

**O‘ZBEKISTON MILLIY UNIVERSITETI HUZURIDAGI ILMIY  
DARAJALAR BERUVCHI DSc.03/30.12.2019.K.01.03  
RAQAMLI ILMIY KENGASH**

---

**O‘ZBEKISTON MILLIY UNIVERSITETI**

**MUYASSAROVA RAYHONA IKROM QIZI**

**BOSHQARILADIGAN GIDROFIL-GIDROFOB TABIATLI KREMNEZEM  
KOMPOZITSIYALARINING FIZIK-KIMYOVIY XOSSALARI**

**02.00.04 – Fizik kimyo**

**KIMYO FANLARI BO‘YICHA FALSAFA DOKTORI (PhD)  
DISSERTATSIYASI AVTOREFERATI**

**Toshkent – 2025**

**Kimyo fanlari bo‘yicha falsafa doktori (PhD) dissertatsiyasi avtoreferati  
mundarijasi**

**Оглавление автореферата диссертации доктора философии (PhD)  
по химическим наукам**

**Contents of the dissertation abstract of Doctor of Philosophy (PhD) on  
chemical sciences**

**Muyassarova Rayhona Ikrom qizi**

Boshqariladigan gidrofil-gidrofob tabiatli kremnezem  
kompozitsiyalarining fizik-kimyoviy xossalari ..... 3

**Муяссарова Райхона Икром кизи**

Физико-химические свойства контролируемых гидрофильно-  
гидрофобных кремнеземных композитов ..... 21

**Muyassarova Raykhona**

Physicochemical properties of controlled hydrophilic-hydrophobic silica  
composites ..... 40

**E‘lon qilingan ishlar ro‘yxati**

Список опубликованных работ  
List of published works ..... 44

**O‘ZBEKISTON MILLIY UNIVERSITETI HUZURIDAGI ILMIY  
DARAJALAR BERUVCHI DSC.03/30.12.2019.K.01.03  
RAQAMLI ILMIY KENGASH**

---

**O‘ZBEKISTON MILLIY UNIVERSITETI**

**MUYASSAROVA RAYHONA IKROM QIZI**

**BOSHQARILADIGAN GIDROFIL-GIDROFOB TABIATLI KREMNEZEM  
KOMPOZITSIYALARINING FIZIK-KIMYOVIY XOSSALARI**

**02.00.04 – Fizik kimyo**

**KIMYO FANLARI BO‘YICHA FALSAFA DOKTORI (PhD)  
DISSERTATSIYASI AVTOREFERATI**

**Toshkent – 2025**

**Kimyo fanlari bo'yicha falsafa doktori (PhD) dissertatsiyasi mavzusi O'zbekiston Respublikasi Oliy ta'lim, fan va innovatsiyalar Vazirligi huzuridagi Oliy attestatsiya komissiyasida B2024.3.PhD/K828 raqam bilan ro'yxatga olingan.**

Dissertatsiya O'zbekiston Milliy universitetida bajarilgan.

Dissertatsiya avtoreferati uch tilda (o'zbek, rus, ingliz (rezyume)) Ilmiy kengash veb-sahifa ikkimyo.nuu.uz hamda «ZiyoNET» axborot-ta'lim portalida ([www.ziynet.uz](http://www.ziynet.uz)) manziliga joylashtirilgan.

**Ilmiy rahbar:**

**Akbarov Hamdam Ikromovich**  
kimyo fanlari doktori, professor

**Rasmiy  
opponentlar:**

**Ro'zimuradov Olim Narbekovich**  
kimyo fanlari doktori, professor

**Yo'ldoshov Sherzod Abdullayevich**  
kimyo fanlari doktori, katta ilmiy xodim

**Yetakchi tashkilot:**

**Umumiy va noorganik kimyo instituti**

Dissertatsiya himoyasi O'zbekiston Milliy universiteti huzuridagi 03/30.12.2019.K.01.03 raqamli Ilmiy kengashning «\_\_»\_\_\_\_\_2025 yil soat\_\_\_ dagi majlisida bo'lib o'tadi. (Manzil: 100174, Toshkent, Universitet ko'chasi, 4-uy. Tel.: (+99871)227-12-24, faks: (+99824) 246-53-21; 246-02-24. e-mail: [ilmiy\\_kengash@nuu.uz](mailto:ilmiy_kengash@nuu.uz)).

Dissertatsiya bilan O'zbekiston Milliy universitetining Axborot-resurs markazida tanishish mumkin ( \_\_\_ raqam bilan ro'yxatga olingan). Manzil: (100174, Toshkent, Universitet ko'chasi, 4-uy. Tel.: (+99871) 246-67-71).

Dissertatsiya avtoreferati 2025 yil « \_\_\_ » \_\_\_\_\_ kuni tarqatildi.  
(2025 yil « \_\_\_ » \_\_\_\_\_dagi \_\_\_ – raqamli reestr bayonnomasi).

**Z.A. Smanova**

Ilmiy darajalar beruvchi  
Ilmiy kengash raisi, k.f.d., professor

**N.X. Qutlimurotova**

Ilmiy darajalar beruvchi  
Ilmiy kengash ilmiy kotibi, k.f.d., professor

**N.T. Kattayev**

Ilmiy darajalar beruvchi  
Ilmiy kengash qoshidagi ilmiy seminar raisi o'rinbosari,  
k.f.d., professor

## **KIRISH (falsafa doktori (PhD) dissertatsiyasi annotatsiyasi)**

**Dissertatsiya mavzusining dolzarbligi va zarurati.** Bugungi kunda dunyoda organik-noorganik polimer tuzilishli yarim o‘tkazgich xossasiga ega bo‘lgan gibril nanokompozit materiallar turli sohalarda katalizatorlar, yarim o‘tkazgich membranalar, himoya qoplamalari, sensorlar, sorbentlar sifatida keng qo‘llanilmoqda. Shu sababli fizik-kimyoviy xossalari yaxshilangan, past tannarxli, yuqori samarali va ekologik xavfsiz g‘ovaksimon kremnezem materiallarini yaratish muhim amaliy ahamiyat kasb etadi.

Jahonda gidrofil-gidrofob tabiatli, morfologiyasi va fizik-kimyoviy xususiyatlari boshqariladigan gibril kompozitlarni yaratish bo‘yicha faol tadqiqotlar olib borilmoqda. Zol-gel usuli yordamida kremnezem kompozitlarini sintez qilish, ayniqsa ZnO kabi fotokatalitik faol fazalarning tashuvchisi vazifasini bajara oladigan kremniy matritsalarini ishlab chiqish, shuningdek, ularga anorganik komponentlarni kiritish muhim ilmiy ahamiyat kasb etadi.

Mamlakatimizda zol-gel texnologiyasi asosida belgilangan sirt xususiyatli va boshqariladigan tuzilishga ega bo‘lgan yangi turdagi kremnezem kompozitsiyalarini yaratishda bir qator muhim natijalarga erishilmoqda. Yuqori samarali sorbsiya, fotokataliz, xromatografiya, shuningdek, gazga sezgir sensorlar va sensorli qoplamalarni yaratish uchun funksional nanofazalar (masalan, ZnO) joriy qilingan holda, kremniy gibril materiallarini yaratish bo‘yicha ilmiy-tadqiqot va tajriba-konstruktorlik ishlari olib borilmoqda. Bu tadqiqotlar mahsulot sifatini oshirish hamda “mahalliy xomashyoni chuqur qayta ishlash asosida yuqori qo‘shimcha qiymatga ega tayyor mahsulot ishlab chiqarish” ga qaratilgan 2022-2026 yillarga mo‘ljallangan Yangi O‘zbekistonning taraqqiyot strategiyasi vazifalariga to‘liq mos keladi. Shu nuqtayi nazardan, amfifil, boshqariladigan va berilgan teksturaga ega bo‘lgan kremnezem kompozitlarini ishlab chiqish zamonaviy fizik kimyoning dolzarb muammolardan biridir.

O‘zbekiston Respublikasi Prezidentining 2022 yilning 28 yanvardagi «2022-2026 yillarga mo‘ljallangan Yangi O‘zbekistonning taraqqiyot strategiyasi to‘g‘risida»gi PF-60-sonli Farmoni, 2019 yil 3 apreldagi PQ-4265-sonli «Kimyo sanoatini yanada isloh qilish va uning investitsiyaviy jozibadorligini oshirish chora-tadbirlari to‘g‘risida»gi Qarori va 2020 yil 12 avgustdagi PQ-4805-sonli «Kimyo va biologiya yo‘nalishlarida uzluksiz ta‘lim sifatini va ilm-fan samaradorligini oshirish chora-tadbirlari to‘g‘risida<sup>1</sup>»gi Qarorlari hamda mazkur faoliyatga tegishli boshqa me‘yoriy-huquqiy hujjatlarda belgilangan vazifalarni amalga oshirishda ushbu dissertatsiya tadqiqoti muayyan darajada xizmat qiladi.

**Tadqiqotning respublika fan va texnologiyalari rivojlanishining ustuvor yo‘nalishlariga mosligi.** Mazkur tadqiqot respublika fan va texnologiyalar rivojlantirishining VII. “Kimyo, kimyoviy texnologiyalar va nanotexnologiya” ustuvor yo‘nalishiga muvofiq bajarilgan.

