

ION-PLAZMA VA LAZER TEXNOLOGIYALARI INSTITUTI
HUZURIDAGI ILMIY DARAJALAR BERUVCHI
DSc.02/30.12.2019.FM/T.65.01 RAQAMLI ILMIY KENGASH

ION-PLAZMA VA LAZER TEXNOLOGIYALARI INSTITUTI

AXMEDOV SHERZOD MAMARAIM O'G'LI

BA'ZI ORGANIK MODDALARNING VAKUUM VA ATMOSFERA
BOSIMI SHAROITIDA TERMAL DESORBSIYASI VA TERMAL
IONLASHUVI

01.04.04 – Fizik elektronika

FIZIKA-MATEMATIKA FANLARI BO'YICHA FALSAFA DOKTORI (PhD)
DISSERTATSIYASI AVTOREFERATI

Toshkent – 2025

**Fizika-matematika fanlari bo'yicha falsafa doktori(PhD) dissertatsiyasi
avtoreferati mundarijasi**

**Оглавление автореферата диссертации доктора философии (PhD)
диссертации**

**Contents of dissertation abstract of doctor of philosophy (PhD)
on physical-mathematical sciences**

Axmedov Sherzod Mamaraim o'g'li

Ba'zi organik moddalarning vakuum va atmosfera bosimi sharoitida termal
desorbsiyasi va termal ionlashuvi..... 3

Ахмедов Шерзод Мамарайм ўғли

Термическая десорбция и термическая ионизация некоторых
органических соединений в условиях вакуума и атмосферного
давлени..... 21

Akhmedov Sherzod Mamaraim o'g'li

Thermal desorption and thermal ionization of certain organic compounds
under vacuum and atmospheric pressure conditions..... 39

E'lon qilingan ishlar ro'yxati

Список опубликованных работ
List of published works..... 43

ION-PLAZMA VA LAZER TEXNOLOGIYALARI INSTITUTI
HUZURIDAGI ILMIY DARAJALAR BERUVCHI
DSc.02/30.12.2019.FM/T.65.01 RAQAMLI ILMIY KENGASH

ION-PLAZMA VA LAZER TEXNOLOGIYALARI INSTITUTI

AXMEDOV SHERZOD MAMARAIM O'G'LI

BA'ZI ORGANIK MODDALARNING VAKUUM VA ATMOSFERA
BOSIMI SHAROITIDA TERMAL DESORBSIYASI VA TERMAL
IONLASHUVI

01.04.04 – Fizik elektronika

FIZIKA-MATEMATIKA FANLARI BO'YICHA FALSAFA DOKTORI (PhD)
DISSERTATSIYASI AVTOREFERATI

Toshkent – 2025

Fizika-matematika fanlari bo'yicha falsafa doktori (PhD) dissertatsiyasi mavzusi O'zbekiston Respublikasi Oliy ta'lim, fan va innovatsiyalar vazirligi huzuridagi Oliy attestatsiya komissiyasida B2025.1.PHD/FM1241 raqam bilan ro'yxatga olingan.

Dissertatsiya O'zR FA Ion-plazma va lazer texnologiyalari institutida bajarilgan.

Dissertatsiya avtoreferati uch tilda (o'zbek, rus, ingliz (rezyume)) Ilmiy kengash veb-sahifasida (www.iplt.uz) hamda «Ziyonet» Axborot-ta'lim portalida (www.ziyonet.uz) joylashtirilgan.

Ilmiy rahbar:

Usmanov Dilshadbek Tursunbaevich
fizika-matematika fanlari doktori, professor

Rasmiy opponentlar:

Umirzakov Boltaxo'ja Ermatovich
fizika-matematika fanlari doktori, professor

Kaxramonov Boburjon Ruziboevich
fizika-matematika fanlari falsafa doktori (PhD)

Yetakchi tashkilot:

O'zbekiston Milliy universiteti

Dissertatsiya himoyasi Ion-plazma va lazer texnologiyalari instituti huzuridagi DSc.02/30.12.2019.FM/T.65.01 raqamli Ilmiy kengashning 2025 yil « 16 » dekabr soat 14³⁰ dagi majlisida bo'lib o'tadi (Manzil: 100125, Toshkent sh., Do'rmon yo'li ko'chasi, 33-uy. Tel./faks: (99871) 262-32-54, e-mail: info@iplt.uz, Ion-plazma va lazer texnologiyalari instituti majlislar zali).

Dissertatsiya bilan Ion-plazma va lazer texnologiyalari institutining Axborot-resurs markazida tanishish mumkin (№18 raqami bilan ro'yxatga olingan). Manzil: 100125, Toshkent sh., Do'rmon yo'li ko'chasi, 33-uy. Tel./faks: (99871) 262-31-69.

Dissertatsiya avtoreferati 2025 yil « 03 » dekabr kuni tarqatildi.

(2025 yil « 03 » dekabrdagi №18 raqamli reestr bayonnomasi).



X.B. Ashurov

Ilmiy darajalar beruvchi ilmiy kengash raisi,
texnika fanlari doktori, professor

I.D. Yadgarov

Ilmiy darajalar beruvchi ilmiy kengash ilmiy
kotibi, fizika-matematika fanlari doktori,
professor

U.K. Maxmanov

Ilmiy darajalar beruvchi ilmiy kengash
qoshidagi ilmiy seminar raisi fizika-
matematika fanlari doktori, professor

KIRISH (falsafa doktori (PhD) dissertatsiyasining annotatsiyasi)

Dissertatsiya mavzusining dolzarbligi va ahamiyati. Zamonaviy fanning muhim yo'nalishlaridan biri inson salomatligiga zararli ta'sir ko'rsatuvchi organik moddalarning yuqori aniqlikda tahlilini amalga oshirishdir. Hozirgi vaqtda bunday moddalarning iz miqdorlarini aniqlash uchun sezgirlik, tezkorlik, samaradorlik, ishonchlilik va tanlovchanlik jihatidan ustun bo'lgan analitik usullar qo'llanilmoqda. Ayniqsa, ushbu talablarga to'liq javob beruvchi mass spektrometrik ionlashuv texnologiyalarini takomillashtirish dolzarb ilmiy vazifalardan biri hisoblanadi. Shu maqsadda organik moddalar tahlilida vakuum va atmosfera bosimi sharoitida kechuvchi termal desorbsiya (TD) hamda termal ionlashuv (TI) jarayonlarini chuqur o'rganish, ularning nazariy va eksperimental asoslarini ishlab chiqish zarurdir. Shuningdek, ko'plab organik molekulalarning ionlashuv qonuniyatlarini, desorbsiya mexanizmlarini hamda ularning fizik-kimyoviy xossalari ionlashuv jarayonlariga ta'sirini tadqiq etish fundamental va amaliy ahamiyatga ega masala sifatida qaraladi.

So'nggi yillarda dunyoning yetakchi ilmiy markazlarida TD va TI jarayonlari bo'yicha izchil tadqiqotlar olib borilmoqda. Xususan, mass-spektrometriya yordamida qiyin uchuvchan organik moddalarning gaz fazasiga o'tishini ta'minlovchi TD usullari o'zining samaradorligi va molekulyar tuzilmani saqlab qolish xususiyati bilan ajralib turadi. TD jarayoni davomida molekulalarning minimal parchalanishi ularning molekulyar ionlari asosiy ion sifatida shakllanishiga imkon yaratadi. TI esa yumshoq ionlashuv usuli bo'lib, molekula ionlarining parchalanishini kamaytiradi. Shu nuqtayi nazardan, TD va TI jarayonlari doirasida LHTD (Leidenfrost hodisasi yordamida termal desorbsiya), VSI (vakuum sirt ionlashuv) va ABSI (atmosfera bosimi sharoitida sirtiy ionlashuv) kabi usullarni o'rganish fizik elektronika nuqtayi nazaridan dolzarbdır. Ushbu tadqiqotlarni rivojlantirish atmosfera bosimi sharoitida ishlovchi portativ mass spektrometrik qurilmalarni ishlab chiqish imkonini berib, amaliy elektronika va ekologik monitoring sohalarida yangi texnologik yechimlar yaratishga xizmat qiladi.

O'zbekistonda so'nggi yillarda fizik elektronika sohasida psixotrop dori vositalarining ionlashuv jarayonlari, biosuyuqliklardagi narkotik moddalarning iz miqdorini to'g'ridan to'g'ri aniqlash va sirtiy ionlashuv detektorlarining sezgirligini va selektivligini baholash kabi qator fundamental va amaliy tadqiqotlarda ahamiyatli natijalarga erishilgan. O'zbekiston Respublikasi Prezidentining 2024-yil 16-fevraldagi PF-36-son farmonida tarkibida faol moddalar bo'lgan pestitsidlarni ro'yxatdan o'tkazish to'g'risida va 2024 yil 6-maydagi PF-73-son farmonida giyohvandlik vositalari va psixotrop moddalarning noqonuniy aylanmasiga chek qo'yish borasida qator vazifalar belgilangan. Shu jihatdan, pestitsidlar va alkaloidlarning vakuum va atmosfera sharoitlarida ionlashuv qonuniyatlarini va mass-spektrlardagi asosiy perikursor ionlarini tadqiq qilish ahamiyatli hisoblanadi.

Mazkur dissertatsiya ishi, ma'lum darajada, O'zbekiston Respublikasi Prezidentining 2017-yil 7-fevraldagi PF-4947-son "O'zbekiston Respublikasini yanada rivojlantirish bo'yicha Harakatlar strategiyasi to'g'risida"gi farmonining,

2017-yil 17-fevraldagi PQ-2789-son “Fanlar Akademiyasi faoliyati, ilmiy-tadqiqot ishlarini tashkil etish, boshqarish va moliyalashtirishni yanada takomillashtirish chora-tadbirlari to‘g‘risida”gi qarorining, 2019 yil 23-oktyabrdagi PF-5853-son “O‘zbekiston Respublikasi qishloq xo‘jaligini rivojlantirishning 2020-2030-yillarga mo‘ljallangan strategiyasini tasdiqlash to‘g‘risida” farmonining ijrolarini ta‘minlash chora tadbirlarida nazarda tutilgan vazifalarga muayyan darajada mos keladi.

Tadqiqotning respublika ilm-fan va texnologiyalar rivojlanishining ustuvor yo‘nalishlariga mosligi. Ilmiy-tadqiqot ishlari III.«Energetika, energiya resurslarini tejash, transport, mashinasozlik va asbobsozlik; zamonaviy elektronika, mikroelektronika, fotonika, elektron asbobsozlikni rivojlantirish» va ПФИ-2 «Fizika, astronomiya, energetika va mashinasozlik» sohalarini qamrab olgan ustuvor yo‘nalishlar doirasida amalga oshirildi.

Muammoning o‘rganilganlik darajasi. Vakuum sharoitida TD va TI jarayonlari, sirtiy ionlashuv (SI) usuli yordamida, o‘tgan asrning o‘rtalaridan boshlab o‘rganila boshlagan. Kingdon va Langmuir (1923) tomonidan SI hodisasi birinchi marta kashf qilingan bo‘lib, bu jarayon asosan noorganik moddalar uchun qo‘llanilgan. Keyinchalik, U.X. Rasulev va E.Ya. Zandberg 1967-yilda birinchi marta organik moddalar SI usuliga (1967) asos solishgan. Ular ko‘pgina azot asosli organik birikmalar, xususan, aminlar, gidrozin va ularning hosilalari uchun SI qonuniyatlarini chuqur o‘rganishgan, ya‘ni SI ning yuqori tanlovchanligi va sezgirligini ko‘rsatib, azot asosli birikmalarning ionlashuv energiyasi (potensial), adsorbsiya mexanizmlari va TD kinetikasini aniqlaganlar. Bu tadqiqotlar vakuum sharoitida sirtiy ionlashuv (VSI) usuliga asos bo‘lib xizmat qiladi va bu usul organik moddalar, ayniqsa, farmatsevtik va toksik birikmalar tahlilida muhim ahamiyat kasb etadi. D.T. Usmanov va boshqalar (2010, 2020) bu yo‘nalishni davom ettirib, omnopon va morfin kabi opiat moddalarni VSI yordamida to‘g‘ridan-to‘g‘ri aniqlash usullarini ishlab chiqdilar. Ushbu ishlar sud tibbiyotida, dorivor moddalar monitoringida va atrof-muhit xavfsizligida qo‘llanilishi mumkinligini ko‘rsatgan.

Atmosfera sharoitida TD va TI sohasi nisbatan keyinroq, 1980-yillarning o‘rtalarida rivojlana boshlagan. T. Fujii va H. Arimoto (1985) platina emitterlari yordamida TI detektorlarini rivojlantirgan holda, azot asosli organik moddalar uchun yuqori sezgirlikni ko‘rsatib bergan. Bu tadqiqot ishi ABSI ning mexanizmlarini o‘rganishda muhim qadam hisoblanadi, ammo tadqiqot asosan gaz xromatografiyasi (GX) sohasiga qaratilgan va organik moddalarning umumiy TD va TI qonuniyatlarini to‘liq ochib bermaydi. Yana bir qancha olimlar (R.G. Cooks (Purdue universiteti, AQSh), T.J. Kauppila (Xelsinki universiteti, Finlyandiya), Z. Ouyang (Purdue universiteti, AQSh), H. Chen (Xitoy), John B. Fenn (Virjiniya universiteti, AQSh)) tomonidan turli usullar yordamida desorbsiya va ionlashuv qonuniyatlari chuqur tadqiq qilingan, jumladan H.Chen desorbsiya atmosfera sharoitida kimyoviy ionlashuv va boshqa atmosfera sharoitida ishlovchi ionlashuv usullarini rivojlantirgan.

Hozirgi kunga qadar qiyin uchuvchi organik birikmalar xususan pestitsidlar va alkaloidlarning TD va TI qonuniyatlari vakuum va atmosfera sharoitlarida batafsil tadqiq qilinmagan, ularning ion tarkiblari va asosiy ion intensivliklari orasidagi

farqlar, hamda desorbsiya va ionlashuv jarayonlarini baholashga xizmat qiluvchi fizik parametrlari aniqlanmagan.

Tadqiqotning dissertatsiya bajarilgan ilmiy tadqiqot muassasasining ilmiy tadqiqot ishlari rejalari bilan bog'liqligi. Dissertatsiya ishi O'zbekiston Respublikasi Fanlar akademiyasi Ion-plazma va lazer texnologiyalari instituti ilmiy tadqiqot ishlari rejasining quyidagi ilmiy-tadqiqot mavzulari doirasida bajarilgan: Φ - Φ A-2021-509 "Noorganik (Ti, W, WO_x, TiO₂, Si, SiO₂) va organik (polimerlar) materiallarni metall ionlari bilan implantatsiyalaganda va aktiv organik birikmalar molekulalari bilan adsorbsiyalaganda yuzasida ko'p komponentli nanostrukturalarning shakllanish mexanizmlari", "Ko'p atomli zarralarning qattiq jism sirtlari bilan vakuum va havo muhitida o'zaro ta'siri, fiziologik faol organik birikmalarni ionlashtirishning yangi usullarini ishlab chiqish" (2022), "Suiiste'mol qilinuvchi moddalarning qattiq jism sirtidan termoion emissiyasi hamda ikkilamchi emissiya jarayonlarni tadqiq qilish" (2025).

Tadqiqotning maqsadi. Vakuum va atmosfera sharoitida ba'zi organik moddalarning termal ionlashuv va termal desorbsiya qonuniyatlarini mass spektrometrik usullar yordamida tadqiq qilish va bu jarayonlarning ilmiy asoslarini rivojlantirishdan iboratdir.

Tadqiqotning vazifalari.

Tadqiqot ishini amalga oshirish uchun quyidagi ilmiy vazifalar belgilandi:

- pestitsidlar (atsetamiprid, aldikarb, diazinon, imidaklopid, xlordimeform) ning VSI jarayonlarini eksperimental tekshirish va oksidlangan va metall sirtlarda molekulalarning ionlashuv qonuniyatlarini o'rganish va solishtirish;
- namunaning TD siga turli darajali dag'allikka ega bo'lgan bug'latkich sirtining ta'sirini aniqlash;
- namunaning TD siga ftorli birikma qoplangan bug'latkich sirtining ta'sirini aniqlash;
- LHTD jarayonida qiyin uchuvchan organik moddalarning termal desorbsiyaga sirt xususiyatlarining ta'sirini eksperimental ravishda tekshirish;
- ABSI jarayonida asosiy ion sifatida hosil bo'lgan protonlangan ion $[M+H]^+$ larning shakllanish mexanizmini tahlil qilish;
- VSI va ABSI tajribalarida olingan mass spektrometrik natijalarni solishtirish.

Tadqiqotning obyekti. Pestitsidlar - asetamiprid, aldikarb, diazinon, imidaklopid, xlordimeform, karbaril; alkaloidlar - morfin, papaverin; stimulant modda – kokain.

Tadqiqotning predmeti. Tadqiqotning predmeti ba'zi organik moddalarning (pestitsidlar, alkaloidlar va stimulyator) vakuum va atmosfera sharoitida TD va TI qonuniyatlari, ya'ni ionlashuv mexanizmlari, haroratga bog'liqliklari va fizik-kimyoviy xususiyatlarini SI/MS, ABSI va LHTD usullari yordamida o'rganish, shuning bilan birga TD ga sirt morfologiyasining ta'sirini o'rganish.

Tadqiqotning usullari. Tadqiqot ishida quyidagi tadqiqot usullaridan foydalanilgan: SI/MS, ABSI, LHTD, gaz xromato-mass spektrometriya (GX-MS), pestitsidlarning sublimatsiyalanish energiyasini aniqlash uchun Arrenius grafigi usuli.

