетике фотосинтеза, отражающихся в спектрах поглощения и флуоресценции.

Показано, что замедленная флуоресценция, вызванная, обратным переносом электронов в реакционный центр может быть информативным инструментом для изучения кинетики и термодинамики медленных этапов переноса электронов. На примере *Blastochloris Viridis* с геномодифицированным реакционным центром продемонстрирована возможность количественно характеризовать энергетiku переноса электронов в хинонных акцепторах по отношению интенсивностей различных временных компонентов замедленной флуоресценции.

Для достижения высокой стабильности и точности измерений были измерены не абсолютные интенсивности различных компонентов замедленной флуоресценции, а их отношение. Отношение интенсивностей быстрой флуоресценции и i -временной компоненты замедленной флуоресценции определяется как:

$$I_{M\Phi} / I_{3\Phi}^i = [(k_q^i \eta_{B\Phi}) / (k_\Phi)] \exp[G^i / (k_B T)], \quad (1)$$

где k_q^i – постоянная скорости прямого распада i -радикальной пары, k_{Φ} – постоянная скорости флуоресценции, $\eta_{B\Phi}$ – квантовая эффективность быстрой флуоресценции. А отношение i - и j -временных компонент замедленной флуоресценции:

$$I_{3\Phi}^i / I_{3\Phi}^j = (k_q^j / k_q^i) \exp[(G^j - G^i) / (k_B T)], \quad (2)$$

при известных значениях k_q^i и k_q^j позволяет вычислить разность свободных энергий ($G^j - G^i$) радикальных пар, чья рекомбинация вызывает эти компоненты.

В таблице 1 представлены измеренные значения отношения интенсивностей быстрой и медленной компонент ($I_{быс}$ и $I_{мед}$) замедленной флуоресценции к ее субмиллисекундной компоненте ($I_{смсек}$) в диком образце и в гибриде *Blastochloris Viridis*, выращенном на свету, а также вычисленные из них значения G^i . Отмечено, что в гибриде, выращенном в темноте, отсутствовала замедленная флуоресценция. В гибриде, выращенном на свету – субмиллисекундная компонента имела практически такую же интенсивность, что и в диком образце, а отношение $I_{быс}/I_{смсек}$ более чем два раза меньше, чем в диком образце. При этом отношение $I_{мед}/I_{смсек}$ было одинаковым в обоих образцах. Такая закономерность замедленной флуоресценции отражалась и в величинах G^i , представленных в таблице.

Таблица 1.
Отношение интенсивностей различных временных компонентов замедленной флуоресценции в диком и гибридных образцах *Blastochloris Viridis*

Генотип бактерий	$I_{быс}/I_{смсек}$	$G^I - G^A$	$I_{мед}/I_{смсек}$	$G^A - G^B$
Дикий образец	$5,9 \cdot 10^{-4}$	534 мЭВ	$1,18 \cdot 10^{-4}$	116 мЭВ
Гибрид, выращенный на свету	$3,5 \cdot 10^{-4}$	486 мЭВ	$1,03 \cdot 10^{-4}$	112 мЭВ
Гибрид, выращенный в темноте	$< 10^{-7}$	-	$< 10^{-7}$	-

Отмечено что, сравнительное изучение медленных компонентов замедленной флуоресценции реакционного центра генетически-модифицированных фотосинтетических бактерий позволяет определять изменения в энергетике хинонных акцепторов и, соответственно, в кинетике переноса электронов.

На основе данных о структуре светособирающей антенны, спектрах поглощения и флуоресценции, а также кинетике индукции флуоресценции двух видов пурпурных фотосинтетических бактерий – *Blastochloris Viridis* и *Rba. Sphaeroides* изучено влияние особенностей структуры на процессы переноса энергии в светособирающей антенне и захват в реакционный центр фотосинтетических мембран, обеспечивающие предельные значения эффективности усвоения энергии света.

На рис. 2 показаны картинки фотосинтетических мембран *Blastochloris Viridis* (а) и *Rba. Sphaeroides* (б), полученные с помощью атомного силового

микроскопа после обработки первоначального изображения (вставки в верхних левых углах) с помощью специальной программы.

На рисунках отчетливо видно, что, если фотосинтетическая мембрана *Blastochloris Viridis* представляет собой плотно упакованную, упорядоченную структуру фотосинтетической единицы, то у *Rba. Sphaeroides*, комплексы светособирающие антенны 1 – реакционный центр чередуются случайно расположенными дополнительными комплексами светособирающие антенны 2, усиливающими светособирающую способность данного организма; причем, соотношение комплексов светособирающие антенны 1 – реакционный центр и светособирающие антенны 2 зависит от условий роста бактерий и может варьироваться в широких пределах.

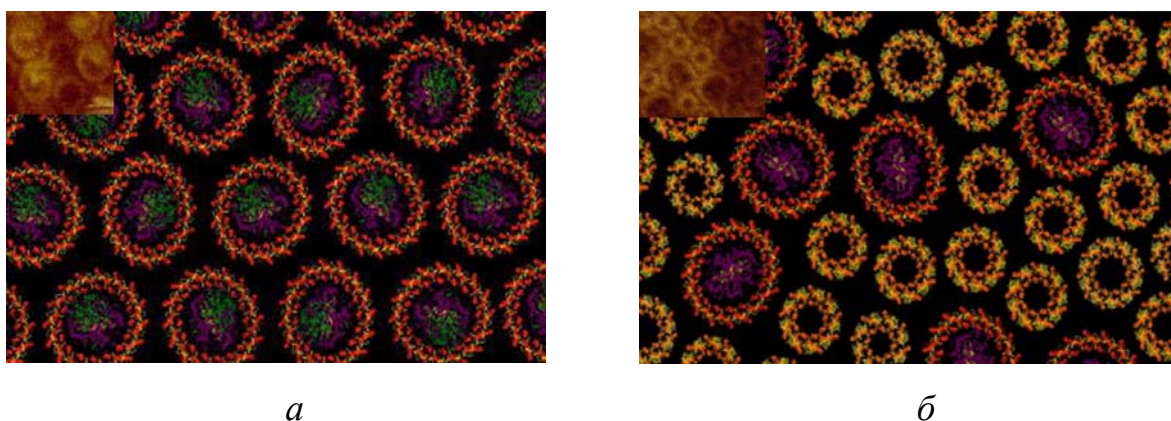


Рис. 2. Картины атомного силового микроскопа фотосинтетических мембран пурпурных бактерий *Blc. Viridis* (а) и *Rba. Sphaeroides* (б)

Спектральные характеристики рассматриваемых фотосинтезирующих бактерий подтверждают основные положения, выявленные из картинок атомного силового микроскопа. На рис. 3 показаны ИК-спектры поглощения и флуоресценции, соответствующие Q_y -полосе бактериохлорофилла а и бактериохлорофилла б, соответственно в *Rba. Sphaeroides* и *Blc. Viridis*.

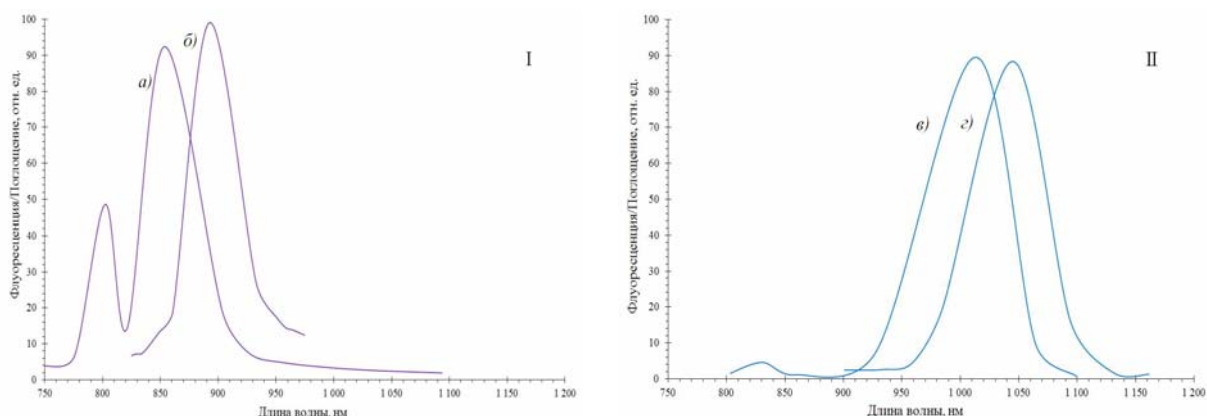


Рис. 3. ИК-спектры поглощения («а» и «в») и флуоресценции («б» и «г») фотосинтетических мембран *Rba. Sphaeroides* (I) и *Blc. Viridis* (II)

Спектры поглощения и флуоресценции *Blc. Viridis* состоят из одной полосы бактериохлорофилла б, относящейся к субъединице

светособирающие антенны 1. А в *Rba. Sphaeroides* молекулы бактериохлорофилла *a* в двух антенных субъединицах, светособирающие антенны 1 и светособирающие антенны 2 имеют разные спектральные формы и, соответственно, в спектре поглощения имеется два пика. Но, в спектре флуоресценции коротковолновый пик слабо выражен из-за быстрой релаксации соответствующего возбуждения.

Изучение спектрально-кинетических характеристик флуоресценции дает возможность оценить эффективность переноса светового возбуждения внутри и между фотосинтетических единиц в фотосинтетических мембранах пурпурных бактерий.

В данной главе показано, что хлорофиллы, бактериохлорофиллы, а также ряд их производных являются перспективными соединениями в качестве фотосенсибилизаторов, работающих в длинноволновом диапазоне оптического спектра. Наряду с высокими значениями поглощения света длинноволновых полос поглощения, данные молекулы также имеют высокие квантовые выходы возбуждения синглетного кислорода, являющиеся критерием применимости любого препарата в фотодинамической терапии. На примере ряда молекул данной группы обоснована необходимость учета возможных изменения абсорбционно-флуоресцентных характеристик молекул при их агрегировании.

В четвертой главе «**Мониторинг стресс-эффектов в растениях по характеристикам флуоресценции хлорофилла**» диссертации приведены результаты экспериментов по исследованию световых кривых скорости транспорта электронов в листьях растений при различных окружающих условиях с помощью быстрой флуоресценции, а также кривые индукции миллисекундной компоненты замедленной флуоресценции. Показано что, одновременное изучение быстрой флуоресценции и замедленной флуоресценции дает обширную информацию о процессах переноса электронов в реакционный центр фотосинтеза. Если быстрая флуоресценция количественно характеризует скорости транспорта электронов в фотосистеме II в целом, то замедленная флуоресценция является ее дифференциальной характеристикой, позволяющей определять эффективности переноса электронов на различных участках цепи транспорта электронов.

В этой главе также изучены различные временные компоненты замедленной флуоресценции, относящиеся к обратному переносу от различных участков цепи транспорта электронов. Учитывая указанное выше нами определены временные компоненты замедленной флуоресценции миллисекундной (1 - 5 мс) и микросекундной (10 - 50 мкс) длительностей, относящиеся к последовательностям процессов переноса, включающей и не включающей обратный перенос $Q_B - Q_A$ при различных интенсивностях облучения и при различных температурах листа хлопчатника.

На рис. 4. *a* представлены данные при температуре 25⁰С. При значении фотосинтетически-активной радиации 36 Вт/м² еще не наблюдается фотоингибиторное повреждение фотосинтетического аппарата и отношение

интенсивностей двух этих компонентов замедленной флуоресценции, $F_{мкс}/F_{мс}$ с течением времени не изменяется. Но, с повышением интенсивности облучения и увеличением количества неактивных центров с поврежденным белком D1, поток фотосинтетического транспорта электронов уменьшается, что должно вызывать повышение вероятности обратного потока от акцептора Q_B и интенсивности компоненты замедленной флуоресценции длительностью менее 200 мксек, в то время как миллисекундная компонента замедленной флуоресценции, относящаяся к обратному переносу от последующих участков цепи, должна ослабляться.

Эффект фотоингибирования более ярко проявляется во временном ходе отношения $F_{мкс}/F_{мс}$ при неблагоприятных температурах: на рис. 4. б и 4. в показаны данные, измеренные в листе хлопчатника при температурах 20⁰С и 42⁰С, соответственно. Причем, при 20⁰С подавление скорости фотосинтеза в хлопчатнике сильнее, чем при 42⁰С, что объясняет более резкое отклонение кривых временного хода $F_{мкс}/F_{мс}$ в данном случае.