---

<sup>1</sup> O‘zR Prezidentining 2022 yil 6-iyuldagi PF-60-son “2022-2026-yillarga mo‘ljallangan yangi O‘zbekistonning taraqqiyot strategiyasi to‘g‘risida”gi Farmoni

**Muammoning o'rganilganlik darajasi.** Xorijning qator yetakchi ilmiy markazlarida kremnezem asosidagi g'ovaksimon gibril kompozitsiyalar yaratish bo'yicha ilmiy izlanishlar olib borilgan. Jumladan, Ahmad Salama, Sonia Sequeyera, Vandana Singx, Arno Demilekamps, Xua Zou, Klement Sanches, C.J.Brinker, G.V. Sherrer, Daniyel Elich-Ali-Komi, I.V. Grenbenshikov, V.Ya. Shevchenko, O.A. Shilova, A.D. Pomogaylo, I.P. Suzdalev, P.D. Shabanova, Yu.A. Shipunov, I.B.Bakeyeva A.I. Suvorova tadqiqotlarida ushbu yo'nalishga keng o'rin berilgan. Ahmad Salama, A.I. Suvorova, P.D. Shabanova, Yu.A. Shipunov kabi tadqiqotchilarning ilmiy ishlari zol-gel usulida gibril kompozitlar sinteziga bag'ishlangan. Adabiyotlardagi ma'lumotlar tahlili mazkur gibril kompozitlarda suv va benzol bug'larining adsorbsiyalanishi orqali faol markazlarning tabiatini aniqlashga e'tibor qaratilmaganligini ko'rsatdi.

O'zbekistonda kremnezem asosidagi sistemalarni olish va ularning xossalarini tadqiq etish borasidagi ilmiy tadqiqotlar R.S. Tillayev, S.A. U.N. Musayev, B.J. Kabulov, O.N. Ro'zimurodov, H.I. Akbarov, E.K. Abdurahmonov, N.T. Kattayev, A.Yu. Yarkulov, J.Q. Mamatovlar tomonidan olib borilgan. Ushbu ishlar natijasida gibril organo-noorganik kompozitlarni sintez qilish usullari takomillashtirilib, ulardan xromatografiya, sensorlar, sorbsiya va katalitik tizimlarda foydalanish bo'yicha sezilarli amaliy natijalarga erishildi. Biroq, ko'rsatilgan ishlarning samaradorligiga qaramay, erituvchilarni sorbsiyalash mexanizmlari, shuningdek, faol markazlarning tabiatini va bunday kremnezem gibril tizimlarining strukturaviy xususiyatlarini ochib beruvchi to'liq termodinamik va fizik-kimyoviy ko'rsatkichlari yetarli darajada o'rganilmagan. Ushbu muammoni hal qilish dispers tizimlar va yangi avlod materiallari fizik-kimyosining ilmiy va amaliy jihatlarida ham qiziqish uyg'otadi.

**Dissertatsiya mavzusining dissertatsiya bajarilgan oliy ta'lim muassasasining ilmiy-tadqiqot ishlari bilan bog'liqligi.** Dissertatsiya tadqiqoti O'zbekiston Milliy universiteti ilmiy-tadqiqot ishlari rejasining № F-7-54-son "Nanostrukturali, g'ovakli va polimer-kremnezem gibril nanokompozit materiallari hosil bo'lishining fizik-kimyoviy qonuniyatlari va mexanizmlarini tadqiq etish" (2017-2020) mavzusidagi fundamental loyihasi doirasida bajarilgan.

**Tadqiqotning maqsadi.** Boshqariladigan gidrofil-gidrofob tabiatli kremnezem kompozitsiyalarining fizik-kimyoviy xossalarini tadqiq qilishdan iborat.

**Tadqiqotning vazifalari:**

Tetraetoksisilan (TEOS) va metiltrimetoksisilan (MTMS) asosida gidrofil va gidrofob SiO<sub>2</sub> namunalarini sintez qilish;

mahalliy ikkilamchi ishlatilgan katalizatoridan nanodispersli ZnO sintez qilish; gidrofil-gidrofob xususiyatlarga ega ZnO/SiO<sub>2</sub> kompozitlarini olish usullarini ishlab chiqish;

olingan namunalarni Raman, rentgen nurlari difraksiyasi, SEM, TEM-EDS, DLS, TG-DSK, BET, UV-Vis kabi fizikaviy tadqiqot usullari yordamida tavsiflash;

suv, benzol, azot bug'lari va metilen ko'ki eritmasiga nisbatan sorbsiya xususiyatlarini aniqlash;

UB, ko‘rinadigan va quyosh nurlari ta‘sirida metilen ko‘king fotokatalitik degradatsiyasini tahlil qilish;

sintez qilingan amfifil kremnezem va uning gibrid kompozitlarini real obyektlarda foydalanish imkoniyatlarini aniqlash.

**Tadqiqotning obyekti** sifatida tetraetoksisilan (TEOS) va metiltrimetoksisilandan (MTMS) olingan amorf kremniy dioksidlari ( $\text{SiO}_2$ ), mahalliy ikkilamchi ishlatilgan katalizatoridan ajratib olingan rux oksidi ( $\text{ZnO}$ ) hamda o‘zgaruvchan gidrofil va gidrofob xususiyatlarga ega  $\text{ZnO/SiO}_2$  kompozitlari olingan.

**Tadqiqotning predmeti.** Kremniy dioksidi va uning rux oksidi bilan kompozitsiyalarining hosil bo‘lishining fizik-kimyoviy qonuniyatlari, tuzilishi, sorbsiya hamda fotokatalitik xususiyatlari, shuningdek, bu materiallarning turli xil nurlanishlar ta‘sirida organik birikmalar (metilen ko‘ki) bilan o‘zaro ta‘sir qilish mexanizmlarini tahlil qilish hisoblanadi.

**Tadqiqot usullari.** Tahlil qilinayotgan namunalarning tuzilishi, morfologiyasi, g‘ovakli tuzilishi, termik barqarorligi, sorbsiya va fotokatalitik xususiyatlarini har tomonlama o‘rganish uchun fizik-kimyoviy tahlillarning zamonaviy usullari qo‘llanilgan: Raman spektroskopiyasi, rentgen fazaviy tahlil (XRD), skanerlovchi va transmission elektron mikroskoplari (SEM va TEM), nurni dinamik qaytarish (DLS), azot adsorbsiyasi (BET), termogravimetriya (TG/DSK/DTA) va UB-ko‘rinadigan spektrofotometriya (UV-Vis).

**Tadqiqotning ilmiy yangiligi** quyidagilardan iborat:

keng harorat oralig‘ida (25 dan 800 ° C gacha) barqaror, fizik-kimyoviy xususiyatlari yaxshilangan, ma‘lum bir gidrofil-gidrofob sirt yuzasi bilan  $\text{ZnO/SiO}_2$  kompozitlari sintez qilingan;

$\text{ZnO/SiO}_2$  gibrid kompoziti sintezida prekursorlarning tabiatini o‘zgartirish (TEOS/MTMS) olingan kompozitsiyalarning sirt morfologiyasi va g‘ovaklar o‘lchamini (1,8 dan 7,3 nm gacha) maqsadli nazorat qilish imkonini berishi hamda bu ularning sorbsiya sig‘imi (suv bug‘lari uchun 4,3 mol/kg gacha) va fotokatalitik xossalriga (quyosh nuri ta‘sirida MK ning parchalanishi 96 % gacha) bevosita ta‘sir qilishi aniqlangan;

$\text{ZnO/SiO}_2$  gibrid kompoziti fotokatalitik faolligining kremniy matritsasi yuzasining gidrofoblanish darajasiga bog‘liqligi turli xil nurlanishlar UB, ko‘rinadigan hamda quyosh nurlari ta‘sirida metilen ko‘ki organik bo‘yog‘ining parchalanish jarayonlarini batafsil kinetik tahlil qilingan va quyosh nuri ta‘sirida MK organik bo‘yog‘ini bir soat davomida 96 % gacha parchalashi tasdiqlangan;

$\text{ZnO/SiO}_2$  gibrid kompoziti ishtirokidagi fotokatalitik destruksiya jarayonlari psevdobirinchi kinetik modelga mos tushishi korrelyatsiya koefitsiyentining  $R^2=0,9966$  gacha ekanligi va fotodestruksiyaning yuqori ko‘rsatkichi bilan isbotlangan;

$\text{ZnO/SiO}_2$  gibrid kompozitiga MK organik bo‘yog‘ining sorbsiya termodinamik parametrlari:  $\Delta H^\circ=+12,15$  kJ/mol gacha;  $\Delta G^\circ$  -3,77 dan -1,48 kJ/mol gacha ekanligi aniqlanib, bo‘yoqning turli tabiatdagi kompozitlarning faol markazlari bilan ta‘sir mexanizmlari tasdiqlangan.

**Tadqiqotning amaliy natijalari** quyidagilardan iborat:

ishlab chiqilgan materiallar keng qo'llanilish doirasiga ega va sorbsiya qobiliyati, termik barqarorlik hamda fotokatalitik faollikni birlashtirgan bir qator foydali xususiyatlarni namoyish etishi aniqlangan;

ZnO/gidrofil-SiO<sub>2</sub> kompoziti quyosh nuri tasirida 60 daqiqada metilen ko'ki organik bo'yog'ining 96% gacha parchalanishi aniqlangan;

ZnO/gidrofob-SiO<sub>2</sub> kompoziti benzol bug'larini (1,90 mol/kg gacha) sorbsiyalashda samarali ekanligi hamda ularning organoselektiv filtrlashda qo'llanilishi isbotlangan;

mahalliy ikkilamchi xomashyodan (GIAP-10 foydalanilgan katalizator) foydalanish kompozitlar narxini tijorat analoglariga nisbatan 30-40% ga kamaytirish imkonini berishi isbotlangan.