Tadqiqotning ilmiy yangiligi. Tadqiqotning ilmiy yangiligi quyidagilardan iborat:

- ilk bor pestitsidlar (aldikar, diazinon, atsetamiprid, xlordimeform, imidoklopid) ning VSI jarayonlari yordamida mass-spektrlaridagi asosiy ionlari aniqlandi va ularning sublimatsiyalanish energiyalari ionlashuv potentsiallari baholandi;
- pestitsidlar uchun oksidlangan emitter sirtida hosil bo'lgan ionlar intensivligi metall emitter sirtida hosil bo'lgandagiga qaraganda $\sim 10^3$ marta katta bo'lishi aniqlandi;
- patronli bug'latkich sirt dag'alligining orttirilishi natijasida sirt va tomchi orasidagi samarali issiqlik uzatilishi yuz berib, ionlar intensivliklarining ortishiga sezilarli ta'sir ko'rsatishi aniqlandi;
- ftorli birikma qoplangan sirtidagi TD jarayonida sirt va tomchi orasidagi kam issiqlik o'tkazuvchanlik tufayli bug'lanish orqali sovish kamayib tomchi harorati tez ko'tarilganligi sababli namunaning termal degradatsiya va umumiy desorbsiya vaqtlarining qisqarishi aniqlandi;
- ftorli birikma qoplangan sirtga tomizilgan morfin eritmasining TD sida morfin sirt aktiv modda (tomchi ichida va sirtida to'planish xususiyati) bo'lganligi uchun TB tufayli parchalanishlarsiz faqat protonlangan $[M+H]^+$ ionlar tarzida hosil bo'lishi aniqlandi;
- ilk bor ABSI usulida protonlangan ion $[M+H]^+$ larning hosil bo'lish mexanizmi proton almashinuvi reaksiyalari orqali amalga oshishi, ya'ni Bronsted kislotalari sifatida harakat qilishi aniqlandi;
- ABSI mass spektrida protonlangan molekulalar asosiy ion sifatida aniqlandi VSI ga xos bo'lgan deprotonlangan va fragmentlangan ionlar kuzatilmadi, proton almashinuv reaksiyalari adiabatik jarayonda (issiqlik almashinuvisiz) ro'y berganligi tufayli fragment ionlar kuzatilmaganligi aniqlandi;

Tadqiqotning amaliy natijalari. Pestitsidlarning vakuum sharoitida TI qonuniyatlari sirtiy ionlashuv mass-spektrometriya usulini rivojlantirishga, shuningdek VSI usuli bilan aniqlangan pestitsidlar (aldikar (m/z 89), diazinon (m/z 137), atsetamiprid (m/z 58), xlordimeform (m/z 195), imidoklopid (m/z 194)) ning indikator ionlari bu moddalarni haqiqiy namunalar tarkibida qoldiq miqdorlarini aniqlashga xizmat qiladi. Atmosfera bosimi sharoitida o'tkazilgan sirtning turli morfologiyasining TD ta'sirlaridan va ABSI tadqiqotlarida qo'llanilgan turli, qiyin eruvchan metall emitterlardan foydalanish mass spektrometriya ionlashuv manbalarini optimallashtirishda qo'llanilish imkonini beradi, bu kelgusida termik ionlashuvga asoslangan portativ qurilmalar ishlab chiqilishiga asos yaratadi.

Tadqiqot natijalarining ishonchliligi. Tadqiqot natijalarining ishonchliligi VSI/MS, ABSI, LHTD, GX-MS usullarini qo'llash, tajriba sharoitlarining va statistikasining batafsil va to'liq tahlil qilinishi, yuqori aniqlikdagi zamonaviy o'lchov asboblariidan foydalanish bilan asoslangan; olingan eksperimental natijalar puxta hisob-kitoblarga asoslangan va mumkin bo'lgan xatoliklarni hisobga olgan holda statistik usullar yordamida qayta ishlangan, olingan eksperimental natijalar va

qilingan xulosalar qiyin uchuvchi organik birikmalarning ionlanish mexanizmlariga bag'ishlangan zamonaviy tadqiqotlar ma'lumotlari bilan solishtirilgan.

Tadqiqot natijalarining ilmiy va amaliy ahamiyati. Tadqiqotning ilmiy ahamiyati: Tadqiqot ba'zi organik moddalarning vakuum (VSI/MS) va atmosfera (ABSI, LHTD) sharoitida (oksidlangan, metall, sayqallangan, ftorli birikma qoplangan sirt) TD va TI jarayonlarining fizik-kimyoviy qonuniyatlarini birinchi marta tizimli taqqoslash orqali ochib berdi. Vakuumda $[M-H]^+$ va $[M-R]^+$, atmosfera bosimida $[M+H]^+$ ionlarining hosil bo'lish mexanizmlari aniqlanib, proton almashish va dissotsiativ reaksiyalarning sharoitga bog'liqligi aniqlandi. Pestitsidlarning ionlashuv potentsiallari va sublimatsiyalanish energiyalari birinchi marta eksperimental aniqlandi.

Tadqiqotning amaliy ahamiyati: VSI/MS va ABSI usullari bilan olingan natijalar, aniqlangan indikator ionlari orqali pestitsidlarni va alkaloidlarni bionamunalar (ozuq-ovqat, suv, biologik materiallar)da yuqori sezgirlik va tanlovchanlik bilan aniqlash imkonini berishi mumkin. Bu usullar qishloq xo'jaligi xavfsizligi va sud-tibbiyotda qo'llanilishi mumkin. LHTD jarayonida sirt dag'alligi orttirilishi va ftorli birikma bilan qoplanishi moddaning desorbsiya vaqtini qisqartirib, ionlashuv samaradorligini oshiradi. Bu portativ qurilmalar ishlab chiqish uchun texnik asos bo'lishi, atrof-muhit monitoringi va toksikologiyasida tezkor tahlilni ta'minlashi mumkin. Olingan qonuniyatlar va usullar MS asbob-uskunalarini rivojlantirishda qo'llanilishi va yangi avlod analitik qurilmalar yaratishda ilmiy-texnik yechimlar berishi mumkin.

Tadqiqot natijalarini joriy qilish. Dissertatsiya ishida olingan quyidagi ilmiy natijalar amaliyotga joriy etilgan:

Atmosfera bosimi sharoitida sirtiy ionlashuv jarayonida emitter sifatida qo'llanilgan qiyin eruvchi metallar – volfram (W), reniy (Re), palladiy (Pd), molibden (Mo), titan (Ti) va zanglamaydigan po'lat (SUS 304) ning taxminan 600 °C da oksidlanishi va Leidenfrost hodisasi yordamida termal desorbsiya (LHTD) jarayonida metall bug'latkich (SUS 304) sirtining dag'alligini oshirish va sirtning ftor qoplanishi natijasida analit desorbsiyasi vaqtining qisqarishi kabi ilmiy natijalar "Metall oksidlari bilan legirlangan silikatlarining termoelektrik xossalari va o'z-o'zidan tashkil bo'lish jarayonlari" nomli Uzb-Ind-2021-78 O'zbekiston-Hindiston qo'shma fundamental loyihasida qo'llanilgan (Mirzo Ulug'bek nomidagi O'zbekiston Milliy universitetining 2025-yil 5-sentyabrdagi №-01/11-16155-son ma'lumotnomasi). Ilmiy natijalardan foydalanish silikat shishani metall oksidlari (Ru, Cu, Mg) bilan legirlash jarayonida solishtirma qarshilikning temperaturaga bog'liq holda o'zgarishini kompleks o'rganishda, hamda silikat shishaning elektr o'tkazuvchanligi bir necha barobar oshishini aniqlashga imkon bergan.

Pestitsidlar (atsetamiprid, xlordimeform, imidokloprid) ning vakuum sirtiy ionlashuv mass-spektrometriyasi qonuniyatlarini o'rnatish hamda ularning molekulalari qizdirilgan oksidlangan volfram sirtiga ta'siri natijasida ro'y beradigan geterogen reaksiya kanallarini tushuntirish va Alkaloidlar va stimulantlar (kokain, morfin, papaverin) ning atmosfera bosimi sharoitida sirtiy ionlashuv mass spektrlari hosil bo'lishida protonlangan ionlarning paydo bo'lish mexanizmlari vakuum

sharoitidagi sirtiy ionlashuvdan tubdan farqlanishi kabi ilmiy natijalar U.A. Arifov nomidagi Ion-plazma va lazer texnologiyalari institutida 2023-2024-yillarda bajarilgan “Ko‘p atomli zarralarning vakuum va atmosfera sharoitida qattiq jism sirti bilan o‘zaro ta’siri, faol organik birikmalarni yangi ionlashtirish uslublarini rivojlantirish, ishqoriy metall ionlari bilan modifikatsiyalangan qattiq jism sirtlarining elektron va kristall strukturalari hamda manfiy ionli changlanishning elementar tahlilini EXEYS va IIMS usullari bilan tadqiq qilish” nomli bazaviy ilmiy tadqiqotlarda foydalanilgan (O‘zbekiston Respublikasi Fanlar Akademiyasining 2025-yil 29-sentyabrdagi №-2/1255-2322-son ma’lumotnomasi). Ilmiy natijalardan foydalanish yuqori haroratli qiyin eriydigan metall oksidlari yuzasida yangi psixotrop modda molekulalarining adsorbsiyasi, adsorbsiyalangan qatlamda sodir bo‘ladigan geterogen reaksiyalarni hamda funksional guruhlarning mass-spektrda hosil bo‘lish sabablarini aniqlashga imkon bergan.

Tadqiqot natijalarini aprobatsiya qilish. Dissertatsiya ishining asosiy natijalari 8 ta konferensiyada, jumladan, 7 ta xalqaro va 1 ta respublika ilmiy-amaliy anjumanlarida ma’ruza qilingan va muhokamadan o‘tgan.

Tadqiqot natijalarining e’lon qilinganligi. Dissertatsiya mavzusi bo‘yicha olingan asosiy natijalar jami 14 ta ilmiy ishlarda chop etilgan, ulardan 6 ta ilmiy maqola, shu jumladan 4 ta xalqaro (4 tasi Web of Science/Scopus bazasidagi jurnallarda) va 2 ta maqola O‘zbekiston Respublikasi Oliy attestatsiya komissiyasining doktorlik dissertatsiyasining asosiy ilmiy natijalarini chop etish tavsiya etilgan jurnallarida nashr etilgan.

Dissertatsiyaning tuzilishi va hajmi. Dissertatsiya ishning tuzilishi kirish, 4 ta bob, xulosalar, foydalanilgan adabiyotlar ro‘yxati va ilovalardan iborat. Ilmiy ishning hajmi 110 bet matndan iborat bo‘lib, ularda 53 ta rasm va 2 ta jadval mavjud.

DISSERTATSIYANING ASOSIY MAZMUNI

Dissertatsiyaning **kirish** qismida tadqiqot mavzusining dolzarbligi va ahamiyati asoslangan, tadqiqotning maqsad va vazifalari shakllantirilgan, tadqiqot obyekti, predmeti va metodlari, shuningdek tadqiqot ishi O‘zbekiston Respublikasining fan va texnologiyalarni rivojlantirishning ustuvor yo‘nalishlari bilan muvofiqligi aniqlangan. Tadqiqotning ilmiy yangiligi bayon qilingan, olingan natijalarning ishonchliligi asoslangan, ularning nazariy va amaliy ahamiyati ochib berilgan, natijalarning joriy etilishi, aprobatsiyasi, shuningdek dissertatsiya hajmi va tuzilishi to‘g‘risidagi ma’lumotlar keltirilgan.

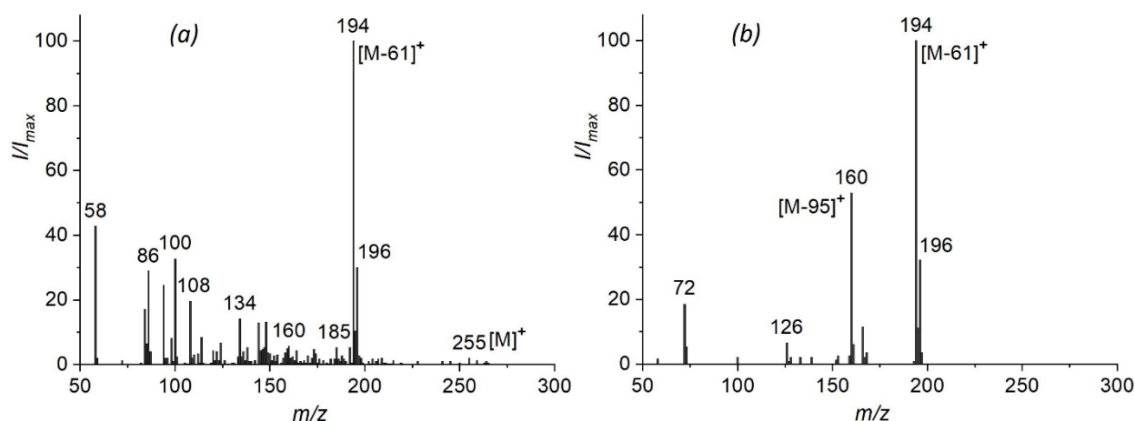
Dissertatsiyaning birinchi **“Ba’zi organik moddalarning mass spektrometrik ionlashuv usullari yordamida tadqiq qilinish holati”** bobida mass-spektrometriyaning ilmiy-nazariy asoslari, xususan, organik moddalarning ionlashuv jarayonlari, ularning mexanizmlari hamda qo‘llanilish sohalari keng qamrovda tahlil qilingan. Turli ionlashuv usullarining fizik-kimyoviy mohiyati, afzallik va cheklovlari yoritilgan. Shuningdek, SI hodisasining nazariy asoslari, qiyin va oson ionlashuv holatlarining shartlari batafsil tushuntirilgan. Vakuum va atmosfera sharoitida ishlaydigan ionlashuv usullari yordamida olib borilgan

tadqiqotlar asosan miqdoriy analizga qaratilganligi haqida xulosa qilingan. Organik birikmalarning vakuum va atmosfera sharoitida ionlashuv jarayonida zarrachalarning ion holatlarining o'rnatilish mexanizmlari, adsorbsiyasi, desorbsiyasi va ionlashuv samaradorligiga ta'sir qiluvchi omillar yetarlicha o'rganilmaganligi ochib berilgan.

Dissertatsiyaning ikkinchi **“Eksperimental qurilma tasnifi va tadqiqot o'tkazish uslublari”** bobida SI tajribalari uchun MИ-1201B statik magnit mass-spektrometr va ABSI tajribalari uchun orbitrap mass spektrometer qurilmalari batafsil tavsiflangan. Ionlashuv manbalari, LHTD jarayonida ishlatilgan patronli bug'latkich, ABSI usulida foydalanilgan emitterlar va ularning fizik xususiyatlari haqida, hamda namunalar sofligini tekshirish uchun qo'shimcha eksperimental usul gaz xromatograf mass-spektrometr qurilmasi haqida ma'lumotlar yoritilgan, shuningdek, eksperimental tadqiqot usullarga qo'yiladigan talablar, namunalar va ularni eksperimentga tayyorlash jarayonlari haqidagi ma'lumotlar keltirilgan.

Dissertatsiyaning uchinchi **“Pestitsidlarning vakuum sharoitida sirtiy ionlashuv qonuniyatlari”** bobida pestitsidlar: imidoklopid, xlordimeform, atsetamiprid, aldikarb va diazinonlarning VSI/MS qonuniyatlari, oksidlangan sirt va metall sirtida kechadigan geterogen jarayonlari, dissotsiatsiya reaksiyalari tadqiq qilingan, shuningdek asosiy ion chiziqlarining ionlashuv potentsiallari va pestitsidlar molekularining sublimatsiyalanish energiya E_{sub} lari aniqlangan.

Imidoklopidning oksidlangan volfram emitterda olingan SI mass spektri 1a-rasmda tasvirlangan. Bu mass spektr $T_{\text{em}} = 1200 \text{ K}$ va $T_{\text{K.b.}} = 345 \text{ K}$ sharoitida o'lchangan, unda molekulyar ion M^+ (m/z 255) va bir qancha fragment ion $[M-R]^+$ lardan tashkil topgan asosiy ion toki m/z 194 fragment bo'lgan, uning tok zichligi taxminan 10^{-9} A/sm^2 ni tashkil etgan. Bu ionlarning ko'pchiligi to'yingan bog'lar va umumlashmagan elektronlarga ega. Ular sp^2 -gibrid orbitalariga ega musbat zaryadlangan to'rt valentli azot atomi sifatida namoyon bo'ladi.

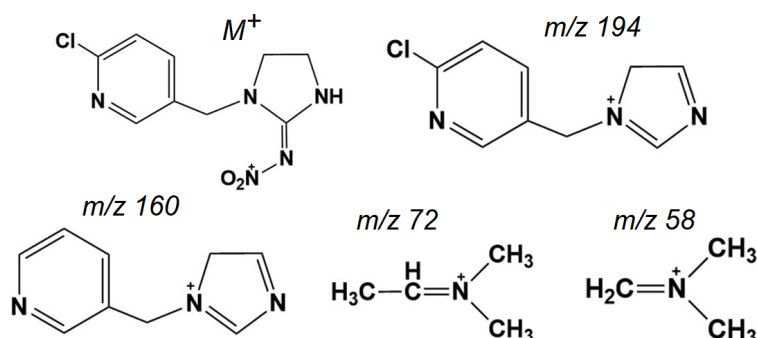


1-rasm. Imidoklopidning SI mass-spektrlari. Oksidlangan emitter sirtida olingan (a), metall emitter sirtida olingan (b) mass-spektrlar.

Imidoklopid molekularining metall volfram emitterdan foydalanib olingan mass spektri 1b-rasmda tasvirlangan, bunda $T_{\text{em}} = 2000 \text{ K}$ va $T_{\text{K.b.}} = 345 \text{ K}$ ni tashkil qilgan. Bu mass spektrni 1a-rasm bilan taqqoslaganda m/z 194, 196, 168, 166, 160,

126, 72 va 58 bo'lgan fragment ionlarni o'z ichiga olgan, bu holda ham asosiy ion chizig'i m/z 194 fargmenti bo'lib zichligi taxminan 10^{-12} A/sm² ni tashkil etgan.