Таким образом, кинетика квантового выхода фотохимии фотосистемы II при различных стрессовых условиях функционирования фотосинтезирующих систем и различные временные компоненты замедленной флуоресценции могут быть информативным инструментом для изучения природы и динамики фотоингибирования в растениях, а также процессов переноса электронов в системе транспорта электронов при фотоингибиторном повреждении его фотосинтетического аппарата. Данные параметры также могут служить для сравнительного изучения растений с различной способностью функционирования при высоких освещенностях, и неблагоприятных температурах.

Энергетическая связь между светособирающей антенной и реакционным центром в фотосинтетической мембране, определяющая эффективность захвата реакционным центром экситонов и, следовательно, фотосинтеза в целом, при приближении к критической температуре $t_c \sim 40^0\text{C}$, резко снижается, что вызывает соответствующее повышение «темновой» флуоресценции, F_0 . Условия роста и специфика генотипа растения отражаются в липид-белковом составе фотосинтетической мембраны,

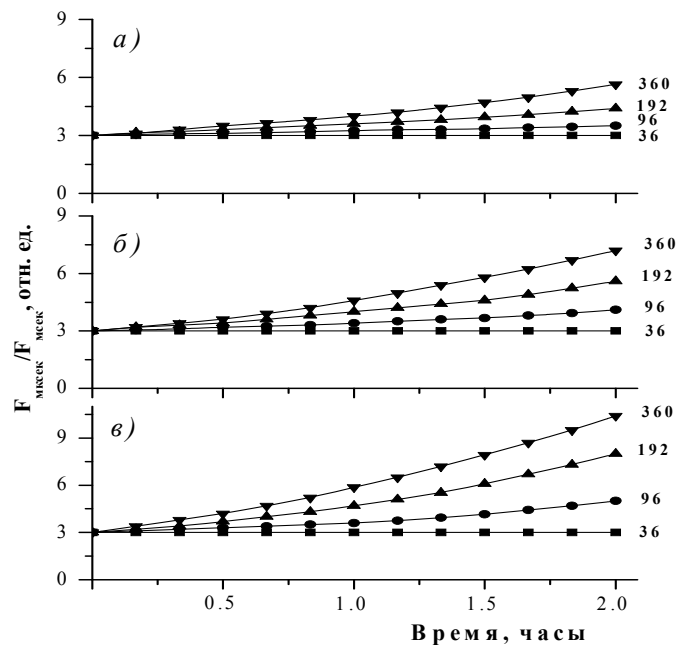


Рис. 4. Изменения отношения интенсивностей микросекундной (10 - 50 мкс) и миллисекундной (1 - 5 мс) компонент замедленной флуоресценции, $F_{мкс}/F_{мс}$, при различных интенсивностях облучения и температуры

которой, в свою очередь, определяет t_c . Учитывая данное обстоятельство, рассмотрена зависимость критической температуры от генотипа и температурного режима роста растения.

На рис. 5 показаны температурные зависимости F_0 , измеренные в образцах хлопчатника, выращенных при 15⁰С (а), 25⁰С (б) и 35⁰С (в), а также для сравнения, в шпинате (г) при освещенности 30 Вт/м².

Как видно из рисунка, в более теплолюбивом хлопчатнике t_c выше, чем в шпинате, причем рост хлопчатника при более высокой температуре обуславливает повышение t_c и крутизну подъема F_0 . Твердая система, каковой является мембрана при низких температурах, при достижении t_c резко смягчается, за счет чего увеличивается расстояние между хлорофилл-белковыми комплексами. Это, в свою очередь, резко снижает энергетическую (экситонную) связь между ними. Эти экспериментальные данные также свидетельствуют, что флуоресценция хлорофилла является информативным инструментом для контроля физико-химических свойств фотосинтетической мембраны и, в частности, изменений ее жесткости и структурной стабильности при тепловом воздействии.

Для лучшего понимания природы отклика фотосинтетического аппарата на засуху также были одновременно изучены флуоресценция хлорофилла и газообмен в растениях в полевых условиях. Результаты показали, что хлопчатник реагирует на наступление водного дефицита путем увеличения скорости фотодыхания для того, чтобы предотвратить чрезмерное накопление энергии светового возбуждения и, следовательно, образование синглетного кислорода и супероксидных радикалов.

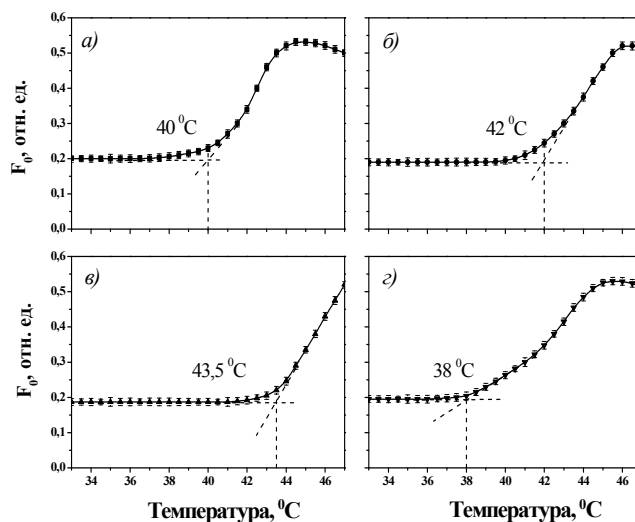


Рис. 5. Температурные зависимости темновой флуоресценции (F_0)

В пятой главе «Энергетика преобразования солнечного излучения в фотосинтезирующих системах» диссертации проанализированы абсолютные показатели энергопреобразования при фотосинтезе. Для установления «эффекта накопления» при воздействии водной недостаточности на растения нами измерена суточная динамика изменений квантовой эффективности фотохимии в фотосистеме II $\Phi_{\text{ФСII}}$, в двух образцах одного и того же растения: в контрольном и «стрессовом», выросшем при хроническом водном дефиците (рис. 6).

Минимальный уровень квантовой эффективности фотохимии в фотосистеме II $\Phi_{\text{ФСII}}$, определяемый соответствующим спадом активности

фотосистемы II при высокоинтенсивной освещенности в дневное время составил 0,43 в контрольном и 0,61 в «стрессовом» образцах. Как видно из рисунка, в «стрессовом» образце амплитуда спада ниже, чем в контрольном, что можно объяснить повышенным значением фотодыхания в дневное время в образце, адаптированном к водному дефициту. Следует обратить внимание на асимметрию суточных кривых квантовой эффективности фотохимии в фотосистемы II $\Phi_{\text{ФСII}}$: в «стрессовом» образце она заметно выше, чем в контрольном. На наш взгляд это связано с преобладанием медленных компонент восстановительного процесса при водном дефиците. Таким образом, суточные кривые изменений квантовой эффективности фотохимии в фотосистемы II $\Phi_{\text{ФСII}}$ дают информацию о масштабах и характере фотоингибирования под действием солнечной радиации в них.

Приведены результаты изучения энергетической эффективности фотосинтеза при воздействии различных внешних факторов. Исследованы долговременные светоиндуцированные изменения реакционной способности реакционного центра фотосистемы II, спад и восстановление активности этих реакционных центров, а также связанные с ними изменения флуоресценции хлорофилла. Временной ход фотоинактивации

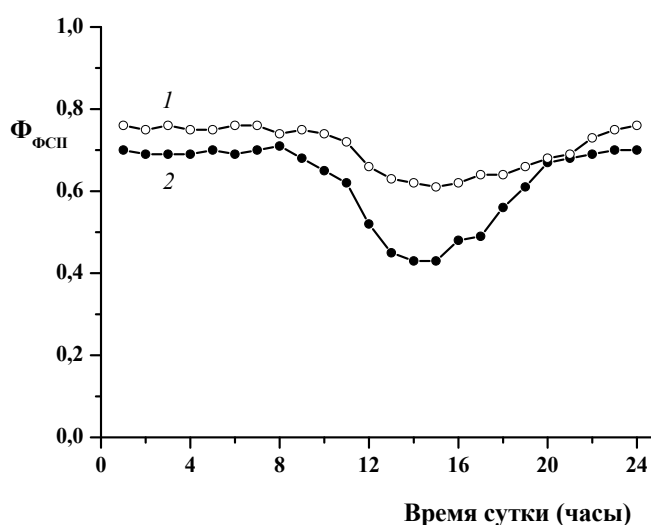


Рис. 6. Суточные кривые изменений квантовой эффективности фотохимии в фотосистемы II $\Phi_{\text{ФСII}}$. В «стрессовом» (1) и контрольном (2) образцах

реакционного центра фотосистемы II и восстановления их работоспособности в растениях, выращенных при низкой и высокой интенсивностях освещения изучен с помощью параметров флуоресценции. Проведено сравнительное изучение энергетических характеристик фотосинтезирующих бактерий и полупроводниковых фотовольтаических преобразователей солнечной энергии.

Из всей радиации солнца, сосредоточенной, в основном, в спектральной области 350нм - 1200нм, в растительном фотосинтезе усваивается ее часть на длинах волн до 700 нм, а в бактериальном фотосинтезе – также ИК излучение в области – до 1100 нм. Если растительный фотосинтез рассматривается с практической точки зрения как более важный механизм природного энергопреобразования, то высокие скорости круговорота биомассы в ареале обитания фотосинтезирующих бактерий и перспективная спектральная область энергопреобразования, несущая до 40% солнечной энергии, а также возможность модификации спектрально-энергетических характеристик таких

фототрофных организмов методами генной инженерии, указывают на большие возможности их применения в солнечной энергетике.

Приведены результаты исследования спектрально-энергетических характеристик совместимой группы фотосинтезирующих бактерий с различными полосами поглощения в ближней ИК области спектра: *Blc. Viridis*, *Rhodospirillum (R.) Rubrum*, *Rhodobacter (Rba.) Sphaeroides*, а также зелено-серной бактерии *Chloriobium Phaeobacteriodes* и цианобактерии *Synechocystis* дикого типа.

На рис. 7 показаны спектры поглощения выделенных фотосинтетических мембран диких типов указанных организмов в физиологическом растворе при низких концентрациях.

В рассматриваемых спектрах можно заметить общую закономерность: в коротковолновой части спектра сильное поглощение наблюдается в области ~ 350 - 550 нм, обусловленное полосой Соре основных фотосинтетических пигментов – бактериохлорофиллов и трехпиковой полосой дополнительных пигментов – каротиноидов. В длинноволновой же части, сильное поглощение вызывает только отдельно стоящая неширокая Q_V -полоса тех же бактериохлорофиллов. Причем, спектральное положение этой полосы, в зависимости от типа бактериохлорофилла и его белкового окружения в мембране, может изменяться от 720нм до 1020нм.

Таким образом, в качестве упрощенной модели можно принять, что спектры рассматриваемых фотосинтетических бактерий состоят только из двух полос поглощения: широкая коротковолновая полоса в области 350 - 550 нм и более узкая (~100нм) длинноволновая полоса, с максимумами в области 720 - 1020нм, в зависимости от образца.

На рис. 8 представлены сравнительные диаграммы энергетики светосбора солнечного излучения при бактериальном фотосинтезе и фотовольтаической ячейке на примере бактерии *Blc. Viridis* и кристаллического кремния, соответственно. Спектры поглощения мембран *Blc. Viridis* и кристаллического кремния (показаны слева, соответственно, от энергетических диаграмм), также как и солнечного излучения на поверхности Земли (в середине рисунка) представлены как зависимости от энергии квантов в эВ. В фотосинтезирующих мембранах *Blc. Viridis* энергия солнечного излучения в области ~1.1 – 3.5 эВ поглощается на разных длинах волн в различной степени и накапливается в полосе с длиной

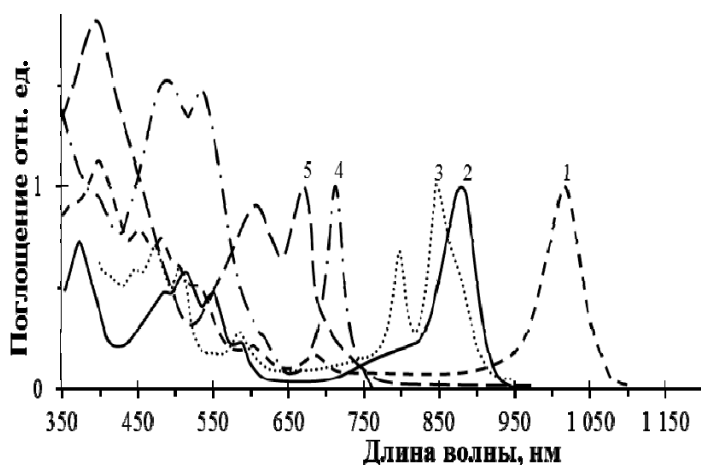


Рис. 7. Спектры поглощения фотосинтетических бактерий *Blc. Viridis* (1), *Rhodospirillum Rubrum* (2), *Rhodobacter Sphaeroides* (3), *Chloriobium Phaeobacteriodes* (4) и *Synechocystis* (5)

волны при 1020 нм: кванты света с различной энергией, частично теряя свою энергию, за очень короткое время ($\sim 10^{-12}$ сек) переходят на самый низкий возбужденный энергетический уровень бактериохлорофилла *b*, соответствующий Q_y -полосе, откуда эта энергия передается в РЦ для запуска фотохимических реакций. Такая же, по сути, картина имеет место и в кристалле кремния. Кванты света с энергией, превышающей энергию запрещенной зоны, т.е. с длинами волн короче критического, могут выбить электроны из валентной зоны в зону проводимости. При этом энергия электронов будет различной, в зависимости от энергии квантов, вызвавших такой «внутренний фотоэффект». Но эти электроны за очень короткое время релаксируют до энергетического дна валентной зоны, из которого они инициируют фотоэлектрический эффект.