**Tadqiqot natijalarining ishonchliligi.** Natijalar o'lchovlar paytida olingan ma'lumotlarning takrorlanishi, tahlilning bir-birini to'ldiruvchi fizik-kimyoviy usullari majmuasidan foydalanish va tajribaviy ma'lumotlarni nazariy modellari bilan tasdiqlash orqalita'minlanadi. Hisob-kitoblarning to'g'riligi ishlatiladigan kinetik va termodinamik modellarning ko'pchiligi uchun yuqori darajadagi korrelyatsiya koeffitsiyenti ( $R^2 \geq 0,95$ ) bilan izohlangan.

**Tadqiqot natijalarining ilmiy va amaliy ahamiyati.** Tadqiqot natijalarining ilmiy ahamiyati rux oksidi bilan kremnezem kompozitlarining murakkab xususiyatlariga prekursorlar, morfologiya va dispersiyaning ta'sirini tizimli o'rganish bilan izohlangan. Birinchi marta termodinamik xususiyatlar ( $\Delta H^\circ$ ,  $\Delta G^\circ$ ) va yuqori korrelyatsiya koeffitsiyentlari ( $R^2 = 0,9966$  gacha) hisob-kitoblari bilan tasdiqlangan sorbsiya va fotokatalizning gidrofoblanish darajasi, g'ovakli tuzilishi va kinetik parametrlari o'rtasidagi miqdoriy munosabatlar o'rnatilgan. Olingan ma'lumotlar organik ifloslantiruvchi moddalarni sorbsiyalash va parchalash jarayonlarida sirt parametrlarini kompozitlarning samaradorligiga ta'sirini tushuntirib berishga asos bo'lib xizmat qilishi aniqlanganligi bilan izohlanadi.

Tadqiqot natijalarining amaliy ahamiyati yuqori sorbsiya qobiliyati, termik barqaror va fotokatalitik faol kombinatsiyasiga ega bo'lgan ZnO/SiO<sub>2</sub> kompozitlarini ishlab chiqishdadir, bu ularni ekologik va texnologik qo'llash uchun istiqbolli materiallarga aylantirdi. Hidrofil kompozitlar quyosh nuri ta'sirida 60 daqiqada metilen ko'king 96% gacha fotodestruksiya samaradorligini va gidrofob namunalar benzolning 1,90 mol/kg gacha sorbsiyasini ta'minlagan. Solishtirma sirt yuzasi (279 m<sup>2</sup>/g gacha) va g'ovak hajmi (0,29 sm<sup>3</sup>/g gacha) qiymatlari materialning kam miqdori bilan ham yuqori faollikni ta'minlagan. GIAP-10 chiqindilaridan foydalanish sintez tannarxini 30-40% ga kamaytirish imkonini berishi bilan izohlanadi.

**Tadqiqot natijalarining joriy qilinishi.** Sintezlangan kremnezem materiallari va ularning rux oksidi bilan kompozitsiyalarining tuzilishi, fazaviy tarkibi, morfologiyasi va teksturaviy xususiyatlarini sintez qilish va har tomonlama tahlil qilish asosida:

ZnO/SiO<sub>2</sub> kompoziti "Shurtan neft va gaz qazib chiqarish boshqarmasi" markaziy kimyo laboratoriyasida "2026-2027-yillarda amalga oshirish uchun

istiqbolli ishlanmalar ro'yxati"ga kiritilgan (Shurtan neft va gaz qazib chiqarish boshqarmasi 2025 yil 2 oktyabrdagi OP 02-son malumotnomasi, ED-3448). Natijada tabiiy gazni H<sub>2</sub>S dan <1 ppm konsentratsiyasigacha tozalash imkonini bergan;

ZnO/SiO<sub>2</sub> kompozitsiyasi "Navoiy kon-metallurgiya kombinati" AJ Markaziy ilmiy laboratoriyasida "2026-2027-yillarda amalga oshirish uchun istiqbolli ishlanmalar ro'yxati"ga kiritilgan (Navoiy kon-metallurgiya kombinati AJ Markaziy ilmiy laboratoriyasida 2025 yil 8 oktyabrdagi № 02-07/027/10451 son ma'lumotnomasi). Natijada tabiiy gazni H<sub>2</sub>S dan 99,0 % gacha tozalash imkonini bergan.

**Tadqiqot natijalarining aprobatsiyasi.** Tadqiqot natijalari bo'yicha 10 ta, shu jumladan, 3 xalqaro va 7 respublika ilmiy-amaliy konferensiyalarida ma'ruza qilingan va muhokamadan o'tkazilgan.

**Tadqiqot natijalarining e'lon qilinishi.** Dissertatsiya ishi bo'yicha jami 16 ta ilmiy ishlar chop etilgan, O'zbekiston Respublikasi OAK ning ilmiy ishlar natijalarini chop etishga tavsiya etilgan ilmiy nashrlarda 6 ta maqola, jumladan 4 tasi respublika va 2 tasi xalqaro jurnallarda nashr etilgan.

**Dissertatsiyaning tuzilishi va hajmi.** Dissertatsiya kirish, beshta bob, xulosalar, foydalanilgan adabiyotlar ro'yxati va ilovalardan iborat. Dissertatsiyaning hajmi 123 betni tashkil etadi<sup>1</sup>.

## DISSERTATSIYANING ASOSIY MAZMUNI

**Kirish** qismida o'tkazilgan tadqiqotlarning dolzarbligi va zarurati asoslangan, tadqiqotning maqsadi va vazifalari, obyekt va predmetlari tavsiflangan, respublika fan va texnologiyalari rivojlanishining ustuvor yo'nalishlariga mosligi ko'rsatilgan, tadqiqotning ilmiy yangiligi va amaliy natijalari bayon qilingan, olingan natijalarning ilmiy va amaliy ahamiyati ochib berilgan, tadqiqot natijalarini amaliyotga joriy qilish, nashr etilgan ishlar va dissertatsiya tuzilishi bo'yicha ma'lumotlar keltirilgan.

Dissertatsiyaning "**Gidrofil-gidrofob xususiyatli kremnezem va uning kompozitlari**" deb nomlangan **birinchi bobida** kremniy oksidi, rux oksidi va ularning kompozitlarini ishlab chiqarish hamda qo'llash bo'yicha olib borilayotgan tadqiqotlarning hozirgi holatini aks ettiruvchi adabiyotlar sharhi berilgan. Turli sirt tabiatiga ega (TEOS, MTMS) SiO<sub>2</sub> sinteziga zol-gel yondashuvlari, nanodispers ZnO ning xususiyatlari va uni ikkilamchi foydalanilgan katalizatordan olish ko'rib chiqilgan. ZnO/SiO<sub>2</sub> kompozitlariga, ularning strukturaviy va funksional xususiyatlariga, shuningdek, amaliy muammolar – suvni tozalash, bo'yoqlarning fotodestruksiyasi va gazlarning sorbsiyasiga alohida e'tibor berilgan. Sorbsiya hamda fotokatalizning kinetik va termodinamik modellari tahlil qilindi. Adabiyotlarni ko'rib chiqish mavzuning dolzarbligini tasdiqladi va o'rganilayotgan tizimlar hamda uslubiy yondashuvlarni tanlashni asosladi.

---

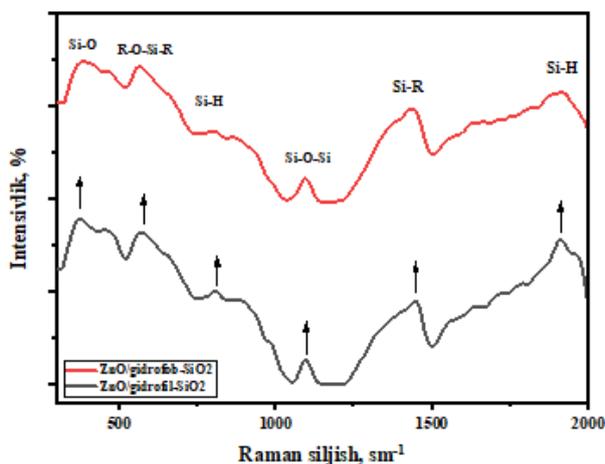
<sup>1</sup> Muallif dissertatsiya ishini bajarishda bergan ilmiy maslahatlari uchun kimyo fanlari doktori, professor N.T. Kattayevga o'zining samimiy minnatdorchiligini bildiradi.

Dissertatsiyaning “**Tetraetoksisilan, metiltrimetoksisilan va rux oksidi asosidagi kremnezem kompozitsiyalari namunalarini sintez qilish va o‘rganish usullari**” deb nomlangan **ikkinchi bobida** TEOS va MTMS prekursorlari, nanodisperslangan rux oksidi va boshqariladigan sirt tabiatiga ega ZnO/SiO<sub>2</sub> kompozit materiallardan foydalangan holda gidrofil-gidrofob kremnezem sintez qilishning optimallashtirilgan usullari keltirilgan. Gidrofil SiO<sub>2</sub> ishqoriy muhitda pH≈10, harorat 35-40°C va keyinchalik quritish va kalsinatsiya bilan olindi, bu silanol guruhlarining saqlanishini ta’minladi. MTMS ning joriy etilishi gidrolizlanmay qolgan –CH<sub>3</sub> guruhlari bo‘lgan gidrofob tuzilmani hosil qilish imkonini beradi, suvning sorbsiyani kamaytiradi va termik barqarorlikni oshiradi.