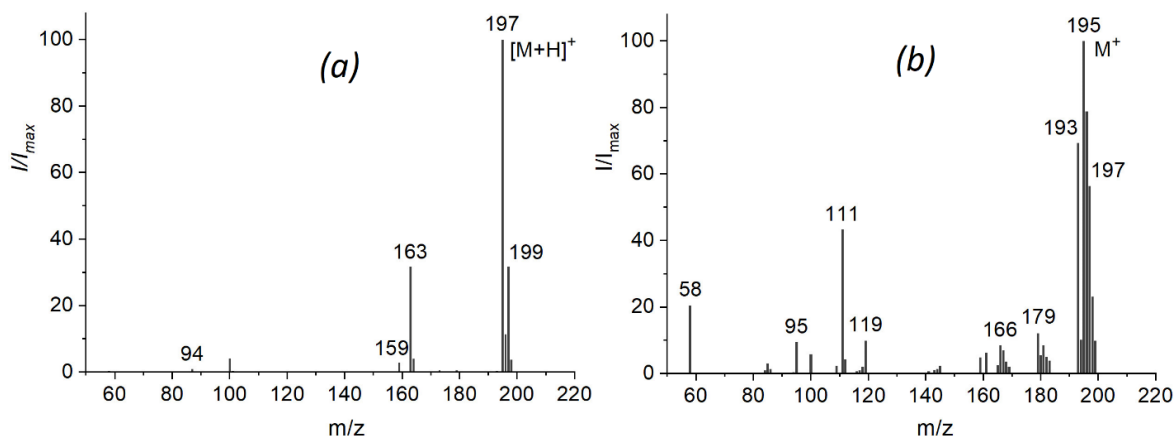
Imidaklopridning mass spektrlarini taqqoslash ionlar tarkibida o'zgarish yo'qligini ko'rsatgan va faqat metall volfram emitter sirtidapaydo bo'lgan ionlar intensivligi oksidlangandagiga nisbatan 10^3 marta kichik ekanligi aniqlangan.



2-rasm.

Imidaklopridning asosiy ionlarining shakllanish strukturasi.

Molekulyar ion M^+ ning hosil bo'lishi VSI qoidalariga muvofiq NO_2 guruhidagi azot atomi orqali adsorbsiyalanishi natijasida sodir bo'ladi. $[M-R]^+$ fragment ionlari turli reaksiya kanallari orqali hosil bo'ladi. Imidaklopridning adsorbsiyasi N-nitroimidazol halqa strukturasiidagi birinchi azot geteroatomida yuz beradi. 2-rasmda imidaklopridning asosiy ionlarining strukturasi va ularning hosil bo'lish geterogen reaksiya kanallari ko'rsatilgan. m/z 194 ion N-nitroimidazol strukturasiidagi birinchi azot geteroatomi orqali adsorbsiyalanishi natijasida hosil bo'lgan. Imidaklopridning mass-spektrining kichik massali sohasida m/z 108, 100, 94, 86, 84, 58 va 72 bo'lgan bir nechta ionlar aniqlangan bo'lib, emitorning qizigan sirtida molekulaning chuqur parchalanishi natijasida hosil bo'lgan.



3-rasm. Xlordimeformning oksidlangan emitterda olingan SI mass-spektri, (a) $T_{em}=600$ K, (b) $T_{em}=1000$ K.

Xlordimeformning VSI/MS usuli orqali oksidlangan emitterda olingan mass spektri 3a,b-rasmlarda tasvirlangan, 3a rasmda $T_{em} = 600$ K ni 3b-rasmda $T_{em} = 1050$ K tashkil etgan natijalar keltirilgan, $T_{K.b.} = 385$ K ni tashkil qilgan. Emitterning quyi haroratida olingan spektr protonlangan $[M+H]^+$ m/z (197, (199))ionlar va fragment ionlar $[M-R]^+$ m/z (163, 159, 100, 94) dan tashkil topgan.

Yuqori haroratda spektrdagi asosiy ion chizig'i protonlangan m/z 197 iondan deprotonlangan m/z 195 ionga siljiydi. m/z 193 dagi $[M-H-2nH]^+$ ionining paydo bo'lishi xlordimeformning strukturaviy o'zgarishini ko'rsatadi. m/z 119, 111, 100,

95 va 58 qiymatdagi fragment ionlar qizdirilgan sirtida chuqur fragmentatsiya natijasida hosil bo'lgan. Xlordimeformning volfram metall emitterida olingan VSI ($T_{em}=2000\text{ K}$, $T_{K.b.}=385$) mass-spektri asosan M^+ , $[M-H-2nH]^+$ va $[M-R]^+$ ionlaridan tashkil topgan. Asosiy ion m/z 58 qiymatga ega bo'lgan $[M-R]^+$ bo'lib, qizdirilgan sirtida molekulaning chuqur fragmentatsiyasi natijasida hosil bo'lishi aniqlangan.

Atsetamiprid molekulalarining VSI/MS tajribalarida emitter sifatida oksidlangan volframdan foydalanilgan uning harorati $T_{em} = 1000\text{ K}$ va $T_{K.b.} = 408\text{ K}$ sharoitida o'tkazilgan, mass-spektr $[M-H]^+$, $[M-3H]^+$ va bir qancha $[M-R]^+$ tarkibli ion chiziqlaridan iboratligi ko'rilgan, bunday natijalar VSI usulida ionlar hosil bo'lish qonuniyatlariga mos kelgan. m/z 221 va 219 ion chiziqlari depratonlangan ionlarga mos kelgan, atsetamipridning kimyoviy strukturasi Cl atomlarining borligi bunday tarkibli ionlarni osongina aniqlash imkonini bergan.

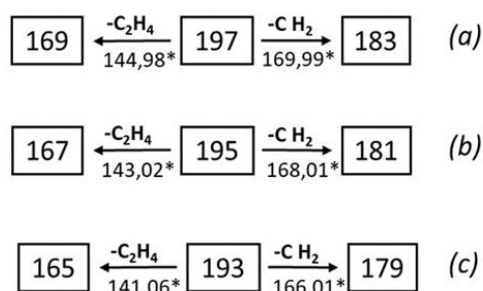
Asetamiprid to'rtta azot geteroatomiga ega bo'lib zaryad xlor atomidan keyingi ikkinchi azot geteroatomi yordamida emitter sirtiga adsorbsiyalangan. Asetamipridning mass-spektrida asosiy ion chizig'i m/z 58 bo'lgan ion bo'lib, u emitter sirtida atsetamiprid molekulalarining parchalanishi vaqtida hosil bo'lgan.

Diazin molekulalarining VSI/MS tajribalarida emitter sifatida oksidlangan volframdan foydalanilgan uning harorati $T_{em} = 1000\text{ K}$ va $T_{K.b.} = 408\text{ K}$ sharoitida o'tkazilgan bo'lib mass spektrida protonlangan ion $[M+H]^+$ (m/z 305) chizig'i va bir qancha fragmentlangan ion $[M-R]^+$ (m/z 64, 93, 135, 137, 151, 153, 181) chiziqlar kuzatilgan.

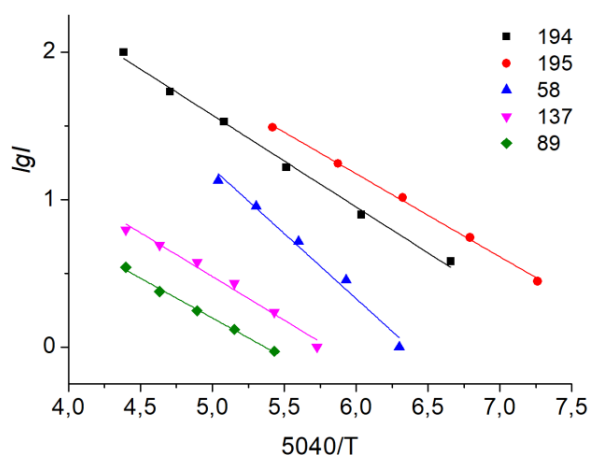
Diazinon molekulasida sirtga pirimidin halqasidagi izopropil va metil guruhi orasidagi azot atomi bilan bog'lanadi. Natijada emitting past haroratlarida odatda assotsiativ reaksiyalar yuzaga keladi, bu diazinon molekulasining $[M+H]^+$ m/z 305 ion chizig'i hosil bo'lganligi bilan asoslangan. Diazinon mass spektridagi fragment ion toklari primidin halqasidan fosforik ester guruhi bilan bog'langan C-O bog'ining va O-P bog'ining uzilishi natijasida shakllanganligi ko'rilgan.

Aldikarb molekulalarining VSI/MS tajribalari oksidlangan volfram emitterda, $T_{em} = 950\text{ K}$ va $T_{K.b.} = 335\text{ K}$ sharoitida o'tkazilgan bo'lib mass-spektri depratonlangan ion $[M-H]^+$ (m/z 189) chizig'i va bir qancha fragmentatsiyaga uchragan ion $[M-R]^+$ (m/z 58, 72, 89, 100, 115) chiziqlaridan tashkil topdi. Fragment ion m/z 115 depratonlangan iondan markaziy uglerod zanjirini 2 ta metil (CH_3) va metiltio guruhi ($-S-CH_3$) tark etishi natijasida hamda m/z 89 bo'lgan fragment ion oksim guruhidan N-C bog'ining uzilishi natijasida shakllanadi, shu bilan birga, m/z 89 ion mass spektrda toklar nisbatining intensivligi yuqoriligini hisobga olsak, bu ion biz ta'kidlagandan boshqa reaksiya kanallari orqali ham shakllanishi mumkin.

VSI tajribalarida statik magnit mass-spektrometri birikmaning monomolekulyar parchalanishlarini aniqlash imkoniyati beradi. Xlordimeformning mass-spektrida $[M+H]^+$, $[M-H]^+$ va $[M-3H]^+$ ionlarining monomolekulyar parchalangan ionlari kuzatildi, ularning 4a,b,c-rasmlarda parchalanish sxemalari ko'rsatilgan. Monomolekulyar parchalanishlar diazinonning $[M-R]^+$ (m/z 135) fragment ionida ham kuzatildi.



4-rasm. Xlordimeformning monomolekulyar parchalanishga uchragan ionlari



5-rasm. Imidokloprid (m/z 194), xlordimeform (m/z 195), atsetamiprid (m/z 58), diazinon (m/z 137), aldikarb (m/z 89) larning asosiy ion toklarining ionlashuv potentsiallarini aniqlash uchun Arrenius grafigi

Ion toklarining emitter haroratiga bog‘liqligi, odatda, tipik xususiyat bo‘lib moddalarning asosiy xususiyatlarini tahlil qilishga yordam beradi. Bu bog‘liqlik ionlashgan zarralar hosil bo‘lishiga olib keladigan kimyoviy reaksiyalar unumdorligining haroratga bog‘liqligidan kelib chiqadi. Imidokloprid, xlordimeform, atsetamiprid, diazinon va aldikarblarning asosiy ion toklarining emitter haroratga bog‘liqliklari emitter sirtida kechadigan degidrogenlanish, gidrogenlanish va dissotsiatsiyalanish reaksiyalarning borishi haqida ma’lumot olishga yordam berdi. Qaralgan asosiy ion toklarining haroratga bog‘liqliklari VSI nazariyasiga binoan $e(V-\phi) \gg kT$ qiyin ionlashuv holatini mos kelishi aniqlandi. Shu vaqtgacha yuqorida ta’kidlangan pestitsidlarning ionlashuv potentsiallari ilgari aniqlanmagan bo‘lib, VSI usulining noyob xususiyatlaridan biri ion toklarining haroratga bog‘liqliklari yordamida potensial ionlashuv energiyalarini baholashdir.

1-jadval

VSI tadqiqotlarida pestitsidlar uchun aniqlangan qiymatlar

Namunalar	Brutto formulalari	Molyar massa, g/mol	Aniqlangan asosiy ionlar, m/z	Ionlashuv potentsiali, V(eV)	Sublimatsiyalanish energiyasi, E_{sub} (eV)
Imidokloprid	$C_9H_{10}ClN_5O_2$	255	194	7,73	0,68
Xlordimeform	$C_{10}H_{13}ClN_2$	196	195	8,1	0,62
Atsetamiprid	$C_{10}H_{11}ClN_4$	222	58	7,89	0,72
Diazinon	$C_{12}H_{21}N_2O_3PS$	304	137	7,1	0,54
Aldikarb	$C_7H_{14}N_2O_2S$	190	89	7,34	0,49

Pestitsidlarning asosiy ion chiziqlari uchun Arrenius grafigi 5-rasmda, ionlashuv potentsiallari esa 1-jadvalda keltirilgan. Knudsen bug‘latkichida organik molekulalar issiqlik ta’sirida termal dissotsiatsiyaga uchrab, boshlang‘ich molekulaning boshqa

shakllariga aylanishi va emitter sirtida moddaning o'ziga xos bo'lmagan ionlarni hosil qilishi mumkin. Shuning uchun o'rganilayotgan insektitsidlarning asosiy ion toklarining eng katta ion tokiga nisbatan logarifmining bug'latkich haroratiga teskari bog'lanishi olingan va Arrenius grafiklari chizilgan. Graflardagi to'g'ri chiziqlar qiyaliklarining parallel bo'lishi ionlarning aynan boshlang'ich molekuladan hosil bo'layotganini ko'rsatadi. Ushbu parallel qiyaliklar orqali moddaning sublimatsiya issiqlik energiyasi baholanib, pestitsidlar uchun olingan qiymatlar 1-jadvalda berilgan.

Dissertatsiyaning to'rtinchi **“Atmosfera bosimi sharoitida organik moddalarning termal desorbsiyasi va termal ionlashuvi”** bobida atmosfera bosimi sharoitida organik moddalarning turli holatdagi qizdirilgan metall sirtlardagi desorbsiyasi va yuqori erish haroratiga ega bo'lgan (sim) emitter sirtlaridagi ionlashuv jarayonlari yoritilgan. Shu bilan birga sirtiy ionlashuv mass spektrometriya usulining faqat vakuum emas, balki atmosfera bosimi sharoitida ham qo'llanilish imkoniyatlari va ionlar hosil bo'lish mexanizmlari haqidagi tadqiqot natijalari keltirilgan.

Leidenfrost hodisasi yordamida termal desorbsiya (LHTD) past uchuvchanlikka ega bo'lgan organik moddalarni mass spektrometrik tahlil qilish uchun qo'llaniladigan usul hisoblanadi. LHTD jarayonida analit eritmasining bir tomchisi qizdirilgan sirtga tomiziladi, u yerda tomchi bug' qatlami hosil qilib, sirt ustida suzib yuradi (levitatsiyalanadi), natijada erituvchi sekin bug'lanib erituvchi ichida analit konsentratsiyasi oshadi. Bug'lanishning so'nggi bosqichida analit qoldiqlari bug' qatlami ustida levitatsiyalanadi va desorbsiya sodir bo'lib, ionlashuv usullari yordamida ionlar hosil qilinib mass spektrometr yordamida aniqlanadi.

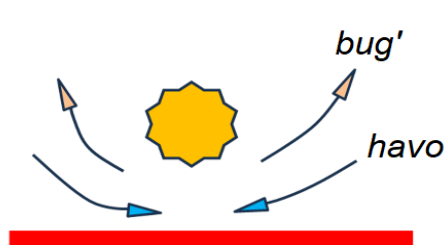
LHTDning samaradorligi sirt morfologiyasiga bog'liq ekanligini ikki xil tadqiqot yordamida o'rganilgan.

Birinchi tadqiqotda silliqiligi turli darajadagi sirtlarning LHTD jarayoniga ta'siri tadqiq qilindi. Analitning desorbsiya vaqtini qisqartirish va degradatsiyani kamaytirish maqsadida eritma tomiziladigan patronli bug'latkich sirti alimuniy oksidi asosidagi 5000 (3 mkm) grit raqamli abraziv va 2000 (10 mkm), 1000 (20 mkm), 400 (50 mkm), 100 (200 mkm)) grit raqamli abraziv (qum qog'oz) lar bilan sayqallab tadqiqotlar olib borildi. Quyida ushbu tadqiqot natijalari qisqacha bayon qilindi.

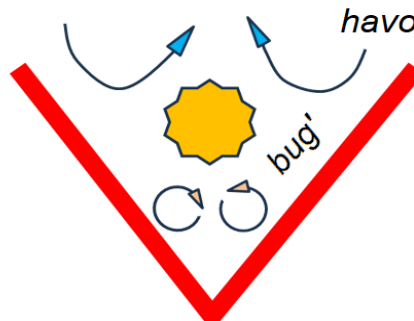
Turli abrazivlar bilan sayqallangan patronli bug'latkich sirtiga metanol tomizilganda tomchi sirtga tegmasdan levitatsiyalanadi va shu jarayonda doimiy bug'lanish hisobiga undagi analitlar (kokain, morfin) konsentratsiyasi ortadi. Metanol to'liq bug'langach, tomchi tarkibidagi analit qoldiqlari sirtida qolib, sirt bilan bevosita kontaktda termal parchalanadi. Keyin esa ana shu qoldiqlarning sublimatsiyasi natijasida ularning levitatsiyasi qayta boshlanadi.

Tajriba natijalari sirt dag'alligi ortishi bilan analit qoldiqlari sirtga tegmasdan levitatsiyalanishini ko'rsatdi. 400 va 100 grit abraziv bilan sayqallangan sirtlarda analitlarning termal parchalanishi kuzatilmadi, ya'ni kokain va morfin qoldiqlari qizdirilgan sirtida levitatsiyalanganda, parchalanish sezilarli kamayadi. Bu sirt dag'alligi ortishi bilan qizdirilgan sirtan qoldiqqa issiqlik o'tkazuvchanligining

ortishi bilan bog'liq bo'ladi. Kutilganidek, kokain va morfin qoldiqlarining bug'lanish vaqtlari dag'allik ortishi bilan qisqaradi va $[\text{kokain} + \text{H}]^+$ va $[\text{morfin} + \text{H}]^+$ ning eng kuchli ionlar intensivliklari 100 grit raqamli abraziv bilan sayqallanganda sirtida kuzatiladi. Qoldiqning tez qizdirilishi termal parchalanish kamaytirilishini ko'rsatadi, bu olingan natijalar Beuler va boshqalar tomonidan ilgari surilgan nazariyaga mos keladi.