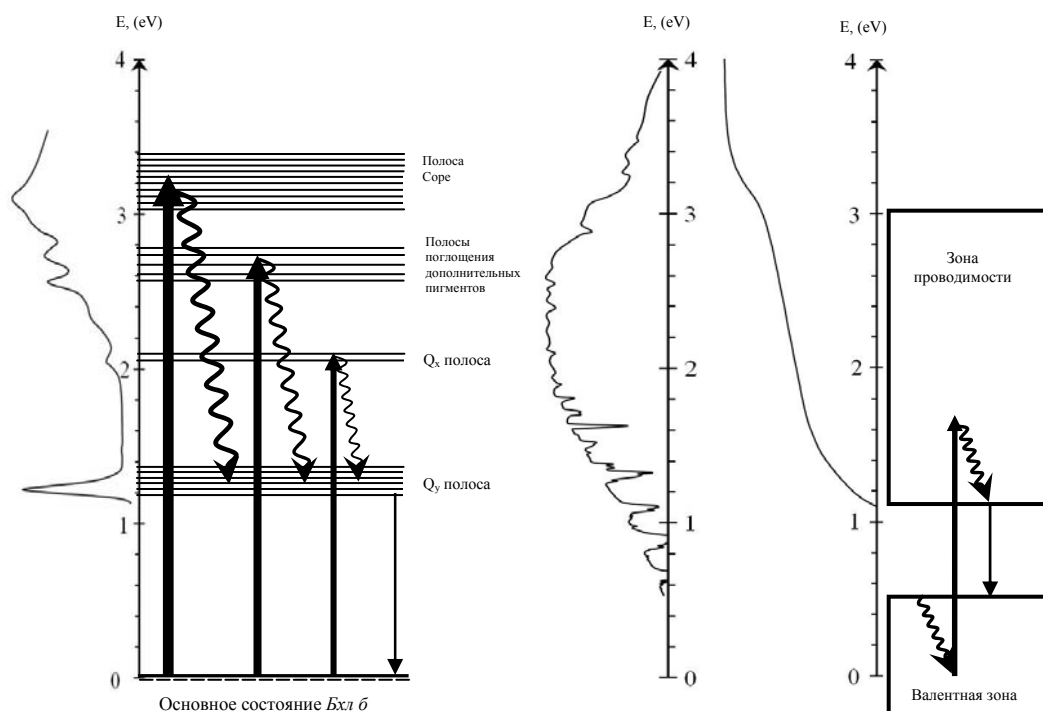


Рис. 8. Сравнительная энергетика процессов преобразования солнечного излучения в фотосинтетической бактерии *Blactochloris Viridis* и кремниевой фотовольтаической ячейки

Несмотря на высокие уровни квантовой эффективности в обоих рассматриваемых процессах, из-за потери значительной части энергии квантов при релаксации энергии до самого низшего возбужденного состояния бактериохлорофилл *b* в светособирающей антенне *Blactochloris Viridis* или при релаксации электронов до дна зоны проводимости в кристаллическом кремнии, энергетическая эффективность светосбора в обеих системах является достаточно невысокой.

Для достижения более высоких уровней энергетической эффективности в полупроводниковых фотовольтаических ячейках одновременно создают несколько переходов из различных материалов с разными энергиями запрещенной зоны. Такая же схема может использоваться и в фотосинтетических преобразователях солнечной энергии.

Для качественной оценки энергетической эффективности фотосинтетического преобразования солнечной энергии, в упрощенном рассмотрении равномерного распределения последней по спектру, можно считать, что доля энергии в определенной спектральной области пропорциональна ее ширине. Тогда доля излучения, поглощенная в *Blactochloris Viridis* в области 350 – 550 нм будет определяться отношением $(550 - 350 \text{ нм}) / (1200 - 350 \text{ нм}) = 0.24$. При светосборе энергия квантов уменьшается от 3.54 эВ – 2.26 эВ (в среднем 2.9 эВ) до 1.22 эВ и, следовательно, эффективность перевода энергии такого коротковолнового излучения на длинноволновую Q_y -полосу, в среднем, составит 0.42. А светосбор излучения, поглощенного на этой же полосе с относительной долей $80 \text{ нм} / (1200 - 350 \text{ нм}) = 0.095$ имеет энергетическую эффективность, равной 1.0, т.к. кванты при этом не теряют энергию. В итоге, общий светосбор в светособирающей антенны *Blactochloris Viridis* можно характеризовать энергетической эффективностью $0.24 \times 0.42 + 0.095 \times 1.0 \approx 0.20$.

Проведенные расчеты для остальных типов фотосинтетических бактерий показали следующие значения энергетической эффективности. В *R. Rubrum* общая энергетическая эффективность светосбора составляет 0.19, в *Rba. Sphaeroides* 0.26, в *Chloriobium Phaeobacteriodes* 0.19 и в цианобактерии *Synechocystis* суммарная эффективность светосбора солнечного излучения составляет 0.14.

В изученных бактериях, фотосинтез, инициируемый солнечным излучением на различных длинах волн, имеет энергетическую эффективность на уровне ~ 0.20 . Но, при совместном действии нескольких таких фотосинтезирующих организмов, эта эффективность может подняться выше 0.50. Дальнейшее повышение этой эффективности возможно за счет оптимизации спектров поглощения и комбинации применяемых фотосинтезирующих бактерий. Одновременное действие различных фотосинтезирующих бактерий возможно с учетом их физиологической совместимости. При выполнении указанных условий фотосинтезирующие бактерии могут быть основой для создания биологических преобразователей солнечной энергии.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Показано, что спектрально-кинетические параметры флуоресценции хлорофилла позволяют количественно характеризовать поглощение и миграцию световой энергии в светособирающей антенне, а также разделение и перенос зарядов в реакционном центре фотосинтеза.
2. Впервые экспериментально показано, что быстрая флуоресценция хлорофилла, связанная с переизлучением света непосредственно в антенне, является интегральным показателем эффективности фотосинтеза, тогда как замедленная флуоресценция, вызванная

- обратным переносом электронов - дифференциальным индикатором эффективности на различных участках реакционного центра.
3. Закономерности миграции светового возбуждения (экситонов) в антенне и его захвата реакционным центром можно устанавливать по переменной флуоресценции, измеряемой методом импульсно-амплитудной модуляции.
 4. Впервые созданы экспериментальные установки и разработаны методики для изучения процессов обратного переноса зарядов в реакционном центре фотосинтеза по различным компонентам замедленной флуоресценции с длительностями от наносекунд до сотен миллисекунд.
 5. Показана возможность количественной характеристики одновременного действия фотоинактивации и фотозащиты с помощью параметров флуоресценции: выведены аналитические выражения описывающих изменения количества функциональных реакционных центров с помощью уравнения баланса фотоинактивации и фотозащиты.
 6. Впервые экспериментально показана возможность определения скорости транспорта электронов в различных участках фотохимического реакционного центра при стрессовых условиях с помощью различных временных компонентов замедленной флуоресценции.
 7. Предложен простой спектральный метод определения степени окисления молекул бактериохлорофилла *b* в растворе по отношению интенсивности максимума флуоресценции.
 8. Впервые экспериментально показано, что в зависимости от молекулярного окружения, полосы поглощения хлорофиллов, бактериохлорофиллов и ряда их производных могут существенно изменяться, что открывает новые перспективы для этих соединений в качестве фотосенсибилизаторов ближнего ИК-диапазона.
 9. Установлено, что модификация функциональной структуры фотосинтетического аппарата *Blactochloris Viridis* методами генной инженерии приводит к качественным изменениям в энергетике фотосинтеза, отражающихся в спектрах поглощения и флуоресценции. Предложен новый тип энергопреобразующего устройства на основе группы фотосинтезирующих бактерий с суммарной энергетической эффективностью более 50%.

**SCIENTIFIC COUNCIL ON AWARD OF SCIENTIFIC DEGREE OF
DOCTOR OF SCIENCES 16.07.2013.FM/T.12.01 at PHYSICAL-
TECHNICAL INSTITUTE OF SCIENTIFIC-PRODUCTION
ASSOCIATION «PHYSICS-SUN», INSTITUTE OF ION-PLASMA AND
LASER TECHNOLOGIES AND SAMARKAND STATE UNIVERSITY**

INSTITUTE OF ION-PLASMA AND LASER TECHNOLOGIES

NEMATOV SHERZOD QALANDAROVICH

**SPECTRAL AND KINETIC CHARACTERISTICS OF CHLOROPHYLL
FLUORESCENCE IN PHOTOSYNTHETIC SYSTEMS**

01.04.05- Optics (physics and mathematics sciences)

ABSTRACT OF DOCTORAL DISSERTATION

Tashkent – 2015 year

The subject of doctoral dissertation is registered at Supreme Attestation Commission at the Cabinet of Ministers of the Republic of Uzbekistan under number 12.05.2015/B2015.1.FM198

The doctoral dissertation has been carried out at the Institute of Ion-plasma and laser technologies of Uzbekistan Academy of Sciences.

The abstract of the dissertation in three languages (Uzbek, Russian, English) has been posted on the website at (www.fti-kengash.uz) and on Information-educational portal "Ziyonet" at (www.ziyonet.uz).

Scientific consultant:	Zakhidov Erkin Agzamovich doctor of physical and mathematical sciences, professor
Official opponents:	Bakhramov Sagdulla Abdullaevich doctor of physical and mathematical sciences, professor Jumabayev Abduvoxid Jumabayevich doctor of physical and mathematical sciences, professor Yusupov Djavdat Bakidjanovich doctor of physical and mathematical sciences
Leading organization:	National University of Uzbekistan

The defense will take place on «__» _____ 2015 at ____ o'clock at the meeting of scientific council 16.07.2013.FM/T.12.01 at the Physical Technical Institute, Institute of Ion-Plasma and Laser Technologies and Samarkand State University (adress: 2B Bodomzor street, Tashkent, 100084, Uzbekistan, phone/fax: (+99871) 235-42-91, e-mail: lutp@uzsci.net).

The doctoral dissertation can be looked through at the Information Resource Centre of the Physical and Technical Institute (registration No ____) (2B Bodomzor street, Tashkent, 100084, Uzbekistan. Phone: (+99871) 235-30-41).

The abstract of dissertation is sent out on «__» _____ 2015.
(mailing report № _____ dated on _____ 2015).

S.L. Lutpullayev

Chairman of the Scientific council on award of scientific degree of doctor of sciences d.ph-m.s., professor

A.V. Karimov

Scientific secretary of the Scientific Council on award of scientific degree of doctor of sciences d.ph-m.s., professor

I.G. Atabayev

Chairman of the Scientific seminar under Scientific council on award of scientific degree of doctor of sciences d.ph-m.s., professor

Introduction (Annotation of doctoral dissertation)

Topicality and relevance of the subject of dissertation. The problem of creating a new generation of energy sources, apparently, will be one of greatest challenges facing humanity in the XXIst century. «Rapid growth of the world population and steady increase of energy consumption per capita indicate that by mid this century, energy production is expected to increase from the current ~ 15 TW up to ~ 40 TW»¹. Currently, most of the primary energy sources used around the world is based on non-renewable and limited resources. In addition, these non-renewable sources relate to fossil fuels (coal, oil, gas), the use of which causes environmental pollution, adversely affecting the health and quality of life, both at regional and global levels. In order to solve this problem effectively, while maintaining a rising living standards of people, more intensive use of new renewable energy sources plays a key role.