Rux oksidi mahalliy katalizator chiqindilaridan cho‘ktirish va gidrotermik ishlov berish yo‘li bilan sintezlanib, 30-40 nm o‘lchamdagi sof ZnO nanozarrachalari olindi. ZnO/SiO<sub>2</sub> kompozitlarining kombinatsiyalangan sintezi gel hosil bo‘lish bosqichida Zn<sup>2+</sup> yoki tayyor ZnO ni kiritish bilan zol-gel texnologiyasidan foydalangan holda amalga oshirildi. Sintez parametrlarini nazorat qilish –pH, komponentlar nisbati, termik ishlov berish usuli - amorf yoki mezostrukturali kremnezem matritsada nanofazaning tekis taqsimlangan kompozitlarni olish imkonini berdi.

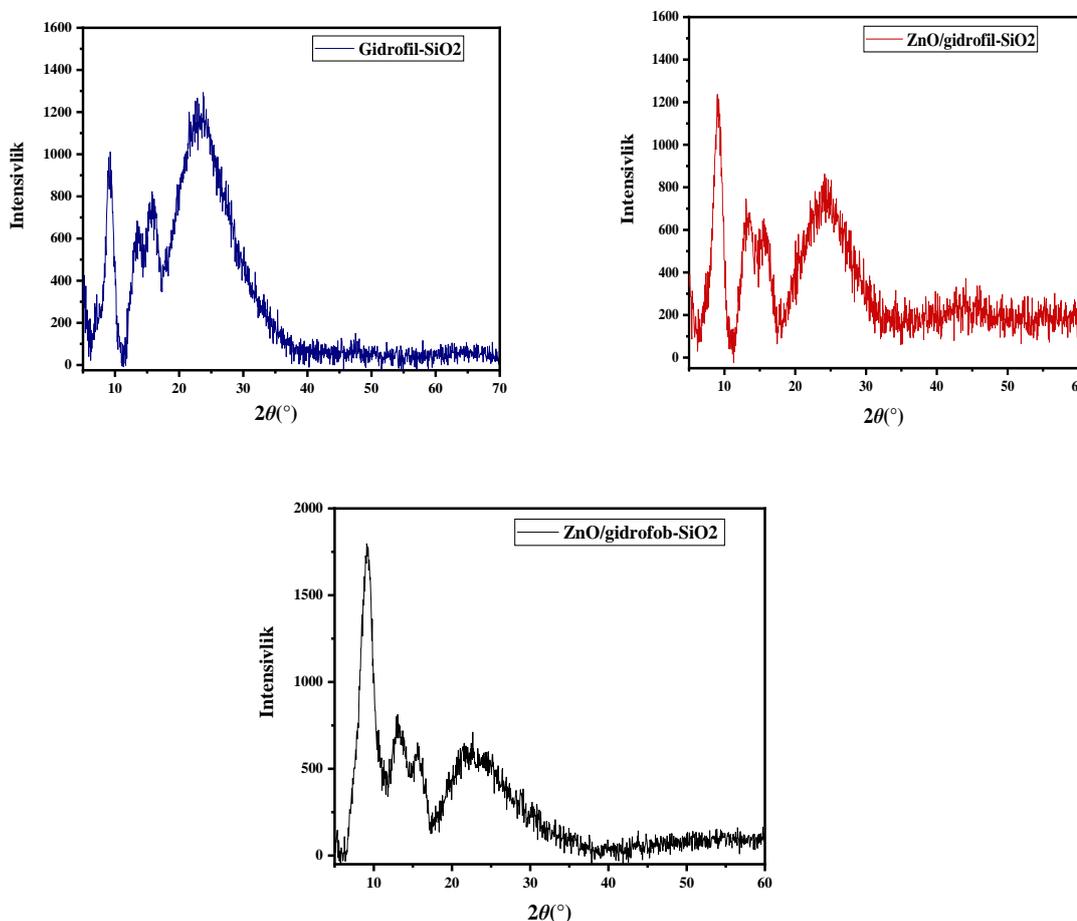
Dissertatsiyaning “**Gidrofil-gidrofob kremnezem va uning rux oksidli kompozitlarini sintezi va tuzilish xususiyatlari**” deb nomlangan **uchinchi bobida** rux oksidi bilan sintez qilingan kremnezem materiallari va ularning kompozitsiyalarining tuzilishi, fazaviy tarkibi, morfologiyasi va teksturaviy xususiyatlarini har tomonlama tahlil qilish natijalari berilgan.

Raman spektrlarining qiyosiy tahlili gidrofil namunalarda xarakterli Si–OH (~970 sm<sup>-1</sup>) va –CH<sub>3</sub> guruhlari (~1260–1280 va 1400–1470 sm<sup>-1</sup>) deformatsiya tebranishlari gidrofob shakllarda mavjudligini aniqladi, bu muvaffaqiyatli kimyoviy modifikatsiyani ko‘rsatadi. ZnO/SiO<sub>2</sub> kompozitlarining spektrlarida modifikatsiyadan so‘ng ~ 960 sm<sup>-1</sup> da intensiv polosa yo‘qoladi, bu erkin Si–OH guruhlarini yo‘qolganligini ko‘rsatadi. Bundan tashqari, spektrlarda Zn–O va kremniyning strukturaviy elementlari, shu jumladan D<sub>1</sub>-halqalarining tebranishlariga mos keladigan sohalar aniqlandi.



**1-rasm. Gidrofil (qora chiziq) va gidrofob (qizil chiziq) ZnO/SiO<sub>2</sub> kompozitlarining Raman spektrlari**

Rentgen fazaviy tahlili SiO<sub>2</sub> ning amorf tabiatini ( $2\theta = 22-25^\circ$  sohada keng maksimal diffraksiya) va kompozit namunalarda (100), (002), (101) va boshqalarga mos keladigan xarakterli tekisliklarida ZnO vyursit strukturasi mavjudligini tasdiqladi.

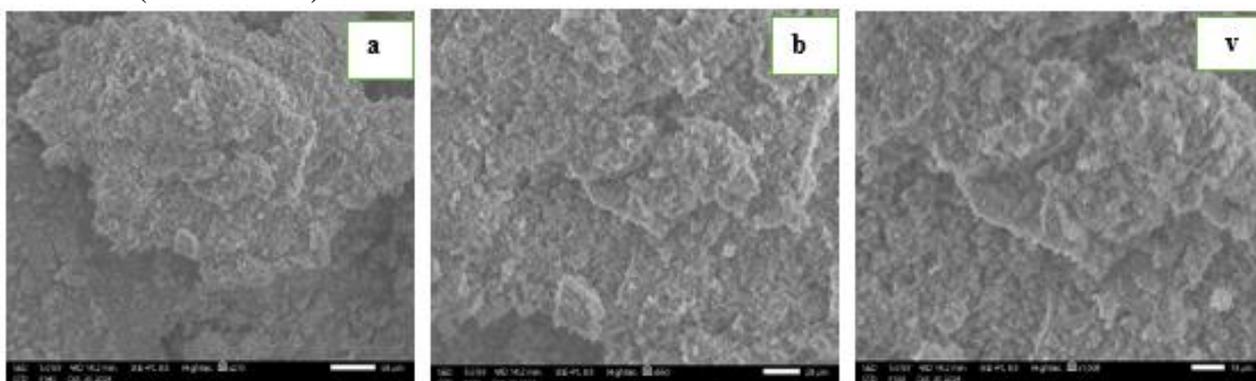


**2-rasm. SiO<sub>2</sub>, ZnO/gidrofil-SiO<sub>2</sub> va ZnO/gidrofob-SiO<sub>2</sub> namunalari 2θ = 10–70° oralig‘ida rentgen nurlari diffraksiyasi spektrlari**

Sherrer tenglamasi yordamida hisoblangan ZnO kristallitlarining o‘lchamlari 30-35 nm ni tashkil qildi. Shuningdek, kompozitsiyalarda  $2\theta = 20-35^\circ$  oralig‘ida bir nechta past intensivlikdagi, qisman yoyilgan piklarning kuzatilishi kompozitsiyada ZnO nanodispers zarrachalarining mavjudligidan dalolat beradi.  $2\theta = 40^\circ$  dan yuqori burchaklarda intensivlikning keskin kamayishi va kristall fazaga xos cho‘qqilarning yo‘qligi kompozitsiyada amorf komponentning ustunligini yanada tasdiqlaydi. Umuman olganda, XRD natijalari ZnO–SiO<sub>2</sub> kompozitsiyasi yuqori darajada amorf tuzilishga ega bo‘lib, ZnO ning kristall fazasi juda kichik miqdorda yoki nanoo‘lchamdagi tarqalgan holatda ekanini ko‘rsatadi.