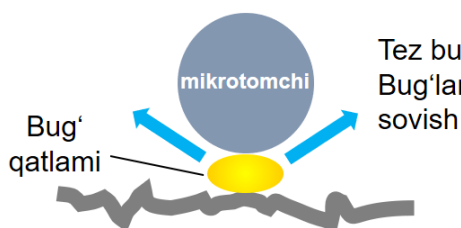


(a) Tekis sirt
(konveksiya orqali sovish)

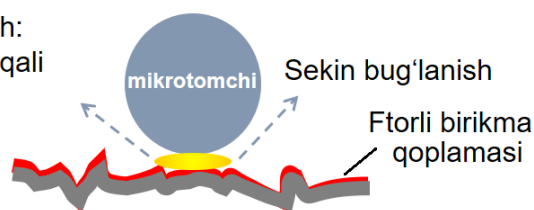


(b) Dag'al sirt
(gazning turg'unligi tufayli qizish)

6-rasm. Namuna qoldig'ining patronli bug'latkich sirtida levitatsiyalanishining konseptual ko'rinishi.



(a) Qoplamasiz metall



(b) Ftorli birikma qoplangan metall

7-rasm. Qizdirilgan, qoplamasiz va ftorli birikma qoplangan metall sirtidan eritma tomchisining bug'lanish jarayonining konseptual ko'rinishi.

6a va 6b-rasmlarda analit qoldiqlarning tekis sirtida va dag'al sirtida levitatsiyalanishining sxematik ko'rinishi tasvirlangan. Qizdirgich sirtidagi analit qoldig'i o'z bug'i ustida levitatsiyalanadi. 6a-rasmdagi tekis sirt uchun analit qoldig'ining pastki yuzasidan bug'langan bug' konveksiya orqali yuqoriga oqadi va havo qarshi oqimi yordamida harakatlanadi. Bug'lanish natijasida sovish va atrofda "sovuq" havo oqimi kelishi tufayli analit qoldig'ining harorati ko'tarilishi kamayadi, natijada qoldiq sekin bug'lanadi. Aksincha, 6b-rasmda pastki qismdagi bo'shliqdagi bug' qizdirgich devoriga qamalib, analit qoldig'i va qizdirgich devori o'rtasida samarali issiqlik uzatilishi yuz beradi. Boshqacha qilib aytganda, 6b-rasmdagi dag'al sirtning issiqlik zichligi 6a-rasmdagi tekis sirtga qaraganda yuqori bo'ladi. Analit qoldig'ining pastki qismidagi bo'shliqda bug'ning qamalib qolishi tufayli qoldiqning harorati oshadi, bu esa analit qoldig'ining bug'lanish vaqtini qisqartiradi. Ikkinchi tadqiqotda qoplamasiz va ftorli birikma qoplangan sirtlarning LHTDga ta'siri o'rganildi. LHTD jarayonida analitning desorbsiya vaqtini qisqartirish va bu

jarayonga modda turi xossalarining ta'sirini o'rganish maqsadida o'tkazilgan tadqiqot natijalari qisqacha bayon qilindi.

7a-rasmda metanol tomchisining qizdirilgan qoplamasiz metall sirtidagi holatining sxematik ko'rinishi tasvirlangan bo'lib bular orqali olib borgan tadqiqotimizning ilmiy asoslari ochib berildi. Qizdirilgan tomchi sirtida levitatsiyalanadi. Tomchi tagidagi qalin bug' qatlami hisobiga bug'lanish orqali sovish vujudga keladi. Aksincha, agar metall sirt 7b-rasmda ko'rsatilgandek ftorli birikma bilan qoplangan bo'lsa, metanol bug'i va sirt o'rtasidagi issiqlik uzatish samaradorligi qoplamasiz metall sirtiga nisbatan kamayadi, chunki ftorli birikmaning issiqlik o'tkazuvchanligi ($\sim 0,25 \text{ W/m}\cdot\text{K}$) zanglamaydigan po'latnikiga ($\sim 20 \text{ W/m}\cdot\text{K}$) nisbatan ancha kichik. Bug' va sirt o'rtasidagi nisbatan kam issiqlik almashinuvi metanol tomchisining bug'lanish orqali sovishini kamaytiradi va 7a-rasmdagi holatga nisbatan tezroq harorati ko'tariladi. Ya'ni, ftorli birikma qoplangan metall sirt yordamida tomchining tez qizish holati ro'y beradi. Bu analit molekulalarining "tez" bug'lanish holatini tushuntirishga yordam beradi.

Morfinda olingan EIX grafiklari "tez" bug'lanish holati faqat Leidenfrost hodisasining oxirgi bosqichida kuzatilishini tasdiqladi. 7b-rasmda ko'rsatilgan sirt morfologiyasi kichikroq bug' qatlamining shakllanishiga olib keladi, bu esa konsentratsiyalashgan tomchining yanada samaraliroq qizishiga olib keladi va "tez" bug'lanishning yuzaga kelishi uchun qulay sharoit yaratadi.

Mazkur ishda, metanol tomchilarining yashash vaqti qayta-qayta takrorlansada barqaror chiqmadi, chunki tomchi sirt ustida tasodifiy harakatlanadi. Morfinning amfifilik tabiati tufayli tomchi yuzasi morfin molekulalari bilan boyiydi. Raul qonuniga ko'ra, morfin eritmali metanol tomchisining bug' bosimi sof metanol eritmasiniki bilan solishtirganda kam bo'ladi, bu esa tomchining bug'lanishi tufayli sovishining kamayishiga olib keladi. Bug' bosimi nisbatan kam bo'lgani sababli, tomchi sirt bilan tasodifiy o'zaro ta'sir paytida qizdiruvchi sirtga yaqinlashadi va kuchli issiqlik olish ehtimoli oshadi, bu esa tomchining butunlay bug'lanish vaqtining qisqarishiga olib keladi. LHTD jarayonida qizdiruvchi metall sirtining holati hamda tomchi sirtining holati desorbsiyaga ta'sir qiluvchi muhim omillar bo'lib qaraldi.

Atmosfera bosimi sharoitida sirtiy ionlashuv tadqiqotlari sirti oksidlangan volfram (W), reniy (Re), palladiy (Pd), molibden (Mo), titan (Ti) va zanglamaydigan po'lat (SUS 304) sim emitterlari yordamida o'tkazildi, tadqiq qilinuvchi moddalar sifatida azot asosli organik moddalar karbaril, papaverin, kokain, morfinlar tanlandi. ABSI tajribalarida mass spektrda VSI nikidan farqli ravishda asosiy ionlar protonlangan $[M+H]^+$ ionlar paydo bo'ldi. 8-rasmda VSI va ABSI jarayonlarida ionlar hosil bo'lish mexanizmlarining nazariy sxematik ko'rinishi tasvirlangan.

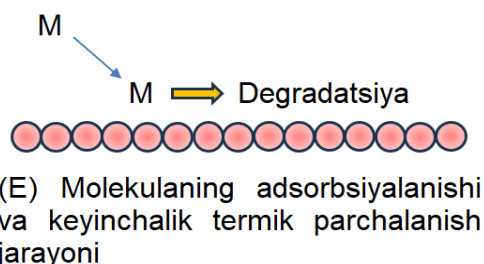
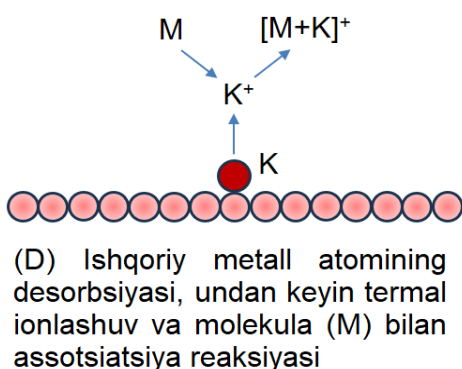
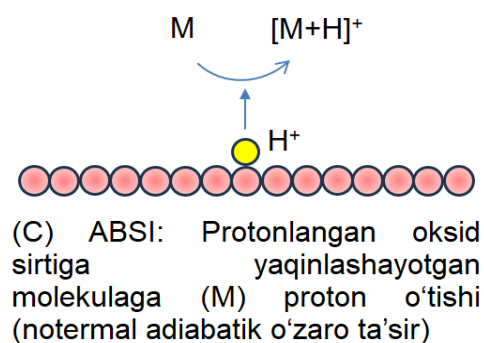
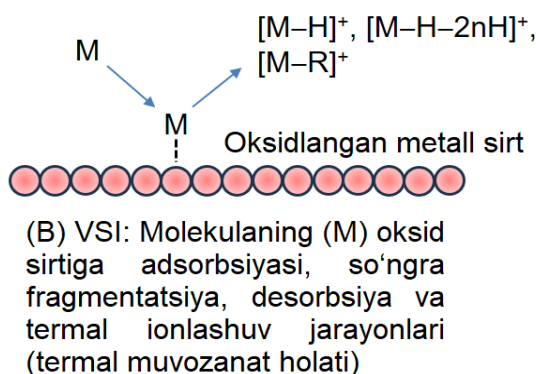
Yuqorida o'tkazilgan tadqiqotlarda analit molekulalarining desorbsiyasi asosan leidenfrost hodisasining oxirgi bosqichida yuz berishi aniqlangan edi. Biroq ABSI tadqiqotlarda karbaril, papaverin, kokain va morfin molekulalarining protonlangan $[M+H]^+$ ionlari faqat tez bug'lanish jarayonida aniqlandi LHTD jarayonida aniqlanmadi. Buga sabab namuna eritilgan erituvchi metanolning LHTD jarayonidagi bug'i ta'sirida emitter sirtining jiddiy "zaharlanishi" yuzaga kelishi

ko'rsatiladi. VSI tajribalarida Zandberg va Rasulevlar emitter sirtining organik bug'lar ta'sirida "zaharlanishi" yuzaga kelishi haqida xabar berganlar. Shu nuqtayi nazardan, organik erituvchilar ishtirokida amalga oshiriladigan LHTD usuli ABSI usuli uchun qulay analit desorbsiya qilish usuli emas. Shulardan kelib chiqib suvli eritmalar yordamida LHTD/ABSI usulini amalga oshirish barqaror va samarali natijalar berishi mumkinligini ta'kidlaymiz.

VSI usulida $[M-H]^+$ ionlari $[M+H]^+$ ionlariga qaraganda yuqori samaradorlik bilan aniqlangan. ABSI usulida esa faqat $[M+H]^+$ ionlari aniqlanib, $[M-H]^+$ ionlari kuzatilmadi. Zandberg va Rasulov $[M+H]^+$ ionlarining hosil bo'lish mexanizmini, past haroratlarda dissotsiatsiyaning reaksiyalaridan ko'ra tezroq sodir bo'ladigan assotsiatsiyaning reaksiyalari natijasida hosil bo'lishi mumkinligini taxmin qilganlar. Ular $[M+H]^+$ radikal zarralarining emitter sirtida, adsorbsiyalangan



(A) H_2O ning metall oksid sirtiga kimyoviy adsorbsiyasi



8-rasm. VSI va ABSI jarayonlarida ionlar hosil bo'lish, kationlashish va metall oksid qatlamining zaharlanish mexanizmlari.

molekulalarning vodorod bog'lari orqali o'zaro ta'sirlashuvi va keyinchalik bu assotsiatsiyalangan komplekslarning parchalanishi natijasida yuzaga kelishini taklif qilishgan. Biroq, bizning fikrimizcha, $[M+H]^+$ radikal zarralarning shakllanishi ehtimoldan yiroq, chunki ko'pgina molekulalarning vodorod atomiga bo'lgan

moyilligi juda past bo'lib, $[M+H]^+$ kabi barqaror oraliq mahsulotlarning hosil bo'lishini izohlab bera olmaydi. Shu sababdan ABSI usulida hosil bo'ladigan $[M+H]^+$ ionlari va VSI usulida hosil bo'ladigan $[M-H]^+$ ionlarining hosil bo'lish mexanizmlari butunlay farq qiladi, sababi vakuumda va atmosferada gaz molekulalarining harakatlanishidagi juda katta farqqa bog'liq. Buda analit molekulalari emitter sirtiga vakuumdagi holatiga nisbatan minglab marta sekinroq yetib borishini tushinish qiyin emas.

Mazkur ishda karbaril, papaverin, kokain va morfin moddalari uchun ABSI orqali faqat $[M+H]^+$ ionlarining paydo bo'lishi va $[M-H]^+$ ionlarining paydo bo'lmasligi analit molekulalari emitter sirtiga adsorbsiyalanishidan oldin protonlanganligini ko'rsatishi mumkin. Ya'ni, analit molekulalari bilan qizigan qattiq sirt o'rtasidagi o'zaro ta'sir muvozanatga yetmagan (ya'ni, adiabatik) bo'lib, natijada analitlarning issiqlik orqali parchalanishi sezilarli darajada kamaytirilgan bo'ladi. Bizning taxminimizcha, protonlar 8A – rasmda ko'rsatilganidek, suv bug'i (havodagi namlik) ning qizdirilgan metall oksidi bilan o'zaro ta'siri natijasida emitter sirtida allaqachon hosil bo'lgan; H_2O bug'i Lyuis kislotasi sifatida oksid yuzasiga adsorbsiyalanadi, dissotsiatsiyalanadi va Brensted kislotasi sifatida protonlangan metall oksidini hosil qiladi. Ko'plab metall oksidlar qattiq Brensted kislotalari (geterogen katalizatorlar) kabi harakat qilishi va asos molekulalariga proton berishga moyil bo'lishi ma'lum.

Protonlanish reaksiyasi protonlangan metall oksididan gaz fazasidagi analit molekulalariga tunnel o'tish reaksiyasi orqali amalga oshishi mumkin (8C-rasmda ko'rsatilgan). Ushbu modelga ko'ra, protonlangan metall oksid kislorod kislotasi sifatida harakat qiladi. Mazkur nazariy faraz asosida shuni ta'kidlash mumkinki, metall oksidlariga qaraganda yuqori protonga moyillik analitlarning selektiv ravishda protonlanishiga sabab bo'ladi. Bu, VSI ning nima uchun kislorod asosli birikmalarga qaraganda ancha yuqori protonga moyillikka ega bo'lgan azot asosli birikmalariga nisbatan yuqori selektiv ekanligini tushuntirishi mumkin.

ABSI mass spektrlarida o'rganilgan barcha analitlarning natriyli va kaliyli shakllari aniqlangan. Azot asosli birikmalarning natriy va kaliy bilan bog'langan shakllari uchun bog'lanish energiyasi eng ko'pi bilan $30 \text{ kkal} \cdot \text{mol}^{-1}$ ni tashkil etadi, shuning uchun ular taxminan 300°C dan yuqori haroratda termal jihatdan barqaror klaster ionlarini hosil qila olmaydi. Shu boisdan, gaz fazasida termal ionlashuv natijasida hosil bo'lgan Na^+ va K^+ ionlari ionlar manbasi hududida – ya'ni, harorat barqaror klaster ionlar hosil bo'lishi mumkin darajada past bo'lgan sohada – klaster ionlarini hosil qiladi. Bunday klasterlanish reaksiyasi oraliq kompleks $[\text{Na}^+(\text{K}^+)\cdots\text{M}]^+$ ni barqarorlashtirish uchun uchinchi zarrachani talab qiladi. ABSI holatida oraliq kompleks (10^{10} Hz chastotada) N_2 va O_2 molekulalari bilan to'qnashadi va natijada klasterlanish reaksiyasi samarali tarzda sodir bo'ladi (8D-rasmga qarang). VSI usulida analitlarning natriyli va kaliyli klaster ionlari aniqlanmagan. Buning sababi shundaki, VSI sharoitida klaster hosil bo'lishini ta'minlaydigan uchinchi zarracha deyarli mavjud bo'lmaydi. VSI uchun natriyli yoki kaliyli klaster ionlarining yo'qligi, klaster ionlari qizdirilgan metall emitteridan to'g'ridan-to'g'ri bug'lanib chiqmasligini ham ko'rsatadi.

XULOSA

Tadqiqot ishi doirasida erishilgan natijalaridan kelib chiqqan holda quyidagi xulosalar qilindi:

1. Pestitsidlar (atsetamiprid, aldikarb, diazinon, imidokloprid, xlordimeform) ning sublimatsiyalanish energiyalari va aniqlangan asosiy ion toklarining ionlashuv potentsiallari baholandi. Olingan VSI mass-spektrlari nisbatan kam chiziqli bo'lib, asosan M^+ , $[M-H]^+$ va $[M-R]^+$ ion chiziqlaridan tashkil topgan. Ionlashuv potentsiallarining oksidlangan emitterning chiqish ishiga yaqin qiymatlarni qabul qilganligi Saha-Lengmuir formulasiga asosan VSI mass-spektrlarida fragment ionlarning samarali ionlashuvini asoslaydi.
2. Pestitsidlar uchun oksidlangan volfram emitterda olingan ionlar intensivligi metall emitterda olingan ionlar intensivligidan $\sim 10^3$ marta katta ekanligi aniqlandi. Bu farq emitter sirtining katalitik aktivliklarining farq qilishi bilan asoslandi. Shu bilan birga mass spektrda ionlar tarkibi o'zgarishsiz qolganligi aniqlandi.
3. Patronli bug'latkich sirtining dag'alligi orttirilishi natijasida ionlar intensivligi bir tartibga ortishi aniqlandi. Bu dag'al sirt va tomchi orasidagi samarali issiqlik uzatilishi natijasida desorbsiyalangan molekulalarning konsentratsiyasi oshishi bilan izohlandi.
4. Ftorli birikma qoplangan sirtida o'tkazilgan tajribalar molekulaning termal degradatsiyasining va umumiy desorbsiya vaqtlarining ikki martagacha qisqarishini ta'minladi. Bunga sabab, ftorli birikma qoplangan sirtga tomizilgan eritma tomchisining harorati tez ko'tarilishi bilan izohlandi.
5. Ftorli birikma qoplangan sirtida morfin molekulalarining tez bug'lanish tufayli faqat protonlangan ionining hosil bo'lishini morfinning amfifil tabiati bilan izohlandi. Bu holatdan ftorli birikma qoplangan sirtida sirt aktiv xususiyatga ega bo'lgan moddalar tez va samarali aniqlanishi xulosa qilindi.
6. Tajriba yo'li bilan LHTD jarayonining so'nggi lahzasida namuna qoldiqlarining levitatsiyasi aniqlanib, protonlangan molekulalar minimal fragmentatsiya bilan yuqori sezgirlikda qayd etilishi mumkinligi isbotlandi.
7. ABSI tadqiqotlarida protonlangan ionlar asosan tez bug'lanish (TB) jarayonida paydo bo'ldi, LHTD jarayonida aksariyat emitter sirtlarida kuzatilmadi, bu atmosferada emitterlarning sirtida organik bug'lar ta'sirida LHTD jarayoni sodir bo'lguncha zaharlanish yuzaga kelishi bilan asoslandi.
8. ABSI da protonlangan molekulalar asosiy ion sifatida aniqlandi va VSI ga xos bo'lgan deprotonlangan va fragmentlangan ionlar kuzatilmadi. ABSI jarayonida asosiy ionlar sifatida protonlangan molekulalarning hosil bo'lishi shuni ko'rsatadiki, namuna molekulalari qizdirilgan sirtga adsorbsiyalanmasdan sirt yaqinida protonlangan metall oksid sirtlari bilan gaz fazasida proton almashinuvi reaksiyalari orqali protonlanadi. Ya'ni, protonlangan metall oksidlar Bronsted kislorod kislotalari sifatida harakat qilishi haqida xulosa qilindi.