Also in nature occurs global transformation and accumulation of solar energy, which subsequently is spent to sustain life in all living beings. Photosynthesis is a complex of physical and chemical processes that converts the light energy into the chemical energy of special biomolecules. The analysis shows that in creating artificial photosynthesis, researchers are facing problems that still remain unsolved, including those related to efficient physical mechanisms and optimal structural schemes. Despite this, significant progress has been achieved in the creation of various model systems of artificial photosynthesis. The Toshiba company has recently introduced its version of the model of artificial photosynthesis, which has a record to date with an efficiency of 1.5%.

At the same time, the study of the physical nature of fluorescence of photosynthetic systems, conversion efficiency of energy in them, possibility of use of fluorescent indicators as a tool for monitoring the growth and development of plants, as well as new ways of solving the problems of power engineering which are currently extremely relevant at the global level serve as the basis for creating scientific principles of artificial photosynthesis that can serve as new sources of alternative energy and substantiates the topicality of the scientific research.

The variability of nature, lack of minerals as well as specific physiological peculiarities of plants can significantly reduce the efficiency of photosynthesis. The identify of the nature of such influences and development of rapid, non-destructive methods for assessing the photosynthetic activity of various agricultural crops under the abovementioned unfavourable conditions require their improvement on the basis of the achievements of modern physics, as well as the creation and implementation of new and advanced scientific research and technologies are an important scientific and practical task and conditioned the relevance of the dissertation topic.

¹ Criswell D. R. Energy Prosperity within the 21st Century and Beyond: Options and the Unique Roles of the Sun and the Moon, innovative solutions to CO₂ stabilization, Watts R. Ed. // Cambridge: Cambridge Un. Press, 2002. – 68 p.

Conformity of the research with the main priorities of development of science and technologies in the country. The research work has been carried out in accordance with the priorities of development of science and technologies in the Republic: 2 – “Power engineering, energy and resource saving” and 3 – “Development and use of renewable energy sources”.

Review of international scientific researches on theme of the dissertation. Significant results on the study of the nature of photosynthetic conversion of light, effects of structural features and external stress factors on the efficiency of photosynthesis in plants and photosynthetic bacteria as well as ways of creating artificial photosynthesis that ensure efficient conversion of light in natural photosynthesis were received at Osaka University (Japan), Chicago University (USA), Max Planck Biochemical University (Germany), Zurich Polytechnic University (Switzerland), Queen Mary University of London (England), National Research Centre of Italy and Moscow State University named after M.V. Lomonosov (Russia).

To the direction of research of dissertation at the global level have been solved some current problems and the following important scientific results were obtained: with the use of fluorescence-spectroscopic methods structural and functional characteristics, energy engineering and primary processes of photosynthesis of plants, quantum and energy efficiency of photosynthetic systems were studied Zurich Polytechnic University (Switzerland) and Moscow State University named after M.V. Lomonosov (Russia), to increase the index of efficiency of photosynthesis, artificial photosynthesis systems were created using the most optimal composite pigments in a Osaka University (Japan) and Mare University of London (England).

Currently, carried out scientific research works on topical areas as the study of physical mechanisms of photosynthesis, their relationship with chlorophyll fluorescence, temporary and energy properties of photochemical processes in photosynthetic organisms in general, or in a variety of preparations extracted from them, as well as the creation of fast and efficient methods of monitoring the impact of external stress factors.

Degree of study of the problem. The unique ability of photosynthetic systems to convert a wide range of photosynthetically active radiation of the sunlight into the energy of biomolecules, the physical mechanisms that ensure high efficiency of this transformation, as well as various stages of primary processes of photosynthesis characterized by from hundreds of femtoseconds at times to tens of milliseconds offer the utmost interest to scientists of different specialties.

Academician of the Academy of Sciences of Russia A.B. Rubin studied various stages of photosynthesis and revealed their physical and chemical mechanisms. In this sphere, a number of important scientific researches were carried out, in 1961 M. Calvin established the sequence of “dark” reactions of photosynthesis and in 1988 I. Deisenhofer, H. Michel and R. Huber discovered the molecular structure of photosynthetic reaction centre. In the practical application of fluorescence methods to monitor photosynthetic activity of plants, a significant role played the fluorometer of impulse-amplitude modulation of radiation (IAM-

fluorometer) invented by U. Schreiber and plant efficiency analyzer (PEA-analyzer) invented by R. Strasser that allowed “to bring out” laboratory measurements of photosynthesis “in the open field” and carry out natural experiments in natural conditions.

In Uzbekistan, in the laboratory "Physics of Condensed Matter" of the Institute of Ion-plasma and laser technologies, led by prof. Zakhidov E.A. carried out on a comprehensive study of the fluorescence-spectroscopic properties of natural photosynthetic organisms (higher plants and photosynthetic bacteria). As a result of these studies was developed and implemented in practice the fluorescence method for the rapid and effective monitoring of plant response to various external influences. Currently, employees of the laboratory offered the principles of artificial energy conversion devices based on natural pigments of photosynthesis.

Application of modern physical methods of electronic microscopy, ultrafast laser spectroscopy, absorption and fluorescence studies as well as biochemical methods for the separation of various structural and functional units of photosynthesis allowed achieving significant successes in understanding the mechanisms of various processes of photosynthesis of plants and bacterial photosynthesis. But, despite this, until now a number of fundamental issues in this area remain open. Some of these problems relate to the efficiency of photosynthetic conversion of light in stress conditions. In prolonged high intensity illumination, in water deficiency and unfavourable temperatures the rate of photosynthesis is significantly suppressed and the degradation of the photosynthetic apparatus occurs.

Today, in different countries, in order to reproduce the natural process of photosynthesis in a simplified and more efficient to create a system of artificial photosynthesis is not carried out sufficient research.

Connection of the topic of dissertation with the scientific works of scientific research organizations where the dissertation was carried out. Research work was carried out in the framework of following research projects of the institute of Ion-plasma and laser technologies: №ZB2-2003 (CRDF) “Development of fluorescent methods for studying photosynthetic systems and evaluation of efficiency of their functioning” (2004-2005) and “Uzbekistan - Korea 2008”, “Study of the processes of heat dissipation of light energy in the photosynthetic apparatus of plants by photo-acoustic methods” (2008-2011), №F2-FA-F147 “Study of the physical mechanisms of high-efficiency conversion of solar energy in primary processes of photosynthesis” (2012-2016) and №FA-A4-F047 “Development of fluorescence techniques and instrumental means of monitoring the efficiency of photosynthesis in agricultural crops” (2015-2017).

The purpose of the research is developing the physical bases and defining the optimal parameters of fluorescence monitoring and effectiveness of photosynthetic solar energy conversion using spectral-kinetic characteristics of fluorescence of chlorophyll in plants and photosynthetic bacteria.

To achieve the goal formulated the following **tasks of the research**:

creation of experimental facilities and methods for studying the fluorescence of chlorophyll in photosynthetic systems with continuous excitation, impulse

excitation with high temporal resolution as well as “double” excitation, simultaneously with weak continuous and strong impulse radiation;

development of methods for studying the kinetics of fluorescence induction of photosynthetic systems, as well as measuring the parameters of induction to determine the activity and efficiency of initial processes of photosynthesis in photosynthetic organisms;

application of monitoring systems to the photosynthetic activity of plants in the “field” conditions by the method of pulse-amplitude modulation, including its daily variations;

study the fluorescence of bacteriochlorophyll in photosynthetic bacteria with a genetically modified structure of the photosynthetic apparatus to establish the relationship between the parameters of fluorescence and structural features in them;

identify the mutual relationship “structure-energy-functioning” in photosynthesis with the help of absorption-fluorescence characteristics of photosynthetic systems at room and cryogenic temperatures;

investigate the spectral-kinetic characteristics of fast and delayed fluorescence of photosynthetic organisms at the influence of extreme temperatures and high-intensity illumination and develop on its basis the methods for assessing the impact of such stresses;

study the physical nature and fast kinetics of the process of charge transfer at the electron transport chain of the reaction centre by means of delayed fluorescence of nano-, micro- and millisecond duration;

estimation of the energy conversion efficiency of solar energy in multicomponent cells with different photosynthetic bacteria, taking into account the individual spectra of their solar radiation absorption.

The objects of the research are leaves of high plants (local species of cotton, spinach), whole samples of photosynthetic bacteria and functional subunits separated from them (photosynthetic membranes, light-harvesting antenna, reaction centre) as well as monomer (dissolved in organic solutions) photosynthetic pigments - chlorophylls and bacteriochlorophylls.

The subject of the research are physical and chemical processes of absorption and migration of light energy in the light-harvesting antenna, charge separation and transfer in the reaction centre of photosynthetic organisms in favourable environments and under the influence of various stress-factors.

The methods of the research. The methods of adsorption and fluorescence spectroscopy, including the one with high temporal resolution have been used in the dissertation with the help of an impulse laser Nd: YAG (532 nm, 100 ps) and a nitrogen laser (337 nm, 7 ns). High sensitivity in measuring various components of fast and delayed fluorescence was achieved by using the method of strobe-integration of short impulses with an impulse-periodic excitation with a high periodic rate (10 kHz). Monitoring the photosynthetic activity of plants in field conditions was held using a pulse-amplitude modulation fluorometer.

The scientific novelty of the research consists of the following:

scientific bases of registration methods of fluorescence parameters of

photosynthetic systems in *in vitro* and *in vivo* conditions have been created that allow to identify the physical nature (absorption and migration of light energy in the light-harvesting antenna, charge separation and transport in the reaction centre) of the primary processes of photosynthesis;

new methods of monitoring the efficiency of photosynthesis have been developed by the spectral and kinetic characteristics of fast and slow fluorescence of photosynthetic organisms under the influence of different stress factors;

for the first time the temporal characteristics and speed of electron transport in different parts of the electron transport chain in the reaction centre of photosystem II by the parameters of delayed fluorescence and induction kinetics of fast fluorescence have been experimentally determined;

it has been proved that the dark fluorescence of plant leaves may be an indicator of integration of the light-harvesting antenna and reaction centre in the photosynthetic membrane, and the destruction of such integration results in an increase of the intensity of such fluorescence;

the migration regularities of energy of light excitation in the light-harvesting antenna and its capture in the reaction centre with two physical models (“lake” and “pools”) of the structure of the photosynthetic apparatus have been identified;

it has been experimentally substantiated that the chlorophylls, bacteriochlorophylls and a number of their derivatives are promising compounds as photosensitizers operating close to the infrared range. It has been identified that, depending on the molecular environment, the absorption and fluorescence spectra of these compounds can undergo significant changes;

for the first time the scientific bases of energy conversion devices based on a group of photosynthetic bacteria with energy efficiency of over 50% in total by analogy with multijunction photovoltaic semiconductor devices have been developed.

Practical results of the research. Methods have been developed and instrument means have been proposed for determining the photosynthetic activity of plants and photosynthetic bacteria that can be used for monitoring the growth and development of various agricultural crops, and also for evaluating the impact of unfavourable environmental conditions on them. The proposed system of a group of purple photosynthetic bacteria, absorbing in different parts of visible and close to the infrared spectrum can be used as a highly efficient converter of broad band radiation of sunlight.

Reliability of the research results is substantiated by the application of modern methods and approaches of optics and laser physics for researching such specific objects as photosynthetic organisms. Experimental conditions have been carefully analysed, modern instrumentation with high precision has been used, and experimental results have been carefully processed. The findings have been based on the basic provisions of theoretical works devoted to the study of physical mechanisms of primary processes of photosynthesis, and are fully in conformity with the results of other authors.

Scientific and practical values of the research results. The scientific significance of the research results of this dissertation is to develop the concept of

a fluorescent control of primary processes of photosynthesis in photosynthetic organisms and a theoretical analysis of the energy migration of light excitation in a heterogeneous light-harvesting antenna and redistribution of energy in its various subunits depending on the speed of direct and reverse excitation transfer between them.

The practical values of the research results are as follows, the proposed scientific and technological solutions can be the basis for creating practical, working methods of fluorescence monitoring of agricultural crops for the quantitative determination of photosynthetic activity in plants and assessment of the impact of unfavourable environmental conditions on plants and for the development of advanced energy conversion devices from the group of photosynthetic bacteria with different absorption bands, which in sum covering the greater part of the solar spectrum.