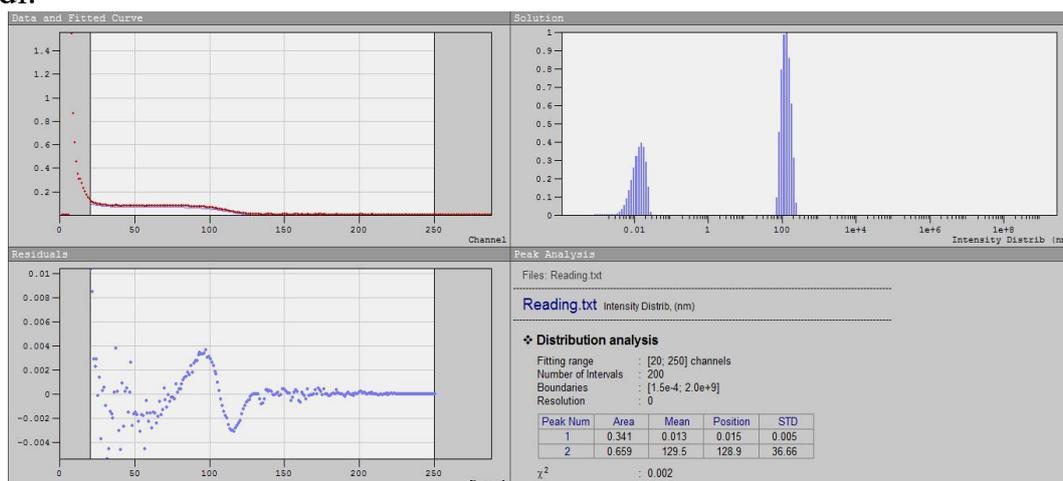
Morfologiya  $\times 270 - \times 2700$  kattalashtirishda o‘rganildi. Hidrofil kremnezem 2 mkm gacha bo‘lgan to‘rsimon, tolasimon arxitekturali agregatlar, shu bilan birga 100-500 nm o‘lchamdagi submikron zarralari mavjudligi bilan ajralib turadi. Gidrofob kremnezem zich bo‘lmagan, kukunsimon morfologiyaga ega bo‘lib, asosan yumaloq zarrachalar va joylashish zichligi kamroq. ZnO/SiO<sub>2</sub> kompozitlari iyerarxik tuzilishni namoyish etadi: makroagregatlardan (50-150 mkm) kremnezem

matritsada bir tekis taqsimlangan nano o'lchamdagi ZnO qo'shimchalarini ko'rish mumkin (50-150 nm).



**3-rasm.  $\times 240$  (a),  $\times 550$  (b) va  $\times 1000$  (c) kattalashtirishdagi ZnO/gidrofil-SiO<sub>2</sub> kompozitining SEM tasviri**

DLS tahlili zarrachalar tarqalishining bimodal xususiyatini tasdiqladi: asosiy cho'qqi individual nanozarrachalarga (7-10 nm), ikkinchi cho'qqi 100-270 nm o'lchamdagi agregatlarga to'g'ri keldi. Bu elektron mikroskopiya natijalariga mos keladi va sintez to'g'ri amalga oshirilgan sharoitida dispers tizimning barqarorligini ko'rsatadi.



**4-rasm. DLS orqali ZnO/ gidrofil-SiO<sub>2</sub> kompoziti zarrachalarining o'lchamlar bo'yicha taqsimotini**

BET usuli bilan olingan tekstura xarakteristikalari gidrofil materiallar kattaroq solishtirma sirt yuzasiga (98,5 m<sup>2</sup>/g gacha) va g'ovaklarning kichikroq radiuslariga (1,8-2,4 nm) ega bo'lib, qutbli moddalarning samarali sorbsiyasini ta'minlaydi. Gidrofob kompozitlar kengroq g'ovak o'lchamiga (7,3 nm gacha), lekin kichikroq sirt yuzasiga (40-60 m<sup>2</sup>/g), bu benzol kabi organik birikmalarning sorbsiyasini osonlashtiradi. Kompozitlarda g'ovaklarning hajmi 0,29 sm<sup>3</sup>/g ga yetdi.

Energiya dispers tahlili Zn va O ning kompozitlarda teng taqsimlanishini tasdiqladi, bu ZnO ning matritsaga kiritilishining bir jinsliligini ko'rsatdi. Zn ulushi og'irlik bo'yicha 73% gacha bo'lgan (komponentlarning dastlabki nisbatiga qarab), bu hisoblangan ma'lumotlar va spektrlarga mos keladi.

TG/DSK/DTA ma'lumotlariga ko'ra, SiO<sub>2</sub> ning gidrofil shakllari termik destruksiyaning uchta asosiy bosqichi bilan tavsiflanadi: fizik adsorbsiyalangan namlikni 150°C gacha yo'qotish, 150-500°C oralig'ida degidroksillanish (massa yo'qotish 2% gacha), shuningdek, 10% gacha bo'lgan degidroksillanish shuningdek termik stabillik kuzatiladi. 600°C dan yuqori haroratlarda siloksan to'ring (7,57% gacha qo'shimcha yo'qotish) qisman parchalanishi kuzatiladi. Gidrofob namunalar yuqori termik barqarorlikni namoyish etadi: birinchi bosqich kamroq massa yo'qotilishi bilan tavsiflanadi (gidrofil analoglar uchun 13,87% ga nisbatan 9,54%) va ikkinchi bosqich (293-538°C) 4,53% ni tashkil qiladi, bu gidrofillik va namlik sorbsiyasining pasayishini ko'rsatadi. ZnO/SiO<sub>2</sub> kompozitlari shunga o'xshash ko'p qatlamli termik parchalanish modelini saqlab qoladi, lekin umumiy massa yo'qotilishi odatda 24% dan oshmaydigan termik barqarorlikni namoyish etadi.

**1-jadval**

**Gidrofil va gidrofob SiO<sub>2</sub> kompozitlarining ZnO bilan termik parchalanishining kinetik va termodinamik parametrlari**

Kompozit turi	Bosqichlar	T, °C	Massa yo'qotilishi (%)	E <sub>a</sub> (kJ/mol)	ΔH (kJ/mol)	ΔS (J/mol·K)	ΔG (kJ/mol, 500 °C)
Gidrofil	I (degidradatsiya)	18–430	16.78	60–80	55–75	65–85	18–22
Gidrofil	II (destruksiya)	430–802	7.78	100–130	90–110	45–65	40–46
Gidrofob	I (degidradatsiya)	15–378	5.14	70–90	65–80	35–55	22–26
Gidrofob	II (destruksiya)	378–802	9.09	90–120	80–100	40–60	36–42

Kissindjer va Koatsa–Redferna modellari bo'yicha suvsizlanish va degidroksillanish jarayonlarining faollashuv energiyasi (E<sub>a</sub>) 55-130 kJ/mol ekanligi aniqlandi. Gidrofil SiO<sub>2</sub> uchun ΔH qiymatlari parchalanishning yakuniy bosqichida 140 kJ/mol ga yetdi, 500°C da ΔG esa 62 kJ/mol gacha bo'lgan, bu jarayonlarning energiya sarflovchi xususiyatini tasdiqlaydi. Shu bilan birga, gidrofob namunalar uchun ΔG 32-54 kJ/mol oralig'ida, bu termodinamik jihatdan barqarorroq tuzilishni ko'rsatadi. ΔS entropiya qiymatlari o'zgartirish bosqichi va turiga qarab 40 dan 85 (J/mol·K) gacha o'zgarib turadi, bu strukturaning tartibi va parchalanish mexanizmlaridagi farqlarni aks ettiradi. Ushbu ma'lumotlar optimal ish sharoitlarini tanlash va materiallarning issiqlik qayta tiklanishi uchun muhimdir.

Shunday qilib, uchinchi bob ma'lum morfologiya, fazaviy tarkib va teksturali xususiyatlarga ega bo'lgan materiallarni boshqariladigan sintez qilish imkoniyatini tasdiqlaydi. Olingan ma'lumotlar asosida strukturani maqsadli o'zgartirish kremniy kompozitlarining funksional xususiyatlarini, shu jumladan sorbsiya va fotokataliz qobiliyatini nazorat qilish imkonini beradi.

Dissertatsiyaning **“Gidrofil-gidrofob kremniy va uning rux oksid bilan kompozitlarining adsorbsion xususiyatlari”** deb nomlangan to'rtinchi bobida sintez qilingan materiallarning sorbsion xossalari har tomonlama tahlil qilish natijalari keltirilgan. Suv va benzol bug'lari, azot va metilen ko'king suvdagi eritmaları sorbsiyasining izotermik tadqiqotlari gravimetrik adsorbsiya usuli, past haroratli gaz adsorbsiyasi va UV-Vis spektrofotometriyasi yordamida amalga

o'shirildi. Sorbatlar sifatida qutbli ( $H_2O$ , metilen ko'ki) va qutbsiz (benzol) molekulalar tanlangan, bu o'rganilayotgan sirtlarning turli sinfdagi birikmalar bilan o'zaro ta'sirini tavsiflash imkonini beradi. Suv bug'i adsorbsiya izotermalari ZnO nanozarralari eng yuqori gigroskopiklikka (4,3 mol/kg gacha) ega ekanligini ko'rsatdi, bu yuqori solishtirma sirt yuzasi (279,6 m<sup>2</sup>/g gacha) va nuqsonli gidrofil markazlarning mavjudligi bilan bog'liq. Gidrofil kremnezem suvni 0,875 mol/kg gacha sorbsiyalaydi, metil guruhini o'z ichiga olgan prekursorlar (MTMS) bilan sirtini o'zgartirish suvning yutilishini 0,6 mol/kg gacha kamaytiradi. ZnO/SiO<sub>2</sub> kompozitlari sirt turiga qarab oraliq qiymatlarni (1,3–0,9 mol/kg) ko'rsatadi. Solishtirma sirt yuzasi ( $S_{sol}$ ), mikrog'ovak hajmi ( $W_o$ ), umumiy g'ovak hajmi ( $V_s$ ) va o'rtacha g'ovak radiusi ( $R_{o,r}$ ) ning hisoblangan qiymatlari mos ravishda 38–98 m<sup>2</sup>/g, 0,026–0,073 sm<sup>3</sup>/g va 1,8–3,3 nm oralig'ida o'zgaradi. Brunauer-Emmet-Teller tasnifi bo'yicha izotermalar turini tahlil qilish mezog'ovakli tuzilmalarga xos bo'lgan aniq gisterezis bilan II va IV turlarga mos kelishini ko'rsatdi.