**НАУЧНЫЙ СОВЕТ DSc.02/30.12.2019.FM/T.65.01 ПО ПРИСУЖДЕНИЮ
УЧЕНЫХ СТЕПЕНЕЙ ПРИ ИНСТИТУТЕ ИОННО-ПЛАЗМЕННЫХ
И ЛАЗЕРНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ**

ИНСТИТУТ ИОННО-ПЛАЗМЕННЫХ И ЛАЗЕРНЫХ ТЕХНОЛОГИЙ

АХМЕДОВ ШЕРЗОД МАМАРАИМ УГЛИ

**ТЕРМИЧЕСКАЯ ДЕСОРБЦИЯ И ТЕРМИЧЕСКАЯ ИОНИЗАЦИЯ
НЕКОТОРЫХ ОРГАНИЧЕСКИХ СОЕДИНЕНИЙ В УСЛОВИЯХ
ВАКУУМА И АТМОСФЕРНОГО ДАВЛЕНИЯ**

01.04.04 – Физик электроника

**АВТОРЕФЕРАТ ДИССЕРТАЦИИ ДОКТОРА ФИЛОСОФИИ (PhD) ПО ФИЗИКО-
МАТЕМАТИЧЕСКИМ НАУКАМ**

Ташкент - 2025

Тема диссертации доктора философии (PhD) по физико-математическим наукам зарегистрирована в Высшей аттестационной комиссии при Министерстве высшего образования, науки и инноваций Республики Узбекистан за номером B2025.1.PhD/FM1241.

Докторская диссертация выполнена в Институте ионно-плазменных и лазерных технологий им. У.А. Арифова.

Автореферат диссертации на трех языках (узбекский, русский, английский (резюме)) размещен на веб-странице Научного совета (www.iplt.uz) и на Информационно-образовательном портале «Ziyonet» (www.ziyonet.uz).

Научный руководитель:

Усманов Дилшадбек Турсунбоевич
доктор физико-математических наук, профессор.

Официальные оппоненты:

Умирзаков Болтахужа Эрматович
доктор физико-математических наук, профессор

Кахрамонов Бобуржон Рузибоевич
доктор философии по физико-математическим наукам (PhD)

Ведущая организация:

Национальный университет Узбекистана

Защита диссертации состоится « 16 » декабрь 2025 года в 14³⁰ часов на заседании Научного совета DSc.02/30.12.2019.FM/T.65.01 при Институте ионно-плазменных и лазерных технологий АНРУз. (Адрес: 100125, г.Ташкент, улица Дўрмон, д. 33. Тел./факс: (+99871) 263-32-54, e-mail: info@iplt.uz, зал заседаний Института ионно-плазменных и лазерных технологий).

Диссертация зарегистрирована в Информационно-ресурсном центре Института ионно-плазменных и лазерных технологий (регистрационный номер № 18), с диссертацией можно ознакомиться в ИРЦ (Адрес: 100125, г.Ташкент, улица Дўрмон, д. 33. Тел./факс: (+99871) 263-32-54).

Автореферат диссертации разослан « 03 » декабрь 2025 г.

(реестр протокола рассылки № 18 от декабрь 2025 г.).



Х.Б. Ашуров
председатель Научного совета по
присуждению ученых степеней, д.т.н.,
профессор

И.Д. Ядгаров
ученый секретарь Научного совета по
присуждению ученых степеней, д.ф.-м.н.,
профессор

У.К. Махманов
председатель научного семинара при
Научном совете по присуждению ученых
степеней, д.ф.-м.н., профессор

ВВЕДЕНИЕ (аннотация диссертации доктора философии (PhD))

Актуальность и значимость темы диссертации. Одним из важнейших направлений современной науки является проведение высокоточного анализа органических веществ, оказывающих вредное воздействие на здоровье человека. В настоящее время для определения следовых количеств таких веществ применяются аналитические методы, обладающие преимуществами в чувствительности, быстродействии, эффективности, надежности и селективности. Особенно актуальной научной задачей является совершенствование масс-спектрометрических технологий ионизации, которые в полной мере отвечают этим требованиям. В этой связи необходимо глубоко изучить процессы термодесорбции (ТД) и термической ионизации (ТИ), протекающие в условиях вакуума и атмосферного давления при анализе органических веществ, а также разработать их теоретические и экспериментальные основы. Кроме того, исследование закономерностей ионизации многочисленных органических молекул, механизмов десорбции и влияния физико-химических свойств на процессы ионизации представляет собой задачу как фундаментального, так и прикладного характера.

В последние годы в ведущих научных центрах мира проводятся систематические исследования по процессам ТД и ТИ. В частности, методы термодесорбции (ТД), обеспечивающие переход трудноиспаряющихся органических веществ в газовую фазу с помощью масс-спектрометрии, отличаются своей эффективностью и способностью сохранять молекулярную структуру. В ходе процесса ТД минимальное фрагментирование молекул способствует формированию молекулярных ионов в качестве основных. ТИ, в свою очередь, является мягким методом ионизации, снижающим степень фрагментации молекулярных ионов. С этой точки зрения, изучение таких методов, как ЛХТД (термодесорбция с использованием эффекта Лейденфроста), ВСИ (вакуумная поверхностная ионизация) и АБСИ (поверхностная ионизация при атмосферном давлении), представляет актуальный интерес с позиции физической электроники. Развитие данных исследований открывает возможности создания портативных масс-спектрометрических приборов, работающих при атмосферном давлении, что послужит основой для разработки новых технологических решений в области прикладной электроники и экологического мониторинга.

В последние годы в Узбекистане в области физической электроники достигнуты значительные результаты в ряде фундаментальных и прикладных исследований, таких как изучение процессов ионизации психотропных лекарственных средств, прямое определение следовых количеств наркотических веществ в биожидкостях, а также оценка чувствительности и селективности детекторов поверхностной ионизации. В Указе Президента Республики Узбекистан № ПФ-36 от 16 февраля 2024 года «О государственной регистрации пестицидов, содержащих активные вещества», а также в Указе № ПФ-73 от 6 мая 2024 года «О мерах по пресечению незаконного оборота

наркотических средств и психотропных веществ» определен ряд важных задач. В этом контексте исследование закономерностей ионизации и основных прекурсорных ионов пестицидов и алкалоидов в условиях вакуума и атмосферного давления приобретает особую значимость.

Данное диссертационное исследование в определенной степени соответствует задачам, предусмотренным Указом Президента Республики Узбекистан № ПФ-4947 от 7 февраля 2017 года «О Стратегии действий по дальнейшему развитию Республики Узбекистан», Постановлением № ПК-2789 от 17 февраля 2017 года «О мерах по дальнейшему совершенствованию деятельности Академии наук, организации, управления и финансирования научно-исследовательских работ», а также Указом № ПФ-5853 от 23 октября 2019 года «Об утверждении стратегии развития сельского хозяйства Республики Узбекистан на 2020–2030 годы».

Соответствие исследования приоритетным направлениям развития науки и технологий Республики. Научно-исследовательская работа была выполнена в рамках приоритетных направлений III: «Энергетика, энергосбережение, транспорт, машиностроение и приборостроение; современная электроника, микроэлектроника, фотоника, развитие электронной приборостроительной техники» и ПФИ-2: «Физика, астрономия, энергетика и машиностроение».

Степень изученности проблемы. Процессы ТД и ТИ в условиях вакуума с использованием метода поверхностной ионизации (ПИ) начали изучаться с середины прошлого века. Впервые явление ПИ было открыто Кингдоном и Лэнгмюром (1923), причем процесс применялся в основном для неорганических веществ. Позднее, в 1967 году, У.Х. Расулев и Е.Я. Зандберг впервые заложили основы применения метода ПИ к органическим веществам. Они глубоко исследовали закономерности ПИ для многих азотсодержащих органических соединений, в частности аминов, гидразина и их производных, показав высокую селективность и чувствительность ПИ, определив энергию (потенциал) ионизации, механизмы адсорбции и кинетику ТД для этих соединений. Эти исследования послужили основой для метода поверхностной ионизации в условиях вакуума (ПИВ), который имеет важное значение в анализе органических веществ, особенно фармацевтических и токсичных соединений. Д.Т. Усманов и др. (2010, 2020) продолжили это направление, разработав методы прямого определения опиатных веществ, таких как омнопон и морфин, с использованием ПИВ. Эти работы показали возможности применения метода в судебной медицине, мониторинге лекарственных веществ и обеспечении экологической безопасности.

Область ТД и ТИ в условиях атмосферы начала развиваться относительно позже — с середины 1980-х годов. Т. Фудзии и Х. Аримото (1985), развивая ТИ-детекторы на основе платиновых эмиттеров, показали высокую чувствительность для азотсодержащих органических веществ. Данное исследование стало важным шагом в изучении механизмов ПИАД, однако оно в основном было направлено на область газовой хроматографии (ГХ) и не

раскрывало полностью общие закономерности ТД и ТИ органических веществ.

Ряд учёные (Р.Г. Кукс, Университет Пердью, США; Т.Й. Кауппила, Хельсинкский университет, Финляндия; З. Оуян, Университет Пердью, США; Х. Чэнь, Китай; Джон Б. Фенн, Университет Вирджинии, США) глубоко исследовали закономерности десорбции и ионизации различными методами. В частности, Х. Чэнь развил методы химической ионизации при атмосферных условиях и другие методы ионизации, работающие при атмосферном давлении.

До настоящего времени законы ТД и ТИ для труднолетучих органических соединений, в частности пестицидов и алкалоидов, в условиях вакуума и атмосферы подробно не изучены, не определены различия между их ионными составами и основными ионными интенсивностями, а также физические параметры, служащие для оценки процессов десорбции и ионизации.

Связь исследования с планами научно-исследовательских работ научного учреждения, в котором выполнена диссертация. Ф-ФА-2021-509 – “Механизмы формирования многокомпонентных наноструктур на поверхности неорганических (Ti, W, WO_x, TiO₂, Si, SiO₂) и органических (полимеры) материалов при их имплантации ионами металлов и адсорбции молекул активных органических соединений”, “Взаимодействие многоатомных частиц с поверхностями твёрдых тел в вакууме и воздушной среде, разработка новых методов ионизации физиологически активных органических соединений” (2022), “Исследование процессов термоэлектронной и вторичной эмиссии веществ, употребляемых не по назначению, с поверхности твёрдого тела” (2025).

Цель исследования. Цель исследования заключается в изучении закономерностей термической ионизации и термической десорбции некоторых органических веществ в условиях вакуума и атмосферы с использованием масс-спектрометрических методов и в развитии научных основ этих процессов.

Задачи исследования.

Для выполнения исследовательской работы были определены следующие научные задачи:

- провести экспериментальное исследование процессов ПИВ (вакуумной поверхностной ионизации) для пестицидов (ацетамиприд, альдикарб, диазинон, имидаклоприд, хлордифенотом) и изучить закономерности ионизации молекул на окисленных и металлических поверхностях, а также провести их сравнение;

- определить влияние степени шероховатости поверхности испарителя на процесс ТД (термодесорбции) образца;

- определить влияние поверхности испарителя, покрытой фторсодержащим соединением, на процесс ТД образца;

- экспериментально исследовать влияние свойств поверхности на термодесорбцию трудноиспаряющихся органических веществ в процессе ТДЯЛ (термодесорбции с использованием эффекта Лейденфроста);

- проанализировать механизм образования протонированных ионов $[M+H]^+$, возникающих в качестве основных ионов в процессе ПИАД (поверхностной ионизации при атмосферном давлении);

- сравнить масс-спектрометрические результаты, полученные в экспериментах ПИВ и ПИАД.

Объект исследования. Пестициды – ацетамиприд, альдикарб, диазинон, имидаклоприд, хлордимеформ, карбарил; алкалоиды – морфин, папаверин; стимулирующее вещество – кокаин.

Предмет исследования. Предметом исследования являются закономерности ТД и ТИ некоторых органических веществ (пестицидов, алкалоидов и стимуляторов) в условиях вакуума и атмосферы, а именно механизмы ионизации, их температурные зависимости и физико-химические свойства, изученные с использованием методов ПИ/МС, ПИАД и ТДЯЛ, а также влияние морфологии поверхности на ТД.

Методы исследования. В исследовании использованы следующие методы: ПИВ/МС, ПИАД, ТДЯЛ, газовая хромато-масс-спектрометрия (ГХ-МС), метод графика Аррениуса для определения энергий сублимации пестицидов.

Научная новизна исследования. Научная новизна исследования заключается в следующем:

- впервые для пестицидов (альдикарб, диазинон, ацетамиприд, хлордимеформ, имидаклоприд) с помощью процесса ПИВ были определены основные ионы в их масс-спектрах, а также оценены энергии сублимации и потенциалы ионизации;

- установлено, что интенсивность ионов, образующихся на окисленной поверхности эмиттера, примерно в 10^3 раз выше, чем на металлической поверхности;

- выявлено, что увеличение шероховатости поверхности испарителя с патронной структурой приводит к эффективной передаче тепла между поверхностью и каплей, что значительно влияет на рост интенсивности ионов;

- в процессе ТД на поверхности, покрытой фторсодержащим соединением, вследствие низкой теплопроводности между поверхностью и каплей наблюдается уменьшение охлаждения за счет испарения, что приводит к быстрому повышению температуры капли и, как следствие, к сокращению времени термической деградации и общей десорбции образца;

- установлено, что при ТД раствора морфина, нанесённого на поверхность, покрытую фторсодержащим соединением, из-за поверхностной активности морфина (его склонности к накоплению внутри и на поверхности капли) под действием ТД образуются только протонированные ионы $[M+H]^+$ без процессов разложения;

– впервые было установлено, что механизм образования протонированных ионов $[M+H]^+$ в методе ПИАД реализуется через реакции обмена протонами, то есть молекулы действуют как кислоты Бренстеда;

– в масс-спектрах ПИАД основными ионами определены протонированные молекулы, при этом не наблюдались депротонированные и фрагментированные ионы, характерные для ПИВ, что связано с протеканием реакций обмена протонами в адиабатическом процессе (без теплообмена), в результате чего не происходило фрагментации ионов.

Практические результаты исследования. Пестициды в вакуумных условиях подчиняются закономерностям термической ионизации (ТИ), что способствует развитию метода масс-спектрометрии с поверхностной ионизацией. Кроме того, индикаторные ионы пестицидов, определённых методом ВПИ (альдикарб (m/z 89), диазинон (m/z 137), ацетамиприд (m/z 58), хлордимеформ (m/z 195), имидаклоприд (m/z 194)), позволяют проводить анализ остаточных количеств этих веществ в реальных образцах. Проведённые при атмосферном давлении исследования влияния различной морфологии поверхности на термическую десорбцию (ТД), а также использование различных, труднорастворимых металлических эмиттеров в исследованиях АБСИ открывают возможности оптимизации источников ионизации в масс-спектрометрии. Это, в свою очередь, создаёт основу для разработки в будущем портативных приборов, основанных на термической ионизации.

Достоверность результатов исследования. Достоверность результатов обеспечивается применением методов ПИ/МС, ПИАД, ТДЯЛ, ГХ-МС, подробным и полным анализом экспериментальных условий и статистики, использованием современных высокоточных измерительных приборов; полученные экспериментальные данные обработаны статистическими методами с учетом возможных ошибок и основаны на тщательных расчетах. Экспериментальные результаты и выводы сопоставлены с данными современных исследований, посвященных механизмам ионизации труднолетучих органических соединений.

Научная и практическая значимость результатов исследования. Научная значимость: исследование впервые выявило физико-химические закономерности процессов ТД и ТИ некоторых органических веществ в условиях вакуума (ПИ/МС) и атмосферы (ПИАД, ТДЯЛ) на различных поверхностях (окисленных, металлических, полированных, с фторированным покрытием) путем систематического сравнения. Установлены механизмы образования ионов $[M-H]^+$ и $[M-R]^+$ в вакууме и $[M+H]^+$ в условиях атмосферного давления, выявлена зависимость протонного обмена и диссоциативных реакций от условий. Впервые экспериментально определены потенциалы ионизации и энергии сублимации пестицидов.

Практическая значимость: результаты, полученные методами ПИ/МС и ПИАД, а также определенные индикаторные ионы позволяют с высокой чувствительностью и селективностью определять пестициды и алкалоиды в биообразцах (пищевых продуктах, воде, биологическом материале). Эти

методы могут быть применены в сельскохозяйственной безопасности и судебной медицине. В процессе ТДЯЛ установлено, что увеличение шероховатости поверхности и нанесение фторсодержащего покрытия сокращает время десорбции вещества и повышает эффективность ионизации. Это может служить технической основой для разработки портативных устройств, обеспечивающих экспресс-анализ в мониторинге окружающей среды и токсикологии. Полученные закономерности и методы могут быть использованы при развитии масс-спектрометрических приборов и для создания нового поколения аналитических устройств.