Application of the research results. According to the researches, a fluorescence method has been developed, which was applied in agricultural practices, particularly, for determining the fluorescence parameters of 8 genotypes of cotton leaves that were created by a gene knock-out method at Genomics and Bioinformatics Centre (2013-2014). The obtained results show that the efficiency of photosynthesis in the genotypes of cotton created by the methods of gene knock-out is 25-30% higher than in the control varieties and suggest new features for monitoring fluorescence to quantify the growth and development of agricultural plants: during the full growing season, they made it possible to measure at least 5-6 times with a 10-fold repetition on each sample of plants that qualitatively improved the reliability of results (there is a certificate of implementation dated 03.06.2015, of the National Centre for Cottonseed Production at the Ministry of Agriculture and Water Resources of Uzbekistan).

Approbation of the research results. The main results of the study have been approbated in a number of international conferences: “17-th International Symposium on semiconductors and applied physics” ISPSA-2014 (Jeju, Korea, 2014), Uzbek - Korean Symposiums (Seoul 2007, 2011 and Tashkent 2010), international conferences on molecular spectroscopy (Samarkand 2009, 2013), scientific conferences of young scientists (Tashkent 2009, 2010, 2014), as well as seminars in the laboratory of “Condensed Matter Physics” and at the joint seminar of the Institute of Ion-Plasma and Laser Technologies.

Publication of the research results. The obtained results on the topic of the dissertation were stated in 28 scientific works, 10 of them are scientific articles, including 3 in international journals, 18 theses were published in the proceedings of international and national conferences.

Volume and structure of the dissertation. The dissertation consists of an introduction, five chapters, a conclusion, a list of used references, 192 pages of main text, 51 figures and 2 tables.

THE MAIN CONTENTS OF THE DISSERTATION

In the **introduction** the topicality and relevance of the dissertational subject have been justified, the conformity of the research with priority directions of scientific and technological development in the republic have been defined, presented an review of international scientific researches on theme of the dissertation, degree of study of the problem, the purpose and tasks, the object, subject and methods of investigation have been formulated, the scientific novelty of the research has been stated, the reliability of the obtained results has been proved, their theoretical and practical values have been revealed, short information about the implementation of the results and approbation of the work as well as about the volume and structure of the dissertation have been given.

In the first chapter “**Fluorescence spectroscopy of the processes of conversion of light energy in photosynthetic systems**” of the dissertation the literature data on the study of the properties of fluorescence of chlorophyll/bacteriochlorophyll are analyzed: formation and relaxation of excited electronic states in single molecules, the effect of clustering of these molecules in the photosynthetic membrane in processes of light absorption, migration of light excitation in the form of excitons in these molecules in light-harvesting antennas and capture of excitation in the photochemical reaction centre; processes of charge separation and transfer in the reaction centre. Structural and functional organization of the photosynthetic apparatus, changes in the characteristics of its fluorescence have also been considered under the influence of various stresses. It has been concluded that the study of duration and quantum yield of the fluorescence, as well as the main characteristics of delayed fluorescence in various pigment-protein complexes of photosynthesis indicate that the fluorescence of chlorophyll may be an informative tool for identifying the efficiency of photosynthesis depending on the structural and functional properties of the photosynthetic apparatus of plants and photosynthetic bacteria.

In the second chapter of the dissertation are presented “**Methods and experimental setups for studying the fluorescence of photosynthetic systems**”. Describes the experimental methods and techniques developed in the framework of the current dissertation in order to study the spectral-kinetic and energy characteristics of fluorescence of photosynthetic systems. Depending on the planned tasks different schemes of excitation and registration systems of fast fluorescence as well as various temporal components of delayed fluorescence were applied. Based on this, experimental setups were developed in which, as a source of fluorescence excitation, continuous and/or impulse-periodic lasers, LEDs, incandescent lamps were used.

In order to study the photosynthetic processes in the leaves of plants in daylight in natural conditions, for their growth and development (in the field conditions) an instrument was applied based on the use of two light sources - weak continuous radiation and strong radiation in the form of repetitive impulses (pulse-amplitude modulation), which allowed to measure the quantitative characteristics of photosynthetic processes in conditions of high intensity daylight.

The pulse-amplitude modulation fluorometer is characterized by the following spectral-temporal and power parameters (Fig. 1): the fluorescence is excited by short impulses of light emitting diode with a duration of $\sim 3 \mu\text{s}$ and repetition frequency up to 20 kHz; this light passes through a short-wavelength filter ($\lambda < 670 \text{ nm}$), and in front of the photo-detector a long-wavelength filter is placed ($\lambda > 700 \text{ nm}$), which prevents it from hitting of the excitation impulses. A high-selective impulse amplification system ignores all signals except the fluorescence excited by $\sim 3 \mu\text{s}$ -impulses. A PIN-photodiode is used as a photo-detector. Such parameters are measured as initial fluorescence, F_0 , maximum quantum yield of photochemistry in photosystem II (PSII), F_{PSII} , and photochemical (q_P) and non-photochemical (q_N) quenching. The intensity of measuring light was $\sim 1,2 \text{ W/m}^2$, acting light $24 - 48 \text{ W/m}^2$, and saturating light impulses up to 600 W/m^2 . Saturating impulse with duration of up to 1 s hits in every $\sim 20 \text{ s}$.

In order to initiate the photoinhibition, on the leaf of the test plant, radiation of photosynthetically active radiation in the spectral range of 400-700 nm and with an intensity of 480 W/m^2 was supplied by means of a fibre bundle from a separate source (point light).

The measuring unit of the system is extremely resistant to extreme changes in lighting (up to the quantity of flow exceeding the daylight), even at extremely low intensities of the measuring light. This is especially important for determining the quantum yield of photochemistry in photosystem II - F_{PSII} and primary and maximum values of fluorescence.

For our initial experiments the laboratory version of the pulse-amplitude modulation fluorometer was developed on the basis of laser radiation – the second harmonic of continuously pumped laser $\text{Nd}^{3+}:\text{YAG}$ with a dual modulation (532 nm, 400 ns, 10 kHz) and boxcarintegrator BCI-280 with temporal, energy parameters and sensitivity, superior matching performances of the pulse-amplitude modulation fluorometer that allowed to obtain more stable kinetic curve fluorescence induction of cotton leaves.

Developed by us the above-described technique of monitoring in field conditions has been applied for the comparative study of photosynthetic activity of different genotypes of cotton grown under the long-term water deficiency in the experimental field of the Institute of Genetics of the Academy of Sciences of Uzbekistan together with the specialists from the Federal Polytechnical University, ETH, Zurich, Switzerland (Dr. I. Fracheboud and Dr. J. Leipner) and the National

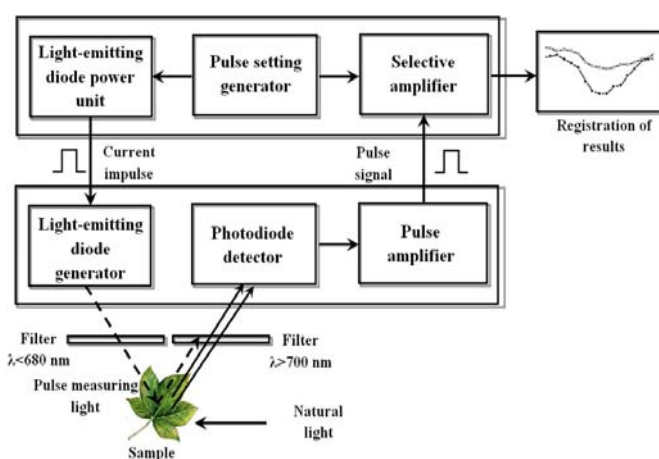


Fig. 1. Schematic view of the principle of measuring the fluorescence of pulse - amplitude modulation

Research Centre of Italy, CNC, Rome, Italy (Dr. A. Massachi). The analysis of slow changes of fluorescence is of significant importance when used the method of saturating impulses, which allows determining simultaneously the dynamics of changes of photochemical and non-photochemical quenching.

The metrics of illuminations has been described in investigating the photosynthetic systems in laboratory and natural conditions.

The third chapter **“Photosynthetic bacteria - model object for the study of physical mechanisms of photosynthetic energy transformation”** of the dissertation is devoted to the absorption and fluorescence studies of photosynthesized bacteria. By analyzing the absorption, fluorescence and fluorescence excitation spectra, the energetics of bacteriochlorophyll molecules was studied.

The comparative study of the absorption and fluorescence spectra of the long-wave infrared band of the bacteriochlorophyll in natural and in genetically modified samples of purple bacteria *Blactochloris Viridis* showed that the modification of functional structure of the photosynthetic apparatus of *Blactochloris Viridis* by methods of genetic engineering leads to qualitative changes in the energy of photosynthesis, which are reflected in the absorption and fluorescence spectra.

It is shown that the delayed fluorescence, caused by a backflow transfer of electrons in the reaction centre can be an informative tool for studying the kinetics and thermodynamics of slow steps of electron transfer. On the example of *Blactochloris Viridis* with a genetically modified reaction centre, the possibility of quantitative energy transfer of electrons in quinone acceptors was demonstrated in respect of the intensities of different temporal components of delayed fluorescence.

In order to achieve high stability and measurement accuracy not only the absolute intensities of various components of delayed fluorescence, but also their ratio have been measured. The ratio of the intensities of rapid fluorescence and *i*-temporal components of delayed fluorescence is defined as:

$$I_{FF} / I_{DF}^i = [(k_q^i \eta_{FF}) / (k_f)] \exp[G^i / (k_B T)], \quad (1)$$

where k_q^i - constant speed of the direct decay of *i*-radical pair, k_f - is a constant speed of fluorescence, η_{FF} - quantum efficiency of fast fluorescence. The ratio of *i*- and *j*-temporal components of delayed fluorescence:

$$I_{DF}^i / I_{DF}^j = (k_q^j / k_q^i) \exp[(G^j - G^i) / (k_B T)], \quad (2)$$

under the certain values of k_q^i and k_q^j allows to calculate the difference between the free energy of ($G^j - G^i$) radical pair, whose recombination causes these components.

Table 1 presents the measured values of intensity ratios of fast and slow components (I_{fast} and I_{slow}) of delayed fluorescence to its submillisecond component (I_{smsek}) in wild sample and hybrid *Blactochloris Viridis* grown in light, as well as the calculated value G_i of them. It is mentioned that in a hybrid that is grown in the dark, there was no delayed fluorescence. In hybrids grown in the light, submillisecond component had almost the same intensity as in the wild sample, and the ratio I_{fast}/I_{smsek} was more than two times less than in the wild

sample. The ratio of I_{slow}/I_{smsek} was similar in both samples. Such kind of regularity of delayed fluorescence was reflected in the values of G_i as presented in the table.

It is noted that the comparative study of the slow component of delayed fluorescence in the reaction centre of genetically modified photosynthetic bacteria allows to define the changes of energy in quinone acceptors and, respectively, in the kinetics of electron transfer.

Table 1.

The ratio of the intensities of the different temporal components of delayed fluorescence in wild and in hybrid samples of *Blactochloris Viridis*

The genotype of bacteria	I_{fast}/I_{smsek}	$G^I - G^A$	I_{slow}/I_{smsek}	$G^A - G^B$
Wild sample	$5,9 \cdot 10^{-4}$	534 meV	$1,18 \cdot 10^{-4}$	116 meV
Hybrid grown in the light	$3,5 \cdot 10^{-4}$	486 meV	$1,03 \cdot 10^{-4}$	112 meV
Hybrid grown in the dark	$< 10^{-7}$	-	$< 10^{-7}$	-

On the basis of the data on the structure of the light-harvesting antenna, absorption and fluorescence spectra as well as fluorescence induction kinetics of two kinds of purple photosynthetic bacteria - *Bls. Viridis* and *Rba. Sphaeroides*, the influence of structural features on the process of energy transfer in the light-harvesting antenna and the capture in the reaction center of photosynthetic membranes, providing limit values of efficiency of mastering the light energy has been studied.

In Fig. 2, the images of photosynthetic membranes of *Blc. Viridis* (a) and *Rba. Sphaeroides* (b) are presented which were obtained by means of an atomic force microscope (AFM) after the processing of the original image (inserted at top left corners) using a special software.