## 2-jadval

### Kremnezem, rux oksidi va ular asosidagi kompozitlarning suv bug'lari sorbsiya izotermalari asosida olingan kapillyar-g'ovaklik ko'rsatkichlari

No	Namunalar	A, mol/kg	$S_{sol}$ , m <sup>2</sup> /g	$W_o$ , sm <sup>3</sup> /g	$V_s$ , sm <sup>3</sup>	$W_{me}$ , sm <sup>3</sup> /g	$R_{o,r}$ , nm
1	ZnO nanozarrachalari	4.300	279.6	0.2027	0.2862	0.080	2.05
2	Gidrofil-SiO <sub>2</sub>	0.875	56.9	0.0516	0.0942	0.040	3.31
3	Gidrofob-SiO <sub>2</sub>	0.599	38.9	0.0261	0.0351	0.010	1.80
4	ZnO/gidrofil-SiO <sub>2</sub>	1.311	85.2	0.0678	0.1021	0.030	2.40
5	ZnO/gidrofob-SiO <sub>2</sub>	0.909	59.1	0.0449	0.0655	0.020	2.22

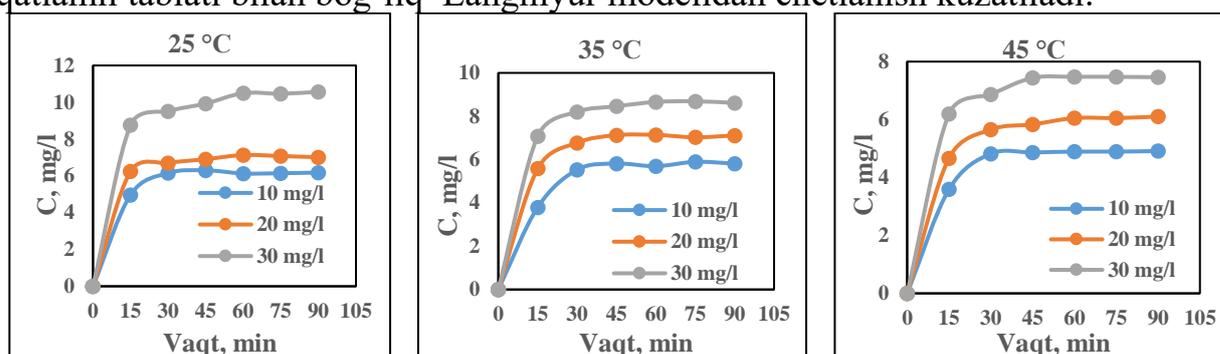
Benzolning sorbsiyasi gidrofob namunalarda yaqqol namoyon bo'lgan: gidrofob-SiO<sub>2</sub> uchun 1,90 mol/kg gacha, bu ularning organofilligini tasdiqlaydi. Kompozitlar barqaror sorbsiya faolligini (0,4 mol/kg gacha) ko'rsatdi, bu makro g'ovakli tuzilish va kuchsiz sirt tarangligining kombinatsiyasi bilan ta'minlanadi. ZnO uchun benzolning sorbsiyasi minimal (~0,09 mol/kg), bu uning yuqori qutbliligi bilan izohlanadi. Benzol adsorbsiyasi uchun hisoblangan g'ovaklik parametrlari gidrofob namunalarda benzol adsorbsiyasi uchun keng kanallar ( $r_{o,r}$  7,3 nm gacha) mavjudligini tasdiqlaydi. Bunday materiallar organik bug'larni filtrlash va membranalarda istiqbolli hisoblanadi.

Past haroratli azot adsorbsiya izotermalari o'rganilayotgan materiallarning haqiqiy sirt maydoni va tekstura parametrlarini baholashga imkon berdi. Azot sorbsiyasining maksimal qiymatlari va yuqori darajada rivojlangan g'ovakli struktura (g'ovak hajmi 0,29 sm<sup>3</sup>/g gacha) gidrofil va aralash kompozitlarda topilgan. Gisterezis halqalarining tabiati kapillyar kondensatsiyaga ega bo'lgan mezog'ovakli tizimlarga mos keladi. Ushbu namunalardagi sirt maydoni 20 m<sup>2</sup>/g dan oshishi mumkin, bu gazlar va bug'lar uchun sezilarli sorbsiya potensialini ta'minlaydi.

**Kremnezem va uning rux oksidli kompozitlarining suyuq azot bug'lariga nisbatan kapillyar-g'ovak parametrlari**

Namunalar	Sirt yuzasi (m <sup>2</sup> /g)	G'ovaklarning o'rtacha radiusi (nm)
ZnO nanozarrachalari	27,37	0,408
Gidrofil-SiO <sub>2</sub>	9,91	3,82
Gidrofob-SiO <sub>2</sub>	11,90	3,51
ZnO/gidrofil-SiO <sub>2</sub>	26,14	1,68
ZnO/gidrofob-SiO <sub>2</sub>	37,4	4,05

Metilen ko'kning sorbsiyasi asosida suvli eritmalar bilan o'zaro ta'sirning kengaytirilgan kinetik-termodinamik tahlili o'tkazildi. 25-45°C haroratda gidrofil kompozitlarning sorbsiya qobiliyati 14,1 mg/g ga, gidrofob kompozitlar esa 16,3 mg/g ga yetgan. Ct/C<sub>0</sub> ning vaqtga bog'liqligi psevdoinkinchi tartibli model ( $R^2 > 0,98$ ) bilan yaxshi yaqinlashtirilgan bo'lib, bu jarayonning kimyoviy jihatdan boshqariladigan tabiatini ko'rsatadi. Freyndlix izotermalari ( $n=0,24-0,89$ ) kooperativ sorbsiya mexanizmini va sirtning geterogen xususiyatini aks ettiradi. Ba'zi hollarda, energiya markazlarining geterogenligi va adsorbsiyaning ko'p qatlamli tabiati bilan bog'liq Langmyur modelidan chetlanish kuzatiladi.



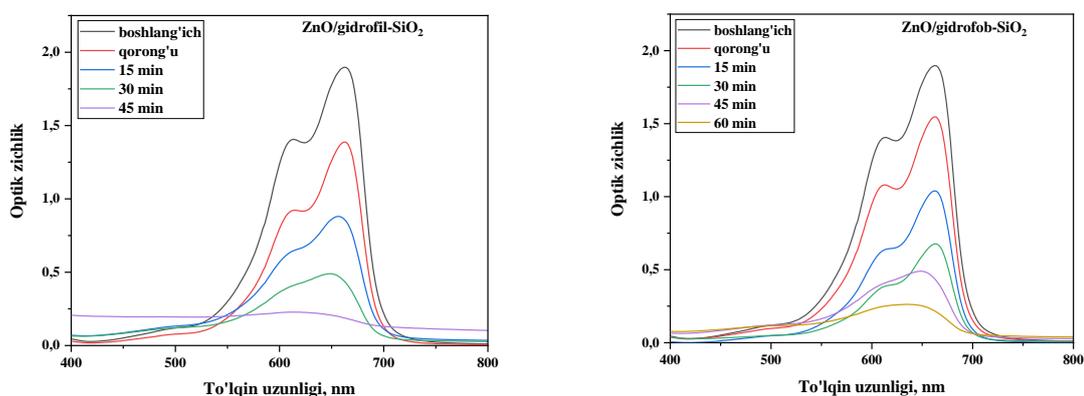
**5-rasm. ZnO/gidrofil-SiO<sub>2</sub> kompozitiga MK ning sorbsiyalanish kinetikalari**

Vant-Goff tenglamasidan foydalangan holda termodinamik tahlil MK sorbsiya jarayonlari o'z-o'zidan sodir bo'lishi ( $\Delta G^\circ$  -1,48 dan -3,77 kJ/mol gacha) va endotermik ( $\Delta H^\circ$  +5,6 dan +12,2 kJ/mol gacha) ekanligini ko'rsatadi. Shu bilan birga, entropiya o'zgarishining ortishi ( $\Delta S^\circ$  +50 J/(mol·K) gacha), ayniqsa, gidrofob modifikatsiyaga ega bo'lgan tizimlarda yaqqol kuzatiladi, bu sirt bilan o'zaro ta'sirlashganda molekulalarning erkinlik darajasining ortishidan dalolat beradi. Bunday parametrlar suvli eritmalarini tozalashda sorbentlarning yuqori samaradorligini va yuqori haroratlarda sorbsion komplekslarning barqarorligini tasdiqlaydi. Bundan tashqari, jarayonning haroratga bog'liqligi vaqt o'tishi bilan sorbsiya energiyasidagi o'zgarishlarni baholashga imkon berdi, bu esa kompozitlarning maqsadli moddalarga termodinamik selektivligini tasdiqladi.