Внедрение результатов исследования. В рамках диссертационной работы следующие научные результаты были внедрены в практику:

Окисление тугоплавких металлов, используемых в качестве эмиттера в процессе поверхностной ионизации при атмосферном давлении, – вольфрама (W), рения (Re), палладия (Pd), молибдена (Mo), титана (Ti) и нержавеющей стали (SUS 304) при температуре около 600 °С, а также сокращение времени десорбции аналита в процессе термической десорбции по механизму Лейденфроста (LHTD) за счёт увеличения шероховатости поверхности металлического испарителя (SUS 304) и её фторирования – были использованы в узбекско-индийском совместном фундаментальном проекте «Термоэлектрические свойства и процессы самоорганизации силикатов, легированных оксидами металлов» (Uzb-Ind-2021-78), что подтверждается справкой Национального университета Узбекистана имени Мирзо Улугбека № 01/11-16155 от 5 сентября 2025 года. Применение данных научных результатов позволило комплексно изучить температурную зависимость удельного сопротивления при легировании силикатного стекла оксидами металлов (Ru, Cu, Mg), а также установить многократное увеличение электрической проводимости силикатного стекла.

Установление закономерностей вакуумной поверхностной ионизационной масс-спектрометрии пестицидов (ацетамиприд, хлордимеформ, имидаклоприд) и объяснение гетерогенных реакционных каналов, возникающих при взаимодействии их молекул с нагретой окисленной поверхностью вольфрама, а также выявление того, что механизмы образования протонированных ионов в массовых спектрах поверхностной ионизации при атмосферном давлении для алкалоидов и стимуляторов (кокаин, морфин, папаверин) принципиально отличаются от механизмов поверхностной ионизации в вакууме, были использованы в базовых научных исследованиях, выполненных в 2023–2024 годах в лаборатории адсорбционных и эмиссионных явлений Института ионно-плазменных и лазерных технологий имени У.А. Арифова: «Исследование взаимодействия многоатомных частиц с поверхностью твёрдого тела в вакуумных и атмосферных условиях, разработка новых методов ионизации активных органических соединений, изучение электронных и кристаллических структур поверхностей твёрдых тел, модифицированных ионами щелочных металлов, а также элементарный анализ отрицательной ионной эмиссии методами СХПЭЭ

и ВИМС» (справка Академии наук Республики Узбекистан № 2/1255-2322 от 29 сентября 2025 года). Использование данных научных результатов позволило изучить адсорбцию молекул новых психотропных веществ на поверхностях высокотемпературных тугоплавких оксидов металлов, выявить гетерогенные реакции, протекающие в адсорбированном слое, а также установить причины появления функциональных групп в масс-спектре. Кроме того, интерпретация образования протонированных ионов в масс-спектрах поверхностной ионизации алкалоидов при атмосферном давлении на основе теорий кислот Льюиса и Бренстеда дала возможность понять термоэмиссионные и десорбционные характеристики наркотических и новых психотропных веществ по их термодесорбционным спектрам.

Апробация результатов исследования. Основные результаты диссертации были представлены и обсуждены на 8 конференциях, в том числе на 7 международных и 1 республиканской научно-практической конференции.

Публикации результатов исследования. Основные результаты, полученные по теме диссертации, опубликованы в 14 научных работах, из них 6 научных статей, включая 4 в международных журналах (входящих в базы Web of Science/Scopus) и 2 статьи в журналах, рекомендованных Высшей аттестационной комиссией Республики Узбекистан для публикации основных научных результатов докторских диссертаций.

Структура и объем диссертации. Диссертационная работа состоит из введения, 4 глав, выводов, списка использованной литературы и приложений. Общий объем научной работы составляет 110 страницы текста, включающих 53 рисунка и 2 таблицы.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

Во **введении** диссертации обоснована актуальность и значимость темы исследования, сформулированы цель и задачи исследования, определены объект, предмет и методы исследования, а также выявлено соответствие работы приоритетным направлениям развития науки и технологий Республики Узбекистан. Изложена научная новизна исследования, обоснована достоверность полученных результатов, раскрыто их теоретическое и практическое значение, представлена информация о внедрении и апробации результатов, а также приведены сведения об объеме и структуре диссертации.

В первой главе «**Состояние изученности некоторых органических соединений методами масс-спектрометрической ионизации**» были проанализированы научно-теоретические основы масс-спектрометрии, в частности процессы ионизации органических соединений, их механизмы и области применения. Подробно раскрыта физико-химическая сущность различных методов ионизации, их преимущества и ограничения. Также рассмотрены теоретические основы явления поверхностной ионизации, условия лёгкой и трудной ионизации. Сделан вывод о том, что исследования, проведённые с использованием методов ионизации при вакуумных и

атмосферных условиях, в основном были направлены на количественный анализ. Подчёркнуто, что механизмы установления ионных состояний частиц, процессы адсорбции, десорбции и факторы, влияющие на эффективность ионизации органических соединений в вакууме и при атмосферных условиях, изучены недостаточно.

Во второй главе «**Классификация экспериментальных установок и методы проведения исследований**» подробно охарактеризованы приборы: статический магнитный масс-спектрометр МИ-1201В для экспериментов по поверхностной ионизации (ПИ) и масс-спектрометр Orbitrap для экспериментов по ионизации при атмосферном давлении (ПИАД). Даны сведения об источниках ионизации, патронном испарителе, применённом в процессе ТДЯЛ, а также об используемых эмиттерах и их физических свойствах. Представлена информация о газохромато-масс-спектрометрах, применённых в качестве дополнительного экспериментального метода для проверки чистоты образцов. Освещены требования к методам и условиям проведения исследований, а также процедуры подготовки образцов к эксперименту.

В третьей главе диссертации – «**Закономерности поверхностной ионизации пестицидов в вакуумных условиях**» – исследованы закономерности ВПИ/МС (вакуумной поверхностной ионизации и масс-спектрометрии) для пестицидов: имидаклоприд, хлордимеформ, ацетамиприд, альдикарб и диазинон. Рассмотрены гетерогенные процессы, протекающие на окисленной и металлической поверхностях, реакции диссоциации, а также определены потенциалы ионизации основных ионных линий и энергии сублимации молекул пестицидов ($E_{\text{суб}}$).

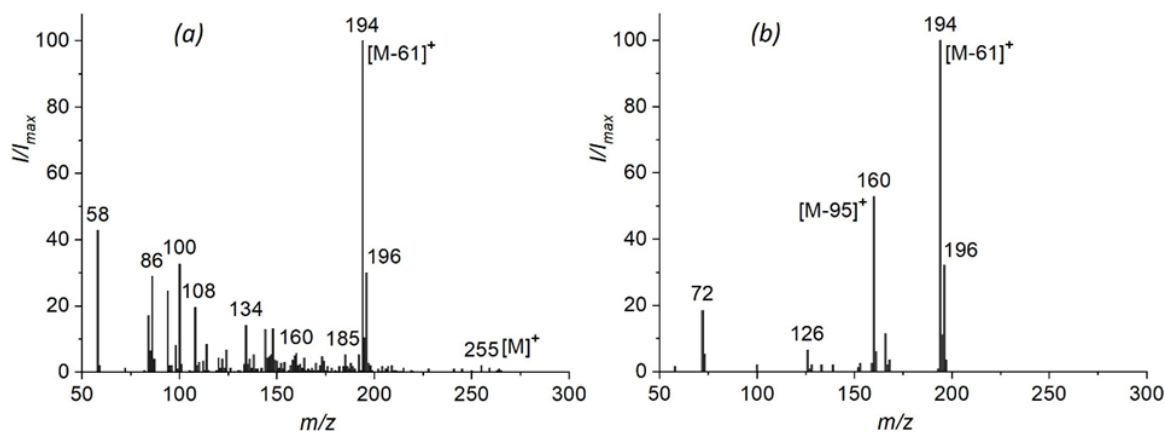


Рис. 1. Масс-спектры имидаклоприда при поверхностной ионизации (SI): (a) полученный на окисированной поверхности эмиттера, (b) полученный на металлической поверхности эмиттера.

На рисунке 1а представлен масс-спектр имидаклоприда, полученный на окисленном вольфрамовом эмиттере. Этот масс-спектр измерен при температуре эмиттера $T_{\text{эм}} = 1200$ К и температуре камеры $T_{\text{к.б.}} = 345$ К. Спектр состоит из молекулярного иона M^+ (m/z 255) и ряда фрагментных ионов $[M-$

$R]^+$. Основная ионная линия масс-спектра соответствует фрагментному иону m/z 194. Имидаклоприд эффективно ионизируется методом ВПИ/МС, при этом плотность тока основного иона (m/z 194) составляет примерно 10^{-9} А/см². Большинство этих ионов содержат насыщенные связи и неспаренные электроны, проявляясь как положительно заряженные четырехвалентные атомы азота со sp^2 -гибридными орбиталями.

Масс-спектр имидаклоприда, полученный с использованием металлического вольфрамового эмиттера, показан на рисунке 1b. В этом случае $T_{эм} = 2000$ К, $T_{к.б.} = 345$ К. По сравнению со спектром, полученным на окисленном эмиттере, данный спектр включает несколько фрагментных ионов с m/z 194, 196, 168, 166, 160, 126, 72 и 58. Основная ионная линия также соответствует иону m/z 194, однако его плотность тока составляет примерно 10^{-12} А/см².

В масс-спектре имидаклоприда, полученном на металлическом эмиттере, дополнительные ионные линии, которые отсутствовали в спектре, зарегистрированном на окисленном эмиттере, не выявлены. Результаты сравнения показали, что состав ионов имидаклоприда на обеих поверхностях эмиттера одинаков, однако интенсивность ионов на металлическом вольфрамовом эмиттере примерно в 10^3 раз ниже.

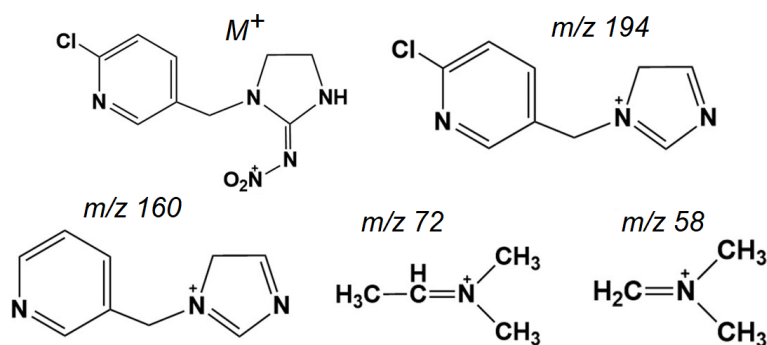


Рис. 2. Структура образования основных ионов имидаклоприда.

Адсорбция молекулы происходит за счёт образования координационной связи с адсорбентом. Неподеленная электронная пара атома азота переходит к эмиттеру, в результате чего на атоме азота возникает частичный положительный заряд. Образование молекулярного иона M^+ происходит в соответствии с правилами ВПИ за счёт адсорбции через атом азота в группе NO_2 . Фрагментные ионы $[M-R]^+$ образуются по различным реакционным каналам. Адсорбция имидаклоприда происходит на первом азотном гетероатоме в структуре N-нитроимидазольного кольца. На рисунке 2 приведены структуры основных ионов имидаклоприда и показаны гетерогенные реакционные каналы их образования. Ион m/z 194 образуется в результате адсорбции через первый азотный гетероатом в структуре N-нитроимидазольного кольца. Ионы m/z 144 и 126 формируются в результате адсорбции через атом азота группы NO_2 . В области малых масс спектра имидаклоприда выявлены ионы m/z 108, 100, 94, 86, 84, 58 и 72, которые образуются при глубокой фрагментации молекулы на нагретой поверхности эмиттера.

Масс-спектр хлордимеформа, полученный методом ВПИ/МС на окисленном эмиттере, представлен на рисунках 3а,б. На рисунке 3а приведены данные при $T_{эм} = 600$ К, на рисунке 3б – при $T_{эм} = 1050$ К; температура камеры составляла $T_{к.б.} = 385$ К. При низкой температуре эмиттера спектр состоит из протонированных ионов $[M+H]^+$ (m/z 197, 199) и фрагментных ионов $[M-R]^+$ (m/z 163, 159, 100, 94).

При повышении температуры основная ионная линия в спектре смещается от протонированного иона m/z 197 к депротонированному иону m/z 195. Появление иона $[M-H-2nH]^+$ (m/z 193) указывает на структурные изменения молекулы хлордимеформа. Фрагментные ионы m/z 119, 111, 100, 95 и 58 образуются в результате глубокой фрагментации на нагретой поверхности. Масс-спектр хлордимеформа, полученный на металлическом вольфрамовом эмиттере ($T_{эм} = 2000$ К, $T_{к.б.} = 385$ К), состоит в основном из ионов M^+ , $[M-H-2nH]^+$ и $[M-R]^+$. Основной ион – $[M-R]^+$ (m/z 58) – формируется при глубокой фрагментации молекулы на нагретой поверхности.

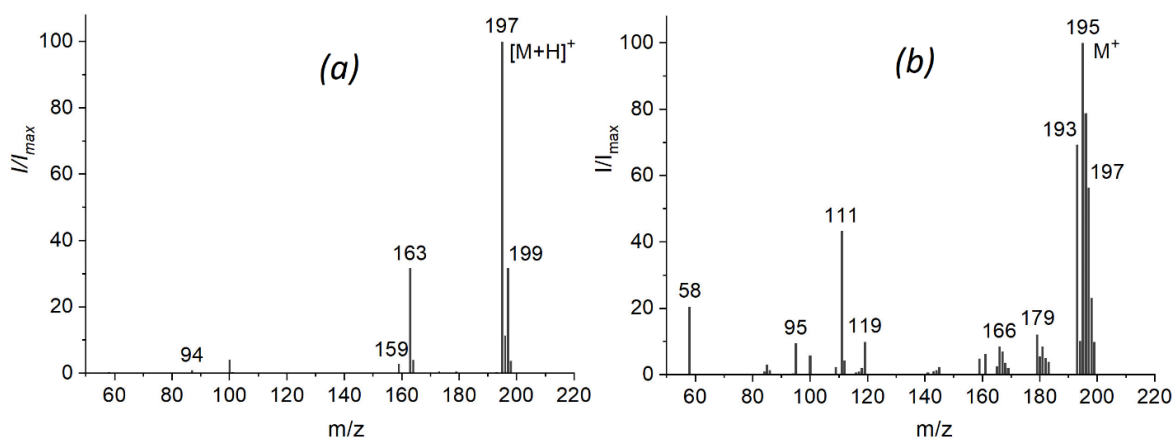


Рис. 3. Масс-спектр хлордимеформа, полученный на окисзированной поверхности эмиттера: (а) при температуре эмиттера $T_{эм} = 600$ К, (б) при $T_{эм} = 1000$ К.

В опытах по ВПИ/МС с ацетамипридом в качестве эмиттера использовался окисленный вольфрам, при $T_{эм} = 1000$ К и $T_{к.б.} = 408$ К. Масс-спектр включает ионные линии $[M-H]^+$, $[M-3H]^+$ и несколько $[M-R]^+$, что соответствует закономерностям ионизации при методе ВПИ. Ионные линии m/z 221 и 219 соответствуют депротонированным ионам; наличие атомов хлора в химической структуре ацетамиприда позволяет легко идентифицировать такие ионы. Также наблюдаются линии m/z 58, 96, 110, 169, 181 и 183, соответствующие фрагментным ионам $[M-R]^+$, возникающим при разрыве π -связей (C – C) в адсорбированных молекулах ацетамиприда.

Ацетамиприд содержит четыре азотных гетероатома, при этом заряд локализован на втором азотном гетероатоме после атома хлора, посредством которого молекула адсорбируется на поверхности эмиттера. Основная ионная линия масс-спектра соответствует иону m/z 58, образуемому при разложении молекулы ацетамиприда на поверхности эмиттера.

В опытах с диазином методом ВПИ/МС использовался окисленный вольфрамовый эмиттер при $T_{эм} = 1000$ К и $T_{к.б.} = 408$ К. В масс-спектре наблюдается протонированный ион $[M+H]^+$ (m/z 305) и несколько фрагментных ионов $[M-R]^+$ (m/z 64, 93, 135, 137, 151, 153, 181).

Молекула диазинона адсорбируется на поверхности через атом азота, расположенный между изопропильной и метильной группами в пиримидиновом кольце. В результате при низких температурах эмиттера происходят ассоциативные реакции, что подтверждается появлением ионной линии $[M+H]^+$ (m/z 305). Разрыв связей C–O и O–P, соединяющих фосфорный эфирный фрагмент с пиримидиновым кольцом, приводит к образованию фрагментных ионов m/z 135, 137, 151 и 153.

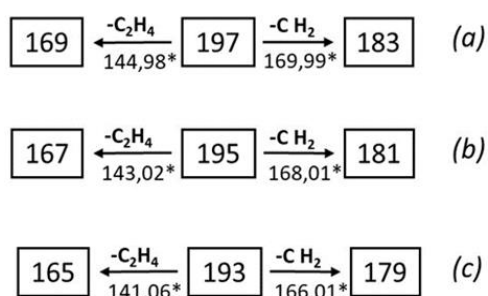


Рис. 4. Ионы хлордимеформа, подвергшиеся мономолекулярному распаду.

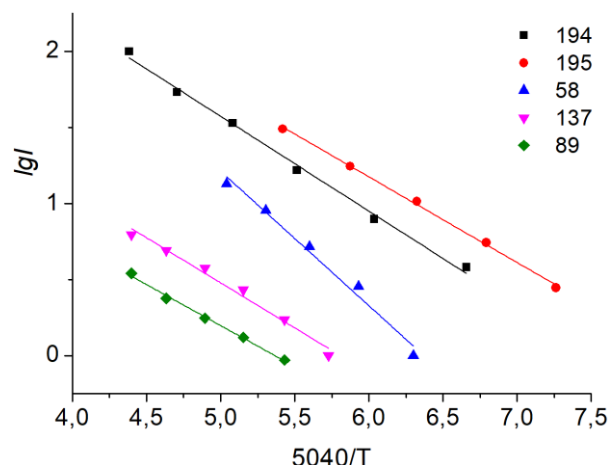


Рис. 5. График Аррениуса для определения потенциалов ионизации основных ионных токов имidakлоприда (m/z 194), хлордимеформа (m/z 195), ацетамиприда (m/z 58), диазинона (m/z 137) и альдикарба (m/z 89).