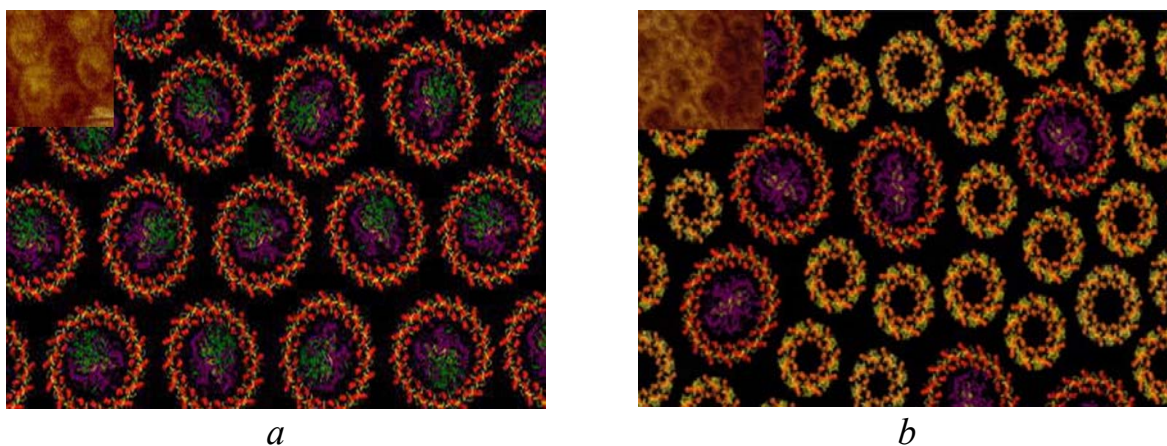


Fig. 2. Pictures of photosynthetic membrane of purple bacteria *Blc. Viridis* (a) and *Rba. Sphaeroides* (b) that is taken by means of AFM

Figures clearly show that if the *Bls. Viridis* photosynthetic membrane represents a densely packed, ordered structure of photosynthetic unit, then in *Rba. Sphaeroides*, the complexes of light-harvesting antenna 1-reaction centre take turns randomly distributed additional complexes of light-harvesting antenna 2 that strengthens the light-harvesting ability of the organism; wherein the ratio of the complexes of light-harvesting antenna 1-reaction centre and light-harvesting

antenna 2 depends on the conditions of growth of bacteria and can be varied in a wide range.

The spectral characteristics of considering photosynthetic bacteria confirm the basic positions that identified in the atomic force microscopy images. Fig. 3 shows the infrared absorption spectra and fluorescence according to Q_y -band of bacteriochlorophyll *a* and bacteriochlorophyll *b*, respectively in *Rba. Sphaeroides* and in *Blc. Viridis*.

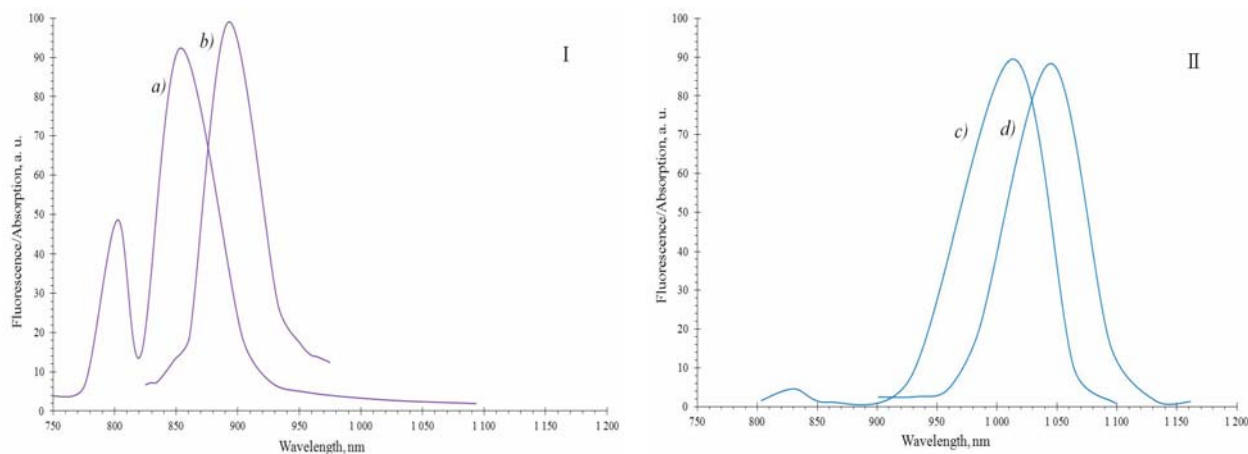


Fig. 3. IR absorption ("a" and "c") and fluorescence spectra of ("b" and "d") photosynthetic membranes of *Rba. Sphaeroides* (I) and *Blc. Viridis* (II)

The absorption and fluorescence spectra of *Blc. Viridis* consist of a single band in the bacteriochlorophyll *b* related to the subunit of light-harvesting antenna 1. In *Rba. Sphaeroides* the molecule of bacteriochlorophyll *a* in two antenna subunits, light-harvesting antenna 1 and light-harvesting antenna 2 have different spectral forms and, respectively, in absorption spectrum there are two peaks. However, the short-wave peak is weakly expressed in the fluorescence spectrum because of the rapid relaxation of the corresponding excitation.

The study of spectral-kinetic characteristics of the fluorescence provides opportunity to assess the effectiveness of light excitation transfer within and between the photosynthetic units in the photosynthetic membranes of purple bacteria.

This chapter shows that chlorophylls, bacteriochlorophylls and a number of their derivatives are promising compounds as photosensitizers processing in the long-wavelength range of the optical spectrum. These molecules also have high quantum yields of singlet oxygen excitation along with high light absorption of a long-wavelength absorption band, which is a criterion of applicability of any drugs in photodynamic therapy. On the example of a number of molecules of this group, it was substantiated that it is necessary to take into account the possible changes in absorption and fluorescence characteristics of molecules in their aggregation.

The fourth chapter “**Monitoring of stress effects in plants by the characteristics of chlorophyll fluorescence**” of the dissertation presents the results of experimental investigations of the light curve of electron transport rate in plant leaves in different environments by means of fast fluorescence as well as curve induction of millisecond components of delayed fluorescence. It is shown

that the simultaneous study of fast fluorescence and delayed fluorescence provides a wide range of information about the processes of electron transfer in the reaction centre of photosynthesis. If fast fluorescence quantitatively describes the electron transport rate in photosystem II in general, then delayed fluorescence is its differential characteristics that allow determining the efficiency of electron transfer in different parts of an electron transport chain.

This chapter also examined different temporal components of delayed fluorescence relating to the reverse transfer of various parts of the electron transport chain. Taking the above-mentioned into account, we have determined the temporal components of delayed fluorescence of millisecond (1-5ms) and microsecond (10 - 50 microseconds) duration according to the sequence of transfer processes, including and not including the inverse transfer of $Q_B - Q_A$ at different radiation intensities and at different temperatures of the leaf of cotton.

Fig. 4.a presents data at 25°C. A photoinhibitory damage of the photosynthetic apparatus was not yet observed in the value of photosynthetic-active radiation 36 W/m², and the intensity ratio of the two components of delayed fluorescence, F_{msec}/F_{msec} does not change over the time. However, with an increase of the radiation intensity and increase in number of inactive centres with a damaged protein D1, the flow of the photosynthetic electron transport reduces, which would cause an increase in the probability of backflow acceptor Q_B and intensity components of delayed fluorescence duration is less than 200 microseconds, while the millisecond component of delayed fluorescence related to the inverse shift from subsequent sections of the chain has to be weakened.

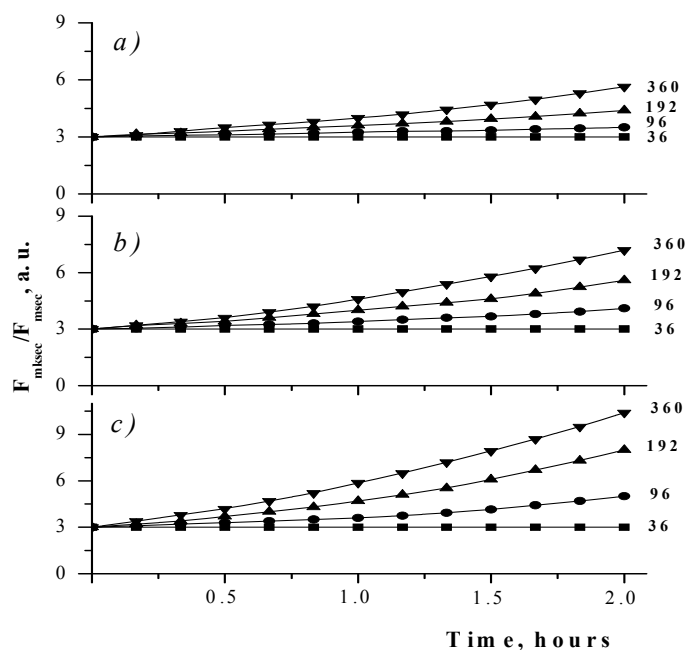


Fig. 4. Kinetics of the ratio between the intensities of the microsecond (10–50 μ s) and millisecond (1–5 ms) delayed fluorescence components ($F_{\mu s}/F_{ms}$) at different intensities of illumination and temperature

Interestingly, the effect of photoinhibition appears more obviously in the time course relations of F_{msec}/F_{msec} under the unfavourable temperatures: Fig. 4.b and 4.c show the data measured in a cotton leaf at temperatures 20°C and 42°C respectively. Here, the suppression rate of the photosynthesis in cotton is stronger at 20°C than at 42°C, which explains a sharp deviation in curves over the time course of F_{msec}/F_{msec} in this case.

Thus, the kinetics of the quantum yield of photochemistry of photosystem II under different stress conditions of functioning of photosynthetic systems and different temporal components of delayed fluorescence can be an informative tool

in order to study the nature and dynamics of photoinhibition in plants, as well as the processes of electron transport in the electron transport system in photoinhibition damage of its photosynthetic apparatus. These parameters can also be used for a comparative study of plants with varying functioning capability at high light and unfavourable temperatures.

The energetic connection between the light-harvesting antenna and reaction centre in the photosynthetic membrane, which determines the efficiency of capture by the reaction centre excitons and, consequently, by photosynthesis in general, when approaching to the critical temperature $t_c \sim 40^\circ\text{C}$ dramatically reduces, causing respective increase in the “dark” fluorescence, F_0 . The growth conditions and specifics of plant genotype are reflected in the lipid-protein composition of photosynthetic membranes, which, in turn, define t_c . Taking the current condition into account, the dependence of the critical temperature on the genotype and temperature regime of plant growth has been considered.

Fig. 5 shows the temperature dependence of F_0 , measured in samples of cotton that were grown at 15°C (a), 25°C (b), 35°C (c), and in spinach (d) for comparison under the illumination of 30 W/m^2 .

It can be seen from the figure that in heat-loving cotton, t_c is higher than in spinach, and the growth of cotton at a higher temperature causes an increase in t_c and in slope of rise F_0 . The solid system, which a membrane is like at low temperatures, by reaching t_c sharply mitigates, due to which the distance between chlorophyll-protein complexes increases. This consequently leads to a dramatic reduction of energetic (exciton) connection between them. These experimental data also indicate that the fluorescence of chlorophyll is an informative tool for the control of the physicochemical properties of photosynthetic membranes, and, in particular, changes of their rigidity and structural stability during thermal exposure.

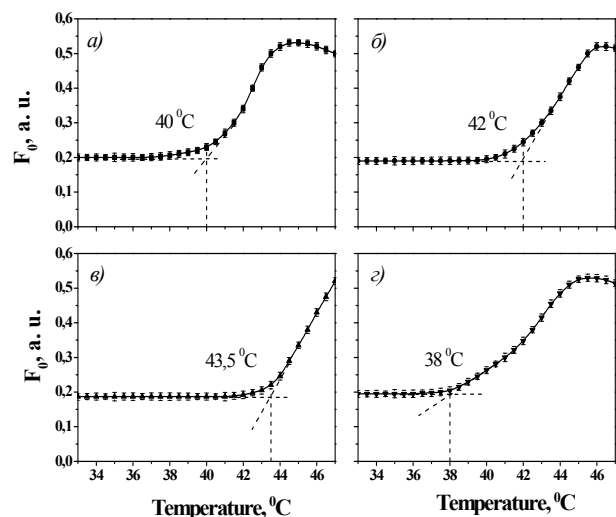


Fig. 5. Temperature dependence of dark fluorescence F_0

In order to better understand the nature of response of the photosynthetic apparatus to the drought, the fluorescence of chlorophyll and gas exchange in plants were simultaneously studied in field conditions. The results showed that the cotton plant reacts to the onset of water deficiency by increasing the rate of photorespiration in order to prevent excessive accumulation of excitation of light energy and consequently, formation of singlet oxygen and superoxide radicals.

In the fifth chapter “**Energetics of conversion of solar radiation in photosynthetic systems**” of dissertation the absolute rate of energy conversion in

photosynthesis has been analyzed. In order to establish the “accumulation effect” under the influence of water deficiency in plants, we measured the daily dynamics of changes of quantum efficiency of the photochemistry in photosystem II F_{PSII} , in two samples of the same plants: control and “stress”, that were grown under a chronic water deficiency (Fig. 6).