Olingan natijalar modifikatsiyalangan ZnO/SiO<sub>2</sub> kompozitlari gaz va suyuq fazalardan qutbli va qutbsiz organik moddalarni ajratib olish uchun universal va termodinamik jihatdan qulay materiallar ekanligini ko'rsatadi. Ular oqava suvlarni tozalash texnologiyasida, sensorli qoplamlarni yaratishda va atrof-muhit

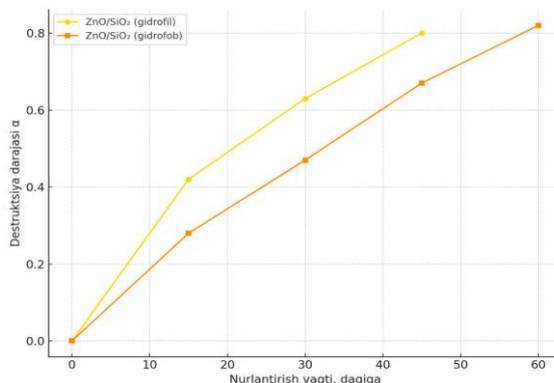
monitoringi uchun sorbsion-katalitik tizimlarning bir qismi sifatida ishlatilishi mumkin.

Dissertatsiyaning “**Gidrofil-gidrofob kremniy va uning rux oksid bilan kompozitlarining fotokatalitik xususiyatlari**” deb nomlangan **beshinchi bobida** UB, ko‘rinadigan va quyosh nurlanishi ta‘sirida sintez qilingan materiallarning fotokatalitik xossalarini har tomonlama o‘rganish natijalari keltirilgan. Model ifloslantiruvchi sifatida MK ishlatilgan va fotodegradatsiya jarayonlarining samaradorligi UB-ko‘rinadigan spektrofotometriya yordamida  $\lambda=662$  nm to‘lqin uzunligidagi eritmaning optik zichligi o‘zgarishi bilan baholandi. Turli fotokatalitik tizimlar faoliyatiga MK degradatsiyasi kinetikasi, sirt tabiatining ta‘siri, gidrofoblanish darajasi va nurlanish turi tahlili o‘tkazildi.



**6-rasm. ZnO/gidrofil-SiO<sub>2</sub> va ZnO/gidrofob-SiO<sub>2</sub> kompozitlarishtirokida quyosh nuri ta'sirida MK eritmasining yutilish intensivligining o'zgarishi**

Qiyosiy tahlil nanodisperslangan ZnO eng yuqori fotokatalitik faollikni ko‘rsatdi: MK degradatsiyasi darajasi quyosh nuri ta‘sirida 60 daqiqada 96,0% ga yetdi. Bu uning yuqori solishtirma sirt yuzasi, dispersligi va zaryad tashuvchilarning samarali uzatilishi bilan bog‘liq. Shu bilan birga, makro tuzilishdagi ZnO bir muncha past faollikni namoyish etdi (malum vaqtning oralig‘ida  $\approx 70\%$ ), bu  $e^-/h^+$  juftlarining ko‘proq rekombinatsiyasi va cheklangan miqdordagi faol markazlar bilan bog‘liq.

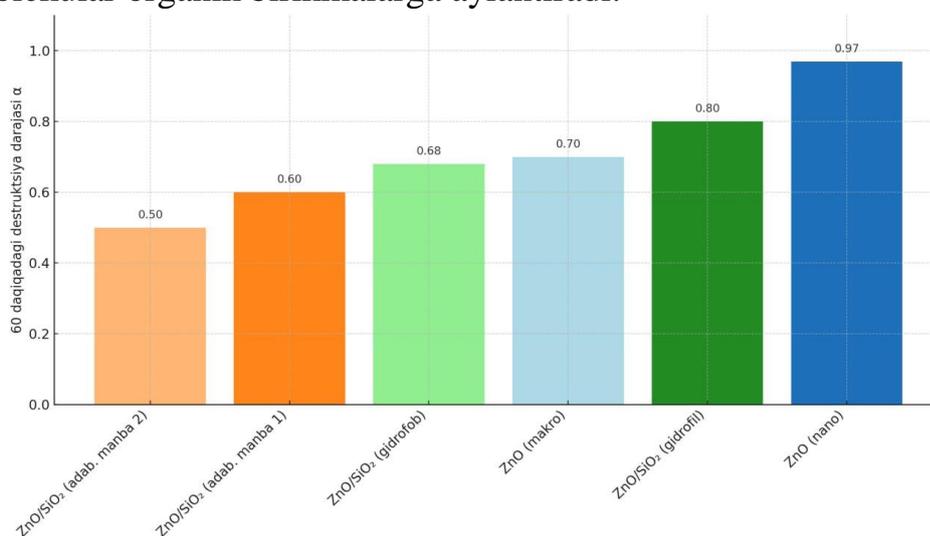


**7-rasm. Kompozitlar ishtirokida quyosh nuri ta'sirida MK ni destruksiya darajasining ( $\alpha$ ) nurlanish vaqtiga bog‘liqligi**

Turli sirt tabiatiga ega bo'lgan ZnO/SiO<sub>2</sub> kompozitlari turli darajadagi faollikni namoyish etdi. Hidrofil kompozitsiyalar MK ning tezroq va chuqurroq fotodegradatsiyasini ko'rsatdi, bu sirtni yaxshiroq namlashi, faol joylarga kirish va gidroksil radikallarini ( $\bullet\text{OH}$ ) samarali hosil qilish imkoniyati bilan izohlanadi. Quyosh nurlanishida destruksiya darajasi 60-75 daqiqada 93% ni tashkil etdi. Hidrofob kompozitlarning destruksiya darajasi ushbu sharoitlarda 77% ni tashkil qildi, ammo ular namlik miqdori past bo'lgan muhitda yuqoriroq barqarorlikni ko'rsatadi.

ZnO/SiO<sub>2</sub> kompozit tarkibiga kiruvchi ZnO fotokatalizatori yuzasida quyosh nuri ta'sirida elektronlar valent zonasidan o'tkazuvchan zonasiga qo'zg'aladi, deb taxmin qilinadi. Natijada, zaryad tashuvchilar hosil bo'ladi - elektronlar ( $e^-$ ) va kovaklar ( $h^+$ ), ular oksidlanish-qaytarilish jarayonlarining keyingi zanjirini boshlaydi. Kremniy matritsasi (SiO<sub>2</sub>) inert bo'lib, zaryad tashuvchilarning hosil bo'lishida bevosita ishtirok etmaydi, lekin ZnO ning fazoviy barqarorlashuvida asosiy rol o'ynaydi, o'ziga xos sirt maydonini oshiradi va  $e^-/h^+$  rekombinatsiya ehtimolini kamaytiradi.

Qaytaruvchi potensialga ega bo'lgan fotoelektronlar muhitda erigan molekular kislorod bilan o'zaro ta'sir qiladi va uning faol shakllarga, masalan, superoksid radikallariga ( $\bullet\text{O}_2^-$ ) qaytarilishini osonlashtiradi. Bu radikallar keyinchalik o'ta yuqori reaktivlikka ega bo'lgan gidroksil radikallariga ( $\bullet\text{OH}$ ) aylanishi mumkin. Bundan tashqari, oksidlovchi potensialga ega bo'lgan kovaklar ( $h^+$ ) suv molekulari yoki gidroksid anionlari bilan reaksiyaga kirishib, bir xil  $\bullet\text{OH}$  hosil qilishi mumkin. Gidroksil radikallari fotodestruksiya mexanizmidagi asosiy oksidlovchi vositadir. Ular metilen ko'k (MK) molekulariga hujum qilib, ularning tuzilishini buzadi va ularni zararsiz yakuniy mahsulotlarga - suv, karbonat anhidrid va past molekular organik birikmalarga aylantiradi.



### 8-rasm. Quyosh nuri ta'sirida MK ning destruksiya darajasi bo'yicha ZnO va ZnO/SiO<sub>2</sub> kompozitlarining qiyosiy fotokatalitik faolligi grafigi

Bo'yoq degradatsiyasining kinetik tahlili psevdobirinchi va psevdodikkinchi tartibli modellar, Higuchi, Beyker-Lonsdeyl va Avarami-Erofeyev yordamida amalga oshirildi. Aniqlanishicha, eksperimental ma'lumotlarga eng yaxshi moslik

psevdo-ikkinchi tartibli model ( $R^2 > 0,98$ ) va Avarami-Erofeyev modeli tomonidan ta'minlanadi, bu reaksiyaning ko'p bosqichli xususiyatini aks ettiradi. ZnO nanozarralari uchun tezlik konstantalari ( $k$ ) makro-ZnO uchun mos qiymatlardan 2,2-3,1 marta oshadi. Kompozitlar oraliq qiymatlarni namoyish etadi, gidrofil namunalar doimiy ravishda ularning gidrofob analoglaridan ustun turadi.

4-jadval

**ZnO/SiO<sub>2</sub> kompozitlari ishtirokida quyosh nuri ta'sirida MK ning fotokatalitik degradatsiyasi uchun turli modellardagi kinetik tahlil ma'lumotlari**

Model	k (gidrofil)	k (gidrofob)	Birliklar	R <sup>2</sup> (gidrofil)	R <sup>2</sup> (gidrofob)
Psevdo birinchi tartib	0.0350	0.0288	1/min	0.98	0.97
Psevdo ikkinchi tartib	0.0493	0.0366	l/(mg·min)	–	–
Xiguchi	0.1097	0.0957	min <sup>-1/2</sup>	–	–
Avarami–Erofeev	1.1772	1.2971	o'lchovsiz	–	–
Beyker–Lonsdeyla	0.0091	0.0073	1/min	–	–

Ko'rinadigan va ultrabinafsha nurlanishlar kompozitlarning ostida fotokatalitik xususiyatlari xususiyatlari ham ko'rib chiqildi. Ko'rinadigan yorug'lik ostida ZnO nanozarralari 120 daqiqada MK ning 96% gacha degradatsiyasini ta'minladi, makro-ZnO uchun bu ko'rsatkich 64-70% ni tashkil qildi. ZnO/SiO<sub>2</sub> kompozitlari modifikatsiyaga qarab 77-93% gacha samaradorlikni ko'rsatdi. UB nurlari ishtirokida, namunalar orasidagi farqlar kamayadi, ammo nanokompozitlar faol kislorod yanada samarali ishlab chiqarish tufayli afzalliklarni saqlab qoladi.