В опытах с альдикарбом методом ВПИ/МС использовался окисленный вольфрамовый эмиттер при $T_{эм} = 950$ К и $T_{к.б.} = 335$ К. Масс-спектр включает депротонированный молекулярный ион $[M-H]^+$ (m/z 189) и ряд фрагментных ионов $[M-R]^+$ (m/z 58, 72, 89, 100, 115). Согласно теории ВПИ, атомы азота в составе органических соединений, адсорбирующихся на окисленной вольфрамовой поверхности, должны образовывать координационную связь с поверхностью. Следовательно, депротонированный ион альдикарба локализуется на атоме азота N-метилкарбамоильной группы. В результате реакций гидрогенизации молекула теряет один атом водорода в виде H^\bullet . Фрагментный ион m/z 115 образуется при отщеплении от депротонированного иона двух метильных групп (CH_3) и метилтио-группы ($-S-CH_3$), а ион m/z 89 – при разрыве связи N – C в оксимной группе. Поскольку ион m/z 89 имеет высокую интенсивность в масс-спектре, можно предположить, что он образуется также по альтернативным реакционным каналам. Кроме того, в

спектре альдикарба присутствуют ионы m/z 58, 72, 100, которые, вероятно, формируются при глубокой термической фрагментации молекулы на нагретой поверхности эмиттера.

Одним из преимуществ использования статического магнитного масс-спектрометра в экспериментах по поверхностной ионизации (ПИ) является возможность идентификации мономолекулярных распадов соединений. В масс-спектре хлордифеноты были обнаружены мономолекулярные фрагментационные ионы — $[M+H]^+$, $[M-H]^+$ и $[M-3H]^+$, схемы их распада представлены на рисунках 4а, б, в. Мономолекулярные распады наблюдались также в фрагментном ионе диазинона $[M-R]^+$ (m/z 135).

Зависимости основных ионных токов исследованных пестицидов от температуры эмиттера дали информацию о протекании на его поверхности реакций дегидрогенизации, гидрогенизации и диссоциации. Эти зависимости соответствуют условию $e(V-\phi) \gg kT$, характерному для теории ВПИ. Ранее потенциалы ионизации указанных пестицидов не были определены, однако в методе ВПИ их можно оценить из температурных зависимостей ионных токов.

Таблица 1

Определённые значения для пестицидов в исследованиях ВПИ

Наименование пестицида	Брутто-формула	Молярная масса, г/моль	Определённые основные ионы, m/z	Потенциал ионизации, V (эВ)	Энергия сублимации, E_{sub} (эВ)
Имидаклоприд	$C_9H_{10}ClN_5O_2$	255	194	7,73	0,68
Хлордифенот	$C_{10}H_{13}ClN_2$	196	195	8,1	0,62
Ацетамиприд	$C_{10}H_{11}ClN_4$	222	58	7,89	0,72
Диазинон	$C_{12}H_{21}N_2O_3PS$	304	137	7,1	0,54
Алдикарб	$C_7H_{14}N_2O_2S$	190	89	7,34	0,49

На рисунке 5 представлен график Аррениуса для основных ионных линий пестицидов, а их ионизационные потенциалы приведены в таблице 1. Внутри испарителя Кнудсена под воздействием тепла молекулы органического вещества могут подвергаться термической диссоциации, в результате чего исходная молекула превращается в другие соединения. Эти продукты затем оседают на поверхности эмиттера, образуя ионные линии, не принадлежащие исходному веществу. С целью установления того, что регистрируемые ионы действительно образуются из исследуемых молекул инсектицидов, была построена зависимость логарифма тока основных ионов от обратной температуры испарителя, взятая по отношению к иону с наибольшим ионным током. На основании полученных данных были построены графики Аррениуса. Установлено, что наклоны полученных прямых линий образуют параллельные зависимости, что свидетельствует о том, что все наблюдаемые ионы происходят от исходной молекулы. Кроме того, по наклону этих

параллельных линий можно оценить теплоту сублимации испаряющегося вещества. Определённые для пестицидов значения приведены в таблице 1.

В четвертой главе диссертации **«Термическая десорбция и термическая ионизация органических соединений при атмосферном давлении»** рассмотрены процессы десорбции органических веществ с нагретых металлических поверхностей различного состояния и процессы ионизации на поверхностях эмиттеров из проволоки с высокой температурой плавления в условиях атмосферного давления. Также приведены результаты исследований, показывающие возможность применения метода поверхностной ионизационной масс-спектрометрии не только в вакууме, но и при атмосферном давлении, а также механизмы образования ионов.

Метод термической десорбции по Лейденфросту (ТДЯЛ) является подходом, применяемым для масс-спектрометрического анализа органических соединений с низкой летучестью. В процессе ТДЯЛ капля раствора аналита наносится на нагретую поверхность, где образуется слой пара, удерживающий каплю в состоянии левитации. В результате растворитель постепенно испаряется, концентрация аналита внутри капли возрастает. На финальной стадии испарения остатки аналита левитируют на паровом слое, после чего происходит десорбция, и образовавшиеся ионы регистрируются с помощью масс-спектрометра.

Эффективность ТДЯЛ зависит от морфологии поверхности, что было изучено в двух сериях экспериментов.

В первом исследовании рассматривалось влияние степени шероховатости поверхности на процесс ТДЯЛ. С целью сокращения времени десорбции аналита и уменьшения его деградации поверхность испарителя была полирована с использованием абразивов на основе оксида алюминия с различной зернистостью: 5000 (3 мкм), 2000 (10 мкм), 1000 (20 мкм), 400 (50 мкм), 100 (200 мкм). Ниже кратко изложены результаты этих экспериментов.

Капля метанола, нанесённая на поверхность патронного испарителя, полированную различными абразивами, левитирует над нагретой поверхностью и в процессе испарения приводит к увеличению концентрации аналитов (кокаина, морфина). После полного испарения капли остатки аналитов, вступившие в непосредственный контакт с поверхностью, подвергаются термическому разложению, а затем сублимируются и вновь левитируют.

Полученные результаты показали, что с увеличением шероховатости поверхности остатки аналита сохраняют левитацию, не касаясь поверхности. Термическое разложение аналитов вовсе не наблюдалось на поверхностях, полированных абразивами зернистостью 400 и 100. Это свидетельствует о том, что остатки кокаина и морфина левитируют на нагретой поверхности, что значительно снижает термическое разложение. Такой эффект объясняется повышенной теплопроводностью между нагретой поверхностью и остатками при увеличении шероховатости. Как и ожидалось, время испарения остатков кокаина и морфина сокращалось с увеличением шероховатости, а

максимальная интенсивность ионов [кокаин + H]⁺ и [морфин + H]⁺ наблюдалась на поверхности, полированной абразивом с зернистостью 100. Быстрое нагревание остатка указывало на уменьшение термического разложения, что согласуется с теорией, предложенной Бойлером и др.

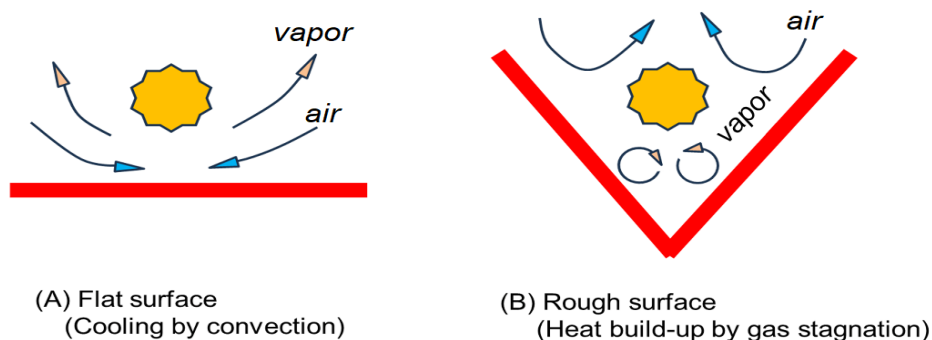


Рис. 6. Концептуальное изображение левитации остатка образца на поверхности испарителя с патроном.

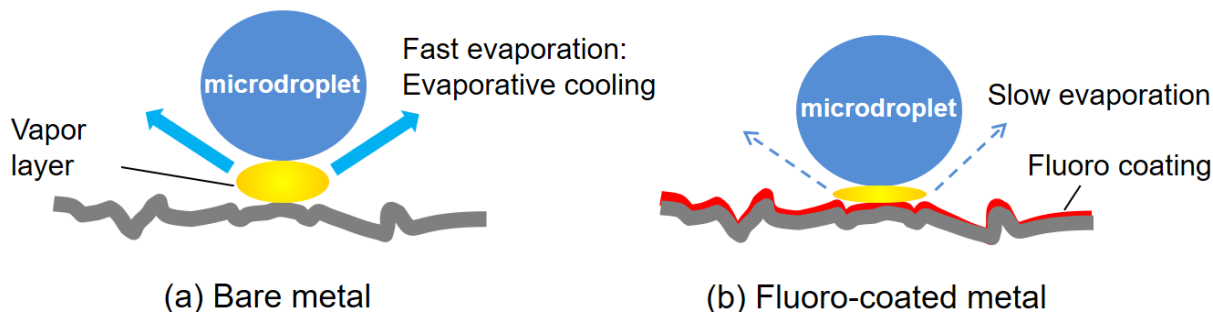


Рис. 7. Концептуальное изображение процесса испарения капли раствора с нагретой металлической поверхности без покрытия и с покрытием из фторсодержащего соединения.

На рис.6а. и 6б. показана схематическая иллюстрация левитации остатков аналита на гладкой и шероховатой поверхности. На рис. 6а для гладкой поверхности испаряющийся пар из нижней части остатка поднимается вверх за счет конвекции и уносится встречным воздушным потоком. В результате охлаждения за счет испарения и поступления «холодного» воздуха температура остатка растет медленно, и испарение протекает замедленно. Напротив, на рис.6б. показано, что в пустотах шероховатой поверхности пар запирается у нагретой стенки, что обеспечивает более эффективную теплопередачу между остатком и поверхностью нагревателя. Иными словами, тепловой поток через шероховатую поверхность (6б) значительно выше, чем через гладкую (6а). Вследствие захвата пара в нижней части остатка его температура увеличивается, что приводит к сокращению времени испарения.

Во втором исследовании рассматривалось влияние покрытия поверхности (без покрытия и с покрытием фторсодержащим соединением) на процесс ТДЯЛ. Для сокращения времени десорбции аналита и анализа влияния свойств материала на данный процесс были проведены эксперименты, результаты которых кратко изложены ниже.

На рисунке 7а схематически показано состояние капли метанола на нагретой металлической поверхности без покрытия, что позволяет раскрыть научные основы проведенного исследования. Нагретая капля левитирует над поверхностью. За счёт толстого слоя пара под каплей возникает охлаждение вследствие испарения. Напротив, если металлическая поверхность покрыта фторсодержащим соединением (как показано на рисунке 7b), эффективность теплообмена между парами метанола и поверхностью снижается по сравнению с непокрытым металлом, поскольку теплопроводность фторсодержащего соединения ($\sim 0,25$ Вт/м·К) значительно меньше, чем у нержавеющей стали (~ 20 Вт/м·К). Более низкий теплообмен между паром и поверхностью уменьшает охлаждение капли при испарении, и её температура повышается быстрее, чем в случае, изображённом на рисунке 7а. Таким образом, использование металлической поверхности с фторсодержащим покрытием приводит к быстрому нагреванию капли, что помогает объяснить явление «быстрого» испарения аналитических молекул.

Капля метанола, нанесённая на поверхность патронного испарителя, отполированную различными абразивами, левитирует над нагретой поверхностью; в процессе испарения происходит увеличение концентрации аналитов (кокаина, морфина). После полного испарения капли остатки аналита вступают в прямой контакт с поверхностью, термически разлагаются, а затем сублимируются и вновь левитируют.

В данной работе время жизни капль метанола при повторных измерениях оставалось нестабильным, поскольку капля перемещалась по поверхности случайным образом. Амфифильная природа морфина приводит к обогащению поверхности капли молекулами морфина. Согласно закону Рауля, давление пара метанольного раствора морфина ниже, чем у чистого метанола, что уменьшает охлаждение капли при испарении. Из-за пониженного давления пара капля при случайных взаимодействиях с поверхностью приближается к нагревателю, получая больше тепла, что сокращает время её полного испарения. В процессе ТДЯЛ состояние нагреваемой металлической поверхности и поверхности капли рассматриваются как важнейшие факторы, влияющие на десорбцию.

Исследования поверхностной ионизации при атмосферном давлении проводились с использованием проволочных эмиттеров из окисленного вольфрама (W), рения (Re), палладия (Pd), молибдена (Mo), титана (Ti) и нержавеющей стали (SUS 304). В качестве исследуемых веществ были выбраны азотсодержащие органические соединения: карбарил, папаверин, кокаин и морфин. В опытах ПИАД в масс-спектре, в отличие от ВПИ, в качестве основных ионов наблюдались протонированные $[M+H]^+$ ионы. На рис. 8 представлена теоретическая схема механизмов образования ионов в процессах ВПИ и ПИАД.

В приведённых выше исследованиях было установлено, что десорбция молекул аналита происходит в основном на конечной стадии явления Лейденфроста. Однако в исследованиях ПИАД протонированные ионы

$[M+H]^+$ молекул карбарила, папаверина, кокаина и морфина обнаруживались только в процессе быстрого испарения и не фиксировались в ходе ТДЯЛ. Это

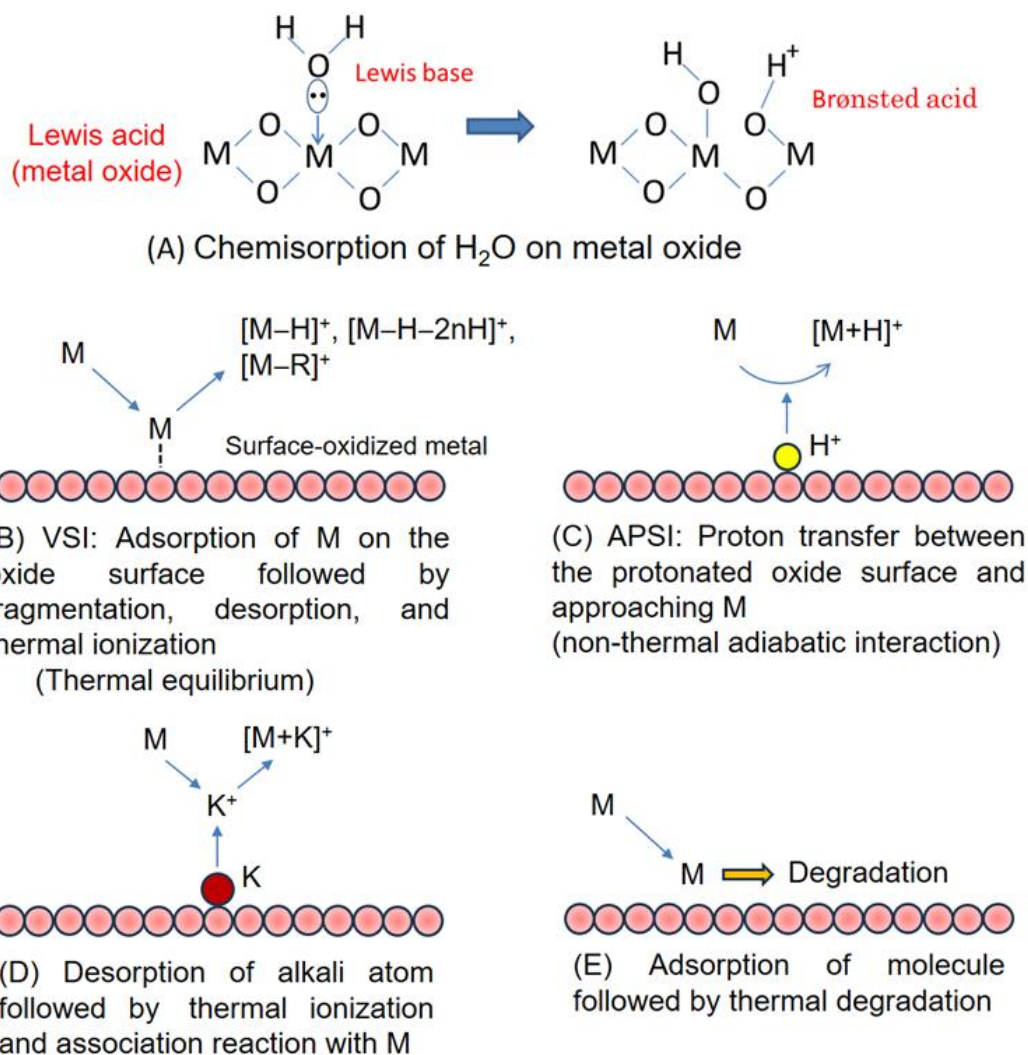


Рис. 8. Механизмы образования ионов, катионизации и отравления оксидного слоя металла в процессах ВПИ и ПИАД.

объясняется тем, что в процессе ТДЯЛ пар растворителя (метанола), в котором растворён образец, вызывает серьёзное «отравление» поверхности эмиттера. В опытах ВПИ Зандберг и Расулев сообщали о возникновении «отравления» поверхности эмиттера под действием органических паров. С этой точки зрения метод ТДЯЛ в присутствии органических растворителей не является удобным методом десорбции аналита для ПИАД. Исходя из этого, можно подчеркнуть, что применение метода ТДЯЛ/ПИАД с водными растворами может дать стабильные и эффективные результаты.