The minimum level of quantum efficiency of the photochemistry in photosystem II F_{PSII} , which is defined according to a decline in the activity of photosystem II under high-intensity light in the daytime, was 0.43 in the control and 0.61 in the “stress” samples. As the figure shows, in the “stress” sample the decrease amplitude is lower than in the control, which can be attributed to the increased value of photorespiration in the daytime in the sample that adapted to water deficiency. It needs to pay attention to the asymmetry of daily curve of quantum efficiency of the photochemistry in photosystem II F_{PSII} : in the “stress” sample, it is significantly higher than in the control sample. In our opinion this is due to the predominance of the slow component of the recovery process under the water deficiency.

Thus, the diurnal curve changes of F_{PSII} provide information on the scale and nature of photoinhibition under the influence of solar radiation in them.

The results of the study of energy efficiency of photosynthesis under the influence of various external factors have been presented. We investigated the long-term light-induced changes in reactivity of the reaction centre of photosystem II, decay and recovery activities of these

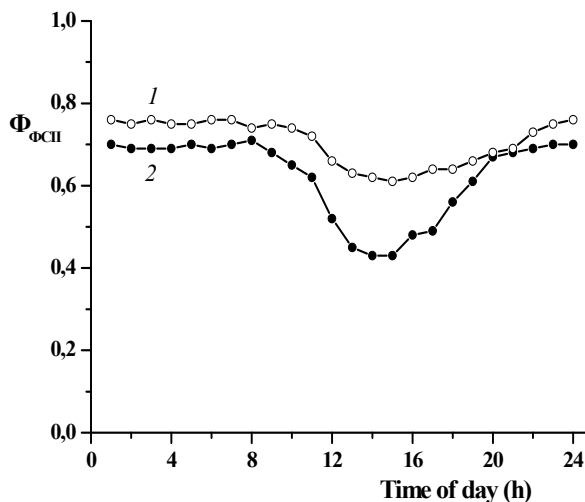


Fig. 6. Daily curve changes of quantum efficiency of photochemistry in photosystem II F_{PSII} in the «stress» (1) and control (2) samples

reaction centres, as well as related changes in fluorescence of chlorophyll. The time course of photoinactivation of the reaction centre photosystem II and restoration of their functionality in plants grown at low and high illumination intensities has been studied by means of fluorescence parameters.

The comparative study of the energy characteristics of photosynthetic bacteria and semiconductor photovoltaic converters of solar energy has been carried out.

Out of all solar radiation concentrated, mainly, in the spectral range of 350nm - 1200nm, a part of it is absorbed in plant photosynthesis at wavelengths up to 700 nm, and in bacterial photosynthesis - also IR radiation in the range of up to 1100 nm. If the plant photosynthesis is considered from a practical point of view as a more important mechanism of natural energy conversion, then a high speed of circulation of the biomass in the habitat of photosynthetic bacteria and promising area of spectral energy transformation carrying up to 40% of solar energy, as well

as the possibility of modification of spectral-energy characteristics of such phototrophic organisms by means of Genetic Engineering methods, show that there is a great possibility of their application in solar energy.

The results of researching the spectral energy characteristics of a consistent group of photosynthetic bacteria with different absorption bands in close periphery to the infrared region of the spectrum are presented: wild type of *Blc. Viridis*, *Rhodospirillum* (R.) *Rubrum*, *Rhodobacter* (Rba.) *Sphaeroides*, as well as green-sulphur bacteria *Chloriobium Phaeobacteriodes* and cyanobacteria *Synechocystis*.

Fig. 7 shows the absorbing spectra of the mentioned wild type photosynthetic membranes of specified organisms in low concentrations of physiological solution.

In the spectra being considered, there is a possibility to detect general regularity: in the short-wave part of the spectrum, there is a strong absorption at ~ 350 - 550 nm due to the Soret band of the main photosynthetic pigments – bacteriochlorophylls, and three-peak bandwidth of additional pigments – carotenoids.

In the long-wave part of the same spectrum, a strong absorption causes only a narrow freestanding Q_y -band of the same bacteriochlorophylls. Moreover, the spectral position of the band, depending on the type of bacteriochlorophyll and its protein environment in the membrane, might vary from 720nm to 1020nm.

Thus, as a simplified model it can be assumed that the spectra of the considered photosynthetic bacteria consist of only two absorption bands: a broad shortwave band in the region of 350 - 550 nm and a narrow (~ 100 nm) long-wavelength band with maximum at the region of 720 - 1020nm depending on the sample.

Fig. 8 shows the comparative energy diagrams of light-selection of solar radiation in bacterial photosynthesis and in the photovoltaic cell on the example of the bacteria *Blc. Viridis* and crystal silicon respectively. The absorption spectra of the membranes of *Blc. Viridis* and crystal silicon (shown on the left, respectively, from the energy diagrams), as well as the solar radiation at the earth's surface (in the middle of the figure) are shown as a function of the quantum energy in eV. In the photosynthetic membranes *Blc. Viridis*, the energy of solar radiation in the area of ~ 1.1 - 3.5 eV is absorbed at different wavelengths in different rates, and is accumulated in the band with a wavelength 1020 nm: light quanta with different energies, partly losing their energy in a very short time (~ 10^{-12} s) go to the lowest excited energy level in the bacteriochlorophyll *b* corresponding to Q_y -band, where the energy is transferred to the reaction centre in order to start photochemical

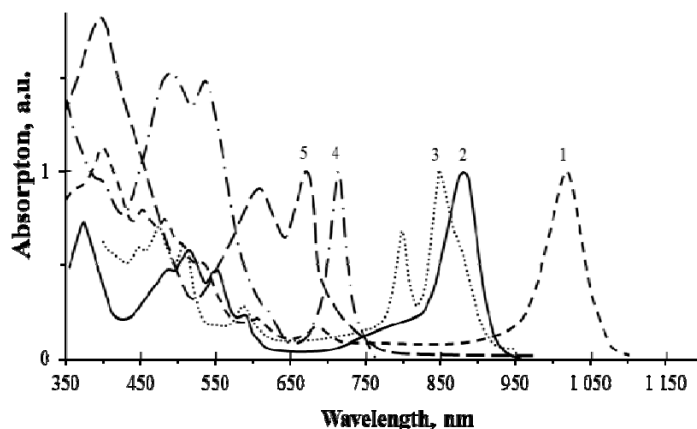


Fig. 7. Absorption spectra of photosynthetic bacteria *Blc. Viridis* (1), *Rhodospirillum Rubrum* (2), *Rhodobacter Sphaeroides* (3), *Chloriobium Phaeobacteriodes* (4) and *Synechocystis* (5)

reactions. In fact, it is similar in a silicon crystal either. Light quanta with energies exceeding the energy gap (between the valence band and the conduction band), i.e., with wavelengths shorter than the critical one, can kick out the electrons from the valence band to the conduction band. The energy of the electron will be different, depending on the quant energy that caused such “internal photoelectric effect”. But these electrons within a very short time relax to the bottom of energy of the valence band from which they initiate the photoelectric effect.

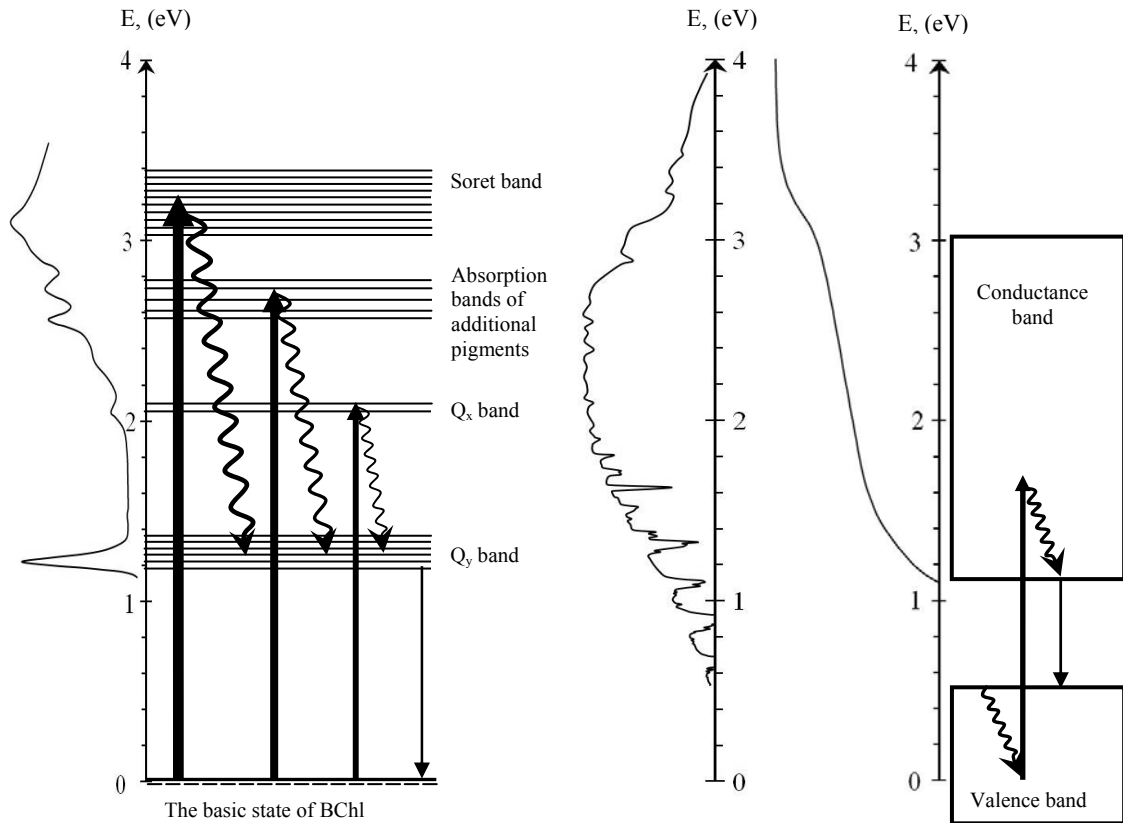


Fig. 8. Comparative energy conversion processes of solar radiation in the photosynthetic bacteria *Blc. Viridis* and in the silicon photovoltaic cell

Despite the high levels of quantum efficiency in both processes under consideration, due to loss of a significant part of the quant energy in the energy relaxation to the lowest excited state of the bacteriochlorophyll *b* in the light-harvesting antenna *Blc. Viridis* or relaxation of electrons to the conduction band in the crystal silicon, the energy efficiency of light collection in both systems is quite low.

In order to qualitatively estimate the energy efficiency of the photosynthetic conversion of solar energy in a simplified consideration of uniform distribution of the latter over the spectrum, it is possible to assume that the share of energy in a certain spectral region is proportional to its width. Then the fraction of radiation absorbed in *Blc. Viridis* in the range of 350 - 550 nm will be determined by the ratio of $(550 - 350 \text{ nm}) / (1200 - 350 \text{ nm}) = 0.24$. In light collection, quantum energy decreases from 3.54 eV - 2.26 eV (on average 2.9 eV) to 1.22 eV and, hence the efficiency of the energy transfer of short-wave radiation at longer wavelengths Q_y -band, on average, will be equal to 0.42. A light selecting radiation

absorbed in the same band with relative fractions of $80 \text{ nm} / (1200 - 350 \text{ nm}) = 0.095$ has an energy efficiency equal to 1.0, in this case quanta do not lose energy. As a result, the total light collection in the light-harvesting antenna *Blc. Viridis* can be characterized by energy efficiency of $0.24 \times 0.42 + 0.095 \times 1.0 \approx 0.20$.

The calculations for other types of photosynthetic bacteria showed the following values of energy efficiency. In *R. Rubrum* overall energy efficiency of light collection is 0.19, in *Rba. Sphaeroides* 0.26, in *Chloriobium Phaeobacteriodes* 0.19 and in cyanobacterium *Synechocystis* the total light collection efficiency of the solar radiation is 0.14.

In investigated bacteria, the photosynthesis initiated by the solar radiation at various wavelengths has an energy efficiency of ~ 0.20 . However, under the combined action of several such photosynthetic organisms, this efficiency can rise above 0.50. Further increase of this efficiency is possible by optimizing the absorption spectrum and combination of the applied photosynthetic bacteria. Simultaneous effect of various photosynthetic bacteria is possible considering their physiological compatibility.

While performing the specified conditions, the photosynthetic bacteria can be the basis for the creation of biological converters of solar energy.

CONCLUSION

1. It has been shown that the spectral and kinetic parameters of chlorophyll fluorescence allow quantifying the uptake and migration of light energy in the light-harvesting antenna, as well as charge separation and transfer in the photosynthetic reaction centre.
2. For the first time it has been experimentally shown that fast fluorescence of chlorophyll associated with the re-emission of light directly to the antenna is an integral indicator of the efficiency of photosynthesis, whereas delayed fluorescence is caused by inverse electron transfer, the differential indicator of effectiveness in different parts of the reaction centre.
3. Migration laws of the light excitation (excitons) in the antenna and its capture by the reaction centre can be determined by the variable fluorescence that can be measured by the pulse-amplitude modulation.
4. For the first time the experimental setups have been created and the methods for studying the processes of inverse charge transfer in photosynthetic reaction centre by various components of delayed fluorescence with durations from nanoseconds to hundreds of milliseconds have been developed.
5. The possibility of quantitative characterization of simultaneous action of photoinactivation and photoprotection via fluorescence parameters has been shown; the analytic expressions describing the change in the number of functional reaction centres using the balance equation of photoinactivation and photoprotection have been derived.
6. For the first time the possibility of determining the rate of electron transport in different parts of the photochemical reaction centre under stress conditions using different temporal components of delayed fluorescence has been

- experimentally demonstrated.
7. A simple spectral method of defining the degree of oxidation of bacteriochlorophyll *b* molecules in solution by the relation of the maximum fluorescence intensity has been offered.
 8. For the first time it has been experimentally shown that, depending on the molecular environment, the absorption band of chlorophylls, bacteriochlorophylls and some of their derivatives can fluctuate significantly, which opens up new prospects for these compounds as new photosensitizers near infrared region.
 9. It has been found out that the modification of the functional structure of the photosynthetic apparatus of *Blactochloris Viridis* by the genetic engineering methods leads to qualitative changes in the energy of photosynthesis which is reflected in the absorption and fluorescence spectra. A new type energy conversion device based on the group of photosynthetic bacteria with the total energy efficiency of over 50% has been proposed.

ЭЪЛОН ҚИЛИНГАН ИШЛАР РЎЙХАТИ
СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ
LIST OF PUBLISHED WORKS

I бўлим (I часть; part I)

1. Massacci A., Nabiev S.M., Pietrosanti L., Nematov Sh.Q., Chernikova T.N., Thor K., Leipner J. Response of the photosynthetic apparatus of cotton (*Gossypium hirsutum*) to the onset of drought stress under field conditions studied by gas-exchange analysis and chlorophyll fluorescence imaging // *Plant Physiology and Biochemistry*. Elsevier, 2008. – Vol. 46. – pp. 189 – 195 (№ 1. Web of science; IF = 2,35).
2. Захидов Э.А., Захидова М.А., Нематов Ш.К., Хабибуллаев П.К. Двойная волоконно-оптическая петля - как спектрально-сбалансированный отражатель широкополосного излучения // *Узбекский физический журнал*. Ташкент, 2008. – Том 10, – № 3. – С. 204 – 209 (01.00.00; № 5).
3. Захидов Э.А., Захидова М.А., Курбанов С.С., Нематов Ш.К., Хабибуллаев П.К. Сверхвысокоскоростные волоконно-оптические системы связи на основе оптических солитонов // *Узбекский физический журнал*. Ташкент, 2009. – Том 11, – № 2. – С. 95 – 102 (01.00.00; № 5).
4. Zakhidov E.A., Kokhkharov A.M., Nematov Sh.Q. Effect of molecular surrounding to spectral characteristics of chlorophylls – the perspective PDT photosensitizers // *Uzbek Journal of physics*. Tashkent, 2011. – Vol. 13, – No. 3. – pp. 160 – 168 (01.00.00; № 5).
5. Zakhidov E.A., Kokhkharov A.M., Kuvondikov V.O., Nematov Sh.K., Saparbaev A.A. Photoacoustic spectroscopy of thermal relaxation processes of solar energy in the photosynthetic apparatus of plants // *Applied Solar Energy*. Springer, 2012. – Vol. 48, – No.1. – pp. 62 – 66 (01.00.00; № 3).
6. Абдурахманов У., Захидов Э.А., Захидова М.А., Кувондигов В.О., Нематов Ш.К., Пономаренко Н.С., Сапарбаев А.А. Миграция светового возбуждения в светособирающей антенне бактериального фотосинтеза: молекулярная структура, обеспечивающая высокую эффективность процессов усвоения энергии // *Вестник Национального Университета Узбекистана*. Ташкент, 2013. – №2/1. – С. 13 – 16 (01.00.00; № 8).
7. Э.А.Захидов, А.М.Коххаров, В.О.Кувондигов, Нематов Ш.К., Трунилина О.В., Норматов Э.П., Сапарбаев А.А., Ярбеков А.Э. Фотоакустический спектрометр на основе трехцветного светоизлучающего диода для исследования процессов фотосинтетического преобразования световой энергии // *Узбекский физический журнал*. – Ташкент, 2014. – Том 16, № 1. – С. 65 – 74 (01.00.00; № 5).
8. Zakhidov E.A., Zakhidova M.A., Kokhkharov A.M., Yarbekov A.E., Kuvondikov V.O., Nematov Sh.Q., Normatov E.P., Saparbaev A.A. Energy efficiency of the sunlight harvesting and storing system in bacterial photosynthesis: comparison with semiconductor photovoltaic cells // *Turkish*

journal of biology. Ankara (Turkey), 2015. – Vol. 39. – pp. 276 – 283 (№ 1. Web of science; IF = 1,22).

9. Нематов Ш.К. Параметры переменной и замедленной флуоресценции, как физический тест для определения влияния стрессов на эффективность энергопреобразования // Узбекский физический журнал. Ташкент, 2015. – Том 17, – № 3. – С. 144 – 152 (01.00.00; № 5).
10. Захидов Э.А., Кувондииков В.О., Нематов Ш.К., Сапарбаев А.А. Замедленная флуоресценция хлорофилла как средство изучения термодинамики процессов обратного переноса электронов в фотосинтезирующих бактериях // Узбекский физический журнал. Ташкент, 2015. – Том 17, – № 3. – С. 187 – 190 (01.00.00; № 5).

II бўлим (II часть; part II)

11. Zakhidov E.A., Kokhkharov A.M., Kuvondikov V.O., Nematov Sh.K., Saparbaev A.A. Heat relaxation processes in photosynthesis studied by photoacoustic spectroscopy // Research in Environment and Life Sciences. New Delhi (India), 2012. – Vol. 5, – No. 1. – pp. 1 – 4.
12. Zakhidov E.A., Zakhidova M.A., Kasymova K.R., Kokhkharov A.M., Kuvondikov V.O., Nematov Sh.Q., Sadykov R.A., Sadykov R.R., Saparbaev A.A. Study of methelene blue aggregation processes using absorption and fluorecence spectroscopy // Research in Environment and Life Sciences. New Delhi (India), 2012. – Vol. 5, – No. 3. – pp. 141 – 146.
13. Zakhidov E.A., Zakhidova M.A., Nematov Sh.Q., Khabibullaev P.K. Study of interfacial effects using Surface Enhanced Raman Scattering at pulse-periodical laser excitation / The 6th 2007 Korea-Uzbekistan Joint International symposium on Quantum Functional Semiconductors. June 13-19 2007. Book of abstracts. Seoul (Korea), 2007. – pp. 11-12.
14. Нематов Ш.К., Захидов Э.А., Захидова М.А. Фотоакустический метод изучения процессов фотосинтетического преобразования световой энергии / 5-ая конф., по физической электронике. 28 – 30 октябрь 2009. Ташкент, 2009. – С. 146.
15. Захидова М.А., Захидов Э.А., Нематов Ш.К. Флуоресцентный контроль процессов переноса электронов в фотосинтетических преобразователях световой энергии / 5-ая конф., по физической электронике. 28 – 30 октябрь 2009. Ташкент, 2009. – С. 110.
16. Нематов Ш.К., Захидов Э.А., Захидова М.А. Изучение процессов преобразования световой энергии в листьях растений при воздействии стресс-факторов / Современные проблемы физики и физического образования. 11-12 декабрь 2009. Самарканд, 2009. – С. 74-75.
17. Zakhidov E.A., Kokhkharov A.M., Nematov Sh.Q. Effect of molecular surrounding to spectral characteristics of chlorophylls – the perspective PDT photosensitizers / The 9th Joint Uzbek- Korea Symposium NANOSCIENCE: Problems and Prospects Quantum-Functional Materials and Devices, November 2-5, 2010. Book of abstracts. Tashkent, 2010. – p. 8.

18. Кувондыков В.О., Нематов Ш.К. О возможности использования флуоресценции листьев для оценки функционирования фотосинтетического аппарата растений / Проблемы Физики и Астрономии. 12-13 Март 2010. Ташкент, 2010. – С. 35-37.
19. Нематов Ш.К., Захидов Э.А., Кувондыков В.О. Долговременные светоиндуцированные изменения функционирования фотохимических реакционных центров фотосистемы II / Актуальные проблемы современной физики и астрономии. 21 май 2010. Карши, 2010. – С. 14-15.
20. Захидов Э.А., Захидова М.А., Нематов Ш.К., Кувондыков В.О. Влияние электрического поля на флуоресценцию в фотосинтетических материалах / Фундаментальные и прикладные вопросы физики. 24 – 25 ноябрь 2010. Ташкент, 2010. – С. 349.
21. Нематов Ш.К., Кувондыков В.О., Шопонбоев Н.Н., Эргашева М.Ш. Исследование экологического состояния городской среды с помощью флуоресцентных параметров / Ядерная физика и ядерные технологии. III Рес. конф., 1-2 декабрь 2010. Ташкент, 2010. – С. 158-160.
22. Zakhidov E.A., Kokharov A.M., Nematov Sh.Q. Study of the processes of light absorption, conversion and energy storage using photoacoustic spectroscopy / The 10th 2011 Korea-Uzbekistan Joint International symposium on Quantum Functional Materials and Devices. November 28-29 2011. Book of abstracts. Seoul (Korea), 2011. – p. 11.
23. Нематов Ш.К., Захидов Э.А., Захидова М.А., Кувондыков В.О., Сапарбаев А.А. Конверсия световой энергии в химическую с использованием синтетических супрамолекулярных наноразмерных систем / Нанотехнология и использовании возобновляемых источников энергии: проблемы и решения. 27-28 апрель 2012. Карши, 2012. – С. 203 – 204.
24. Захидов Э.А., Кувондыков В.О., Нематов Ш.К., Сапарбаев А.А., Ярбеков А.Э., Норматов Э.П., Байтураев А.М. Флуоресцентная спектроскопия процессов миграции экситонов в матрице светособирающей антенны фотосинтезирующих систем / Межд. конф. по актуальным проблемам молекулярной спектроскопии конденсированных сред. 29-31 май 2013. Самарканд, 2013. – С. 49.
25. Zakhidov E.A., Nematov Sh.Q., Normatov E.P., Quvondykov V.O., Ponomarenko N.S., Norris J.R. New optical and spectroscopic methods for monitoring of light conversion processes in genetically tailored photosynthetic systems / II межд. конф. Оптика и фотоника-2013. 25-27 сентябрь 2013. Самарканд, 2013. – С. 39-41.
26. E.A.Zakhidov, A.M.Kokhkharov, Sh.Q.Nematov, R.A.Nusretov. Absorption spectra and sunlight conversion efficiency in fullerene bonded supramolecules on nanostructured ZnO / The 17th international symposium on the physics of semiconductors and applications, ISPSA-2014. December 7-11 2014. Jeju (Korea), 2014. – p. 202.

27. Ш.К.Нематов, В.О.Кувондиков, А.А.Сапарбаев, А.Э.Ярбеков, Э.П.Норматов, А.М.Байтураев, Б.А.Нормуминов. Перспективы практического применения бактериального фотосинтеза для преобразования солнечной энергии / Респ. научно-практической конф. молодых ученых. 18 декабрь 2014. Ташкент, 2014. – С. 44.
28. Захидов Э.А., Нематов Ш.К., Кувондиков В.О., Сапарбаев А.А. Спектрально-энергетические характеристики фотосинтетических энергопреобразующих систем / III-Респ. научно-практическая конференция по актуальным проблемам современной физики и астрофизики. 23 май 2015. Карши, 2015. – С. 8 – 9.

Автореферат «Тил ва адабиёт таълими» журнали тахририятида тахрирдан ўтказилди (15 июнь 2015 йил)