Termodinamik tahlilga ko'ra, MK ning fotodestruksiya o'z-o'zidan sodir bo'ladi ( $\Delta G^\circ$  -2,81 dan -3,90 kJ/mol gacha),  $\Delta H^\circ$  ning musbat qiymatlari esa jarayonlarning endotermik xususiyatini ko'rsatadi. Ijobiy entropiya qiymatlari ( $\Delta S^\circ$  gacha +50 J/(mol·K)) fotoliz jarayonida tizimdagi tartibsizlikning kuchayishi dalili sifatida talqin etiladi. Ushbu parametrlar tavsiya etilgan materiallar cheklangan nurlanish intensivligi sharoitida ham samarali ishlashini isbotlaydi.

Kompozitsiyaning tarkibiy qismlari o'rtasidagi sinergetik effektning mavjudligini aniqlash tadqiqotning muhim natijasidir. Kremnezem matritsasi nafaqat ZnO nanozarrachalarini stabillashtiradi va ularning agregatlanishini oldini oladi, balki fazoviy zaryadni ajratishga yordam beradi, rekombinatsiya ehtimolini kamaytiradi. Shu tufayli faol radikallarning ishlash muddati va fotokatalitik samaradorlik oshadi.

Shunday qilib, fotokatalitik tadqiqotlar ZnO/SiO<sub>2</sub> kompozitlarining yuqori samaradorligi, barqarorligi va moslashuvchanligini tasdiqladi. Ular suv va havoni turg'un organik ifloslantiruvchi moddalardan tozalash uchun istiqbolli materiallar bo'lib, tabiiy yorug'likda ham, UB va ko'rinadigan yorug'likda ham foydalanish uchun mos keladi. Materiallar yuqori darajada parchalash, takrorlanuvchanlik va

boshqariladigan sintezning optimal sharoitlarining o'rnatilganligi bilan ajralib turadi, bu ularni keng miqdorda ishlab chiqarish va amaliy qo'llash uchun yo'l ochadi.

## XULOSALAR

1. SiO<sub>2</sub> va ularning ZnO bilan kompozitsiyalarining tuzilishi, morfologiyasi va termik barqarorligi jihatidan farq qiluvchi gidrofil va gidrofob modifikatsiyalari ishlab chiqildi. TEOS asosida faol Si-OH guruhlarini (~970 sm<sup>-1</sup>) o'z ichiga olgan, yuqori massa yo'qotilishi 31,9% va zarracha o'lchami ~9,1 nm bo'lgan gidrofil-SiO<sub>2</sub> hamda MTMS asosida metil guruhlarini (1260-1470 sm<sup>-1</sup>) o'z ichiga olgan, massa yo'qotilishi 19,7% va 300°C gacha barqaror namunalar olinib, ularning zarracha o'lchami ~9,1 nm hamda kristallitlarining o'lchami ~35 nm ga teng bo'lgan ZnO nanozarrachalari bilan nanostrukturali kompozitsiyalarini olish usullari taklif qilindi.

2. ZnO/SiO<sub>2</sub> nanokompozitlarining Raman spektrlari tahlili natijasida gidrofoblangandan so'ng Si-OH guruhlarini yo'qolganligi, 1060-1120 sm<sup>-1</sup> tebranish chastotalarida Si-O-Si bog'larining hosil bo'lganligi va ularning termik faollanish energiyasi 120 kJ/mol gacha,  $\Delta G$  500 ° C da -62 kJ/mol gacha ekanligi aniqlanib, bu ularning fotokatalizda, sorbentlar, sensorlar va qoplamalar sifatida qo'llanilishdagi imkoniyatlari mavjudligi isbotlandi.

3. ZnO nanozarrachalari uchun suv bug'ining maksimal sorbsiya qobiliyati 4,3 mol/kg, TEOS asosidagi kompozitlar esa noorganik fazani o'z ichiga olgan holda gidrofillikni saqlab, 1,31 mol/kg ni yutadi. Gidrofob kompozitsiyalar benzolning yuqori sorbsiyasini ko'rsatdi - 0,186 mol/kg gacha, bu gidrofil analoglardan (0,063 mol/kg) deyarli 3 baravar yuqoriligi va bu bilan ularning organik molekulalar uchun selektivligi isbotlandi.

4. Barcha sorbentlarda metilen ko'ki adsorbsiyasi jarayonida korrelyatsiya koeffitsiyenti  $R^2 > 0,98$  bo'lgan psevdolikkinchi tartibli model yordamida ifodalanuvchi kimyoviy sorbsiya mexanizmi kuzatiladi. ZnO/gidrofil-SiO<sub>2</sub> uchun maksimal sorbsiya qobiliyati 21,88 mg/g ni tashkil etishi va Freyndlix modelidagi n qiymatlari  $n = 0,71-0,85$  ga teng ekanligidan sirt geterogenligi aniqlandi.

5. ZnO nanozarrachalari quyosh nuri ostida 60 daqiqada MK 97% gacha, gidrofil xususiyatli ZnO/SiO<sub>2</sub> kompozitlari esa 45 daqiqada 80-85% gacha destruksiyalaydi. Bu qiymatlar ushbu sharoitlarda ham gidrofob kompozitlarning (60 daqiqada 68%) va adabiyot analoglarining (50-60%) ko'rsatkichlaridan yuqori ekanligi tasdiqlandi.

6. Kinetik tahlil gidrofil kompozitlar uchun psevdolikbirinchi tartibli model bo'yicha tezlik konstantalari 0,0350 min<sup>-1</sup>, korrelyatsiya koeffitsiyenti esa  $R^2 > 0,97$

ni tashkil etdi. Avrami-Erofeyev modelining parametr qiymatlari  $n > 1,4$  ekanligi faol radikallarning ketma-ket generatsiyasini va xromofor guruhlarining chuqur parchalanishini o'z ichiga oluvchi ko'p bosqichli mexanizm ekanligi tasdiqlandi.

7. Yangi ZnO/SiO<sub>2</sub> kompoziti "Shurtan neft va gaz qazib chiqarish boshqarmasi" va "Navoiy kon-metallurgiya kombinati" AJ Markaziy ilmiy laboratoriyalarida tabiiy gazni H<sub>2</sub>S dan tozalash uchun tavsiya etildi va amaliyotga joriy qilindi.

**НАУЧНЫЙ СОВЕТ DSc.03/30.12.2019.К.01.03 ПО ПРИСУЖДЕНИЮ  
УЧЁНЫХ СТЕПЕНЕЙ ПРИ НАЦИОНАЛЬНОМ  
УНИВЕРСИТЕТЕ УЗБЕКИСТАНА**

---

**НАЦИОНАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ УЗБЕКИСТАНА**

**МУЯССАРОВА РАЙХОНА ИКРОМ КИЗИ**

**ФИЗИКО-ХИМИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА КОНТРОЛИРУЕМЫХ  
ГИДРОФИЛЬНО-ГИДРОФОБНЫХ КРЕМНЕЗЕМНЫХ  
КОМПОЗИТОВ**

**02.00.04 – Физическая химия**

**АВТОРЕФЕРАТ ДИССЕРТАЦИИ ДОКТОРА ФИЛОСОФИИ (PhD)  
ПО ХИМИЧЕСКАМ НАУКАМ**

**Ташкент – 2025**

Тема диссертации на соискание ученой степени доктора философии (PhD) по химии зарегистрирована в Высшей аттестационной комиссии при Министерстве высшего образования, науки и инноваций Республики Узбекистан под номером B2024.3.PhD/K828.

Диссертация выполнена в Национальном университете Узбекистана.

Автореферат диссертации на трех языках (узбекский, русский, английский) размещен на веб-странице по адресу [www.ik-kimyo.nuu.uz](http://www.ik-kimyo.nuu.uz) и информационно-образовательном портале «ZiyoNET» по адресу [www.ziynet.uz](http://www.ziynet.uz).

**Научный руководитель:**

**Акбаров Хамдам Икрамович**

доктор химических наук, профессор

**Официальные оппоненты:**

**Рузимурадов Олим Нарбекович**

доктор химических наук, профессор

**Йулдашов Шерзод Абдуллаевич**

доктор химических наук, старший научный сотрудник

**Ведущая организация:**

**Институт общей и неорганической химии**

Защита диссертации состоится «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2025 года в «\_\_» часов на заседании Научного совета 03/30.12.2019.К.01.03 при Национальном университете Узбекистана. (Адрес: 100174, Ташкент, ул. Университетская 4, Тел.: (+99871) 227-12-24; факс: (+99824) 246-53-21; 246-02-24. e-mail: [ilmiy\\_kengash@nuu.uz](mailto:ilmiy_kengash@nuu.uz)).

С диссертацией можно ознакомиться в Информационно-ресурсном центре Национального университета Узбекистана за №\_\_\_. Адрес: (100174, Ташкент