В методе ВПИ (вакуумной поверхностной ионизации) ионы $[M-H]^+$ определяются с более высокой эффективностью, чем ионы $[M+H]^+$. В то время как при использовании метода ПИАД наблюдались только ионы $[M+H]^+$, а ионы $[M-H]^+$ не фиксировались. Поэтому механизмы образования ионов $[M+H]^+$ в методе ПИАД и ионов $[M-H]^+$ в методе ВПИ принципиально различаются, так как это связано с большой разницей в движении газовых

молекул в вакууме и в атмосфере. Нетрудно понять, что в атмосферных условиях молекулы аналита достигают поверхности эмиттера в тысячи раз медленнее, чем в вакууме. В настоящей работе для таких веществ, как карбарил, папаверин, кокаин и морфин, было установлено, что при использовании метода ПИАД наблюдается образование только ионов $[M+H]^+$, тогда как ионы $[M-H]^+$ не появляются. Это указывает на то, что молекулы аналита протонируются ещё до адсорбции на поверхности эмиттера. По нашему предположению, протоны уже формируются на поверхности эмиттера в результате взаимодействия водяного пара (влажности воздуха) с нагретым металлическим оксидом, как показано на рисунке 8А. Молекулы H_2O , действуя как кислоты Льюиса, адсорбируются на поверхности оксида, диссоциируют и образуют протонированный металлический оксид, выступающий в роли кислоты Бренстеда. Известно, что многие металлические оксиды могут вести себя как твёрдые кислоты Бренстеда (гетерогенные катализаторы) и обладают способностью передавать протон основным молекулам.

Реакция протонирования может происходить посредством туннельного переноса протона от протонированного металлического оксида к молекулам аналита в газовой фазе (как показано на рисунке 8С). Согласно этой модели, протонированный металлический оксид действует как кислородная кислота. Исходя из данного теоретического предположения, можно заключить, что аналиты с большей протонной аффинностью, чем у металлических оксидов, избирательно подвергаются протонированию. Это может объяснить, почему метод ВПИ демонстрирует высокую селективность по отношению к азотсодержащим соединениям, обладающим более высокой протонной аффинностью, по сравнению с кислородсодержащими.

В масс-спектрах ПИАД для всех исследованных аналитических соединений были выявлены натриевые и калиевые формы. Для азотсодержащих соединений энергия связи с ионами Na^+ и K^+ составляет не более $30 \text{ ккал} \cdot \text{моль}^{-1}$, поэтому при температурах выше $\approx 300^\circ\text{C}$ они не образуют термически стабильных кластерных ионов. Таким образом, ионы Na^+ и K^+ , возникающие в результате термической ионизации в газовой фазе, формируют кластерные ионы в области ионного источника, где температура достаточно низкая, чтобы обеспечить образование термически стабильных кластерных структур.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

На основе результатов, полученных в ходе проведённого исследования, сделаны следующие выводы:

1. Были оценены энергии сублимации пестицидов (ацетамиприд, альдикарб, диазинон, имидаклоприд, хлордифенотом), а также потенциалы ионизации основных ионных токов. Полученные ВПИ масс-спектры характеризуются относительно малым числом пиков и в основном состоят из ионных линий M^+ ,

$[M-H]^+$ и $[M-R]^+$. То, что потенциалы ионизации близки к работе выхода окисленного эмиттера, согласно формуле Саха–Ленгмюра, объясняет эффективную ионизацию фрагментных ионов в масс-спектрах ВПИ.

2. Установлено, что интенсивность ионов, полученных на окисленном вольфрамовом эмиттере, примерно в 10^3 раз выше, чем на металлическом эмиттере. Это различие объясняется разной каталитической активностью поверхностей эмиттера. При этом состав ионов в масс-спектрах оставался неизменным.

3. Показано, что увеличение шероховатости поверхности патронного испарителя приводит к возрастанию интенсивности ионов на один порядок. Этот эффект связан с более эффективной теплопередачей между шероховатой поверхностью и каплей, что способствует увеличению концентрации десорбированных молекул.

4. Эксперименты, проведённые на поверхности, покрытой фторсодержащим соединением, показали сокращение времени термической деградации молекул и общего времени десорбции в два раза. Это объясняется более быстрым повышением температуры капли раствора, нанесённой на такую поверхность.

5. На поверхности, покрытой фторсодержащим соединением, для молекул морфина наблюдалось образование только протонированного иона вследствие быстрого испарения, что объясняется амфифильной природой морфина. Из этого следует, что фторсодержащее покрытие способствует быстрой и эффективной идентификации поверхностно-активных веществ.

6. Экспериментально установлено, что на заключительном этапе процесса ТДЯЛ наблюдается левитация остатков образца, что подтверждает возможность регистрации протонированных молекул с минимальной фрагментацией и высокой чувствительностью.

7. В исследованиях ПИАД протонированные ионы формировались преимущественно в процессе быстрого испарения (БИ), тогда как в ходе ТДЯЛ они не наблюдались на большинстве эмиттерных поверхностей. Это объясняется загрязнением поверхности эмиттера органическими парами из атмосферы до начала ТДЯЛ процесса.

8. В процессе ПИАД основными ионами были идентифицированы протонированные молекулы, тогда как характерные для ВПИ депротонированные и фрагментированные ионы не наблюдались. Образование протонированных молекул в ПИАД свидетельствует о том, что молекулы образца не адсорбируются на нагретой поверхности, а протонируются в газовой фазе в результате реакций обмена протонами с протонированными поверхностями металлических оксидов. Таким образом, сделан вывод, что протонированные металлические оксиды действуют как кислоты Бренстеда.

**SCIENTIFIC COUNCIL DSc.02/30.12.2019.FM/T.65.01 ON AWARD OF
SCIENTIFIC DEGREES AT THE INSTITUTE OF ION-PLASMA AND
LASER TECHNOLOGIES**

INSTITUTE OF ION-PLASMA AND LASER TECHNOLOGIES

AKHMEDOV SHERZOD MAMARAIM OGLI

**THERMAL DESORPTION AND THERMAL IONIZATION OF SOME
ORGANIC COMPOUNDS UNDER VACUUM AND ATMOSPHERIC
PRESSURE CONDITIONS**

01.04.04 – Physical electronics

**ABSTRACT OF DISSERTATION OF THE DOCTOR OF
PHILOSOPHY (PhD) ON PHYSICAL AND MATHEMATICAL SCIENCES**

Tashkent – 2025

The theme of the dissertation of doctor of philosophy (PhD) on physical and mathematical sciences was registered at the Supreme Attestation Commission of the Ministry of Higher Education, Science and Innovation of the Republic of Uzbekistan under number B2025.1.PhD/FM1241 .

Dissertation has been prepared at the Institute of ion-plasma and laser technologies named after U.A. Arifov of the Academy of Sciences of the Republic of Uzbekistan.

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

Scientific supervisor:

Usmanov Dilshadbek Tursunbayevich

Doctor of Physical and Mathematical Sciences, professor

Official opponents:

Umirzakov Boltakhuja Ermatovich

Doctor of Physical and Mathematical Sciences, professor

Kakhramonov Boburjon Ruziboyevich

Doctor of Philosophy (PhD) in Physical and Mathematical Sciences

Leading organization:

National University of Uzbekistan

The defense will take place on « 16 » december 2025 at 14³⁰ at the meeting of the Scientific Council number DSc.02/30.12.2019.FM/T.65.01 at Institute of Ion-Plasma and Laser Technologies (Address: 100125, Uzbekistan, Tashkent, 33 Durmon yuli street. Phone/fax: (+99871) 262-32-54, e-mail: info@iplt.uz).

The PhD dissertation is can be looked through in the Information-Resource Centre of the Institute of Ion-Plasma and Laser Technologies (is registered № 18) (Address: 100125, 33, Durmon yuli str., Tashkent, Uzbekistan. Phone: (+99871) 262-31-69).

The abstract of the dissertation is sent out on « 03 » december 2025.

(Mailing report № 18 on « 03 » december 2025).



Kh.B. Ashurov

Chairman of scientific council on award of scientific degrees, Doctor of Technical Science, professor

I.D. Yadgarov

Scientific secretary of scientific council on award of scientific degrees, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, professor

U.K. Makhmanov

Chairman of scientific seminar under scientific council on award of scientific degrees, Doctor of Physical and Mathematical Sciences, professor

INTRODUCTION (abstract of PhD dissertation)

The aim of the research work. It consists in studying the regularities of thermal ionization and thermal desorption of certain organic compounds under vacuum and atmospheric conditions using mass spectrometric methods, and in developing the scientific foundations of these processes.

The objects of the research work. Pesticides – acetamiprid, aldicarb, diazinon, imidacloprid, chlordimeform, carbaryl; alkaloids – morphine, papaverine; stimulant substance – cocaine.

The subject of the research work. The subject of the study is the laws of TD and TI of some organic compounds (pesticides, alkaloids, and stimulants) under vacuum and atmospheric conditions, i.e., ionization mechanisms, temperature dependence, and physicochemical properties studied using SI/MS, ABSI, and LHTD methods, as well as the effect of surface morphology on TD.

Scientific novelty of the research work. The scientific novelty of the study consists of the following:

- for the first time, the main ions in the mass spectra of pesticides (aldicarb, diazinon, acetamiprid, chlordimeform, imidacloprid) were identified using the VSI processes, and their sublimation energies and ionization potentials were evaluated;
- it was established that the intensity of ions formed on the oxidized emitter surface for pesticides is approximately 10^3 times higher than that formed on the metallic emitter surface;
- it was determined that increasing the surface roughness of the capillary vaporizer leads to more efficient heat transfer between the surface and the droplet, significantly affecting the increase in ion intensities;
- in the TD process on a fluorine-coated surface, due to low thermal conductivity between the surface and the droplet, cooling by evaporation decreases, and the droplet temperature rises rapidly, resulting in reduced thermal degradation and overall desorption times of the sample;
- in the TD of a morphine solution deposited on a fluorine-coated surface, it was found that morphine, being a surface-active substance (having the property of accumulating inside and on the surface of the droplet), forms only protonated ions $[M+H]^+$ without decomposition due to TB;
- for the first time, it was determined that in the ABSI method, the formation mechanism of protonated ions $[M+H]^+$ occurs through proton-exchange reactions, i.e., they act as Brønsted acids;
- in the ABSI mass spectrum, protonated molecules were identified as the main ions, while deprotonated and fragmented ions typical of VSI were not observed; it was found that the absence of fragment ions is due to proton-exchange reactions occurring in an adiabatic process (without heat exchange).

Implementation of the research results. The following scientific results obtained in the dissertation have been implemented in practice:

The oxidation at approximately 600 °C of refractory metals—tungsten (W), rhenium (Re), palladium (Pd), molybdenum (Mo), titanium (Ti), and stainless steel

(SUS 304)—used as emitters in surface ionization under atmospheric pressure conditions, as well as the reduction of analyte desorption time in the Leidenfrost-assisted thermal desorption (LHTD) process through increasing the roughness of the metal evaporator (SUS 304) surface and fluorinating the surface, were applied in the Uzbekistan–India joint fundamental project Uzb-Ind-2021-78 “Thermoelectric properties and self-organization processes of silicates doped with metal oxides” (reference No. 01/11-16155 issued by the National University of Uzbekistan named after Mirzo Ulugbek on September 5, 2025). The application of these scientific results made it possible to conduct a comprehensive study of the temperature-dependent variation of specific resistance during the doping of silicate glass with metal oxides (Ru, Cu, Mg), as well as to identify a several-fold increase in the electrical conductivity of silicate glass.

The establishment of the vacuum surface ionization mass spectrometric behavior of pesticides (acetamiprid, chlordimeform, imidacloprid) and the explanation of heterogeneous reaction channels arising from their interaction with a heated oxidized tungsten surface, as well as the demonstration that the mechanisms of formation of protonated ions in surface ionization mass spectra under atmospheric pressure for alkaloids and stimulants (cocaine, morphine, papaverine) fundamentally differ from those under vacuum conditions, were used in the basic scientific research project “Investigation of the interaction of polyatomic particles with solid surfaces in vacuum and atmospheric conditions, development of new ionization methods for active organic compounds, study of the electronic and crystal structures of solid surfaces modified with alkali metal ions, and elemental analysis of negative ion emission using EXEYS and SIMS methods” carried out at the U.A. Arifov Institute of Ion-Plasma and Laser Technologies in 2023–2024 (reference No. 2/1255-2322 of the Academy of Sciences of the Republic of Uzbekistan dated September 29, 2025). The application of these scientific results made it possible to investigate the adsorption of new psychoactive substance molecules on the surfaces of high-temperature refractory metal oxides, to identify heterogeneous reactions occurring in the adsorbed layer, and to determine the causes of functional group formation in mass spectra.

Structure and volume of the dissertation. The dissertation consists of an introduction, 4 chapters, conclusions, a list of references, and appendices. The scientific work comprises 110 pages of text, including 53 figures and 2 tables.

E'LON QILINGAN ISHLAR RO'YXATI
СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ
LIST OF PUBLISHED WORKS

I bo'lim (Часть I, Part I)

1. Ш.М. Ахмедов, Ш.Д. Ахунов, А.Ш. Раджабов, Д.Т. Усманов. Изучение поверхностно-ионизационных закономерностей молекул ацетамиприда //«Узбекский физический журнал». 2024. Т. 26. №1. с. 20-25. doi.org/10.52304/.v26i1.493
2. Sh.M. Axmedov Aldikarb va diazinonning sirtiy ionlashuv qonuniyatlari //NamDU Ilmiy Axborotnomasi. 2025. №. 5. 80-84-betlar. ISSN:2181-1458 ISSN:2181-0427
3. Sh.M. Akhmedov, A.Sh. Radjabov, B.Sh. Kasimov, I.M. Saydumarov, U. Khasanov, Sh.Dj. Akhunov, D.T. Usmanov. Surface Ionization Mass Spectrometry of Imidacloprid and Chlordimeform on Oxidized and Metallic Tungsten Surfaces //Mass Spectrometry Letters. 2025. Vol. 16. №. 1. pp. 13-21. doi.10.5478/MSL.2025.16.1.13 (Impact Factor = 0,4)
4. K. Hiraoka, S.Rankin-Turner, D.T. Usmanov, Sh.M. Akhmedov, S. Ninomiya. How do cocaine and morphine in methanol solution desorb at the last moment of Leidenfrost phenomenon-assisted thermal desorption? //Rapid Communications in Mass Spectrometry. 2025. T. 39. №. 1. pp. e9933. doi.10.1002/rcm.9933. (Impact Factor = 1,8)
5. K. Hiraoka, S.Rankin-Turner, D.T. Usmanov, Sh.M. Akhmedov, S. Ninomiya. Leidenfrost phenomenon-assisted thermal desorption (LPTD) using a metal substrate coated with a fluoro compound: Mechanism of analyte evaporation //International Journal of Mass Spectrometry. 2025. T. 512. p. 117434. doi.10.1016/j.ijms.2025.117434 (Impact Factor = 1,6)
6. K. Hiraoka, D.T. Usmanov, Sh.M. Akhmedov, S. Rankin-Turner, S. Ninomiya,. Surface Ionization of Carbaryl, Papaverine, Cocaine, Morphine, and Triethylamine by Heated Surface-Oxidized Metal Filaments of W, Re, Pd, Mo, Ti, and SUS304 Under Atmospheric Pressure: Ionization Mechanism //Rapid Communications in Mass Spectrometry. 2025. T. 39. №. 12. p. e10029. doi.10.1002/rcm.10029. (Impact Factor = 1,8)

II bo'lim (Часть II, Part II)

7. Ш.М. Ахмедов, Ш.Дж. Ахунов, Д.Т. Усманов «Исследование закономерности поверхностной ионизации инсектицида карбарила» 50-й Международная Тулиновская конференция по физике взаимодействия заряженных частиц с кристаллами. Москва, МГУ им М.В.Ломоносова, 25-26 мая 2021. С. 39.
8. Ш.М. Ахмедов, Ш.Дж. Ахунов, Д.Т. Усманов, “Имидаклопридиннинг сиртий ионлашув қонуниятларини текшириш”, “Конденсирланган мухит физикасининг ривожланиш истиқболлари” Халқаро илмий ва илмий-

техник Анжуман, Қарши давлат университетида 2022 йил 14-15 октябрь. 112-бет.

9. Ш.М. Ахмедов, Ш.Дж. Ахунов, Д.Т. Усманов, “ Исследование закономерностей поверхностной ионизации инсектицида имидаклоприда”. 52-й Международная Тулиновская конференция по физике взаимодействия заряженных частиц с кристаллами. Москва, МГУ им М.В.Ломоносова, 30-31 мая 2023. С.124.
10. Ш.М. Ахмедов, Б.Ш. Касимов, А.Ш. Раджабов, Ш.Дж. Ахунов, Д.Т. Усманов, “Изучение поверхностно – ионизационные закономерности молекул ацетамиприда” Оптика ва Лазер физикасининг муаммо ва истикболлари мавзусидаги хорижий олимлар иштирокидаги Республика илмий-амалий конференцияси. Тошкент, 2023 йил 26 октябрь, 89-бет.
11. Ш.М. Ахмедов, Ш.Дж. Ахунов, Д.Т. Усманов, “ Исследование закономерности поверхностной ионизации инсектицида хлордифенмета”. 53-й Международная Тулиновская конференция по физике взаимодействия заряженных частиц с кристаллами. Москва, МГУ им М.В.Ломоносова, 28-30 мая 2024. С.130.
12. Ш.М. Ахмедов, Ш.Дж. Ахунов, А.Ш. Раджабов, М.М. Назаров, О.И. Болийев, Д.Т. Усманов. Исследование закономерности поверхностной ионизации молекул диазинона. Тезисы докладов 54-й Международной тулиновской конференции по физике взаимодействия заряженных частиц с кристаллами. Москва, МГУ им М.В.Ломоносова, 27 – 29 мая 2025, С. 30.
13. Ш.М. Ахмедов, Ш.Дж. Ахунов, А.Ш. Раджабов, Д.Т. Усманов Определение имидаклоприда в томатном соке методом поверхностной ионизации. Тезисы докладов 54-й Международной тулиновской конференции по физике взаимодействия заряженных частиц с кристаллами. Москва, МГУ им М.В.Ломоносова, 27 – 29 мая 2025, С. 31.
14. Ш.М. Ахмедов, Ш.Дж. Ахунов, М.М. Назаров, О.И. Болийев, А.Ш. Раджабов, Д.Т. Усманов. Определение энергии активации иона, образованного при мономолекулярном распаде молекул хлордифенмета. Тезисы докладов 54-й Международной тулиновской конференции по физике взаимодействия заряженных частиц с кристаллами. Москва, МГУ им М.В.Ломоносова, 27 – 29 мая 2025, С. 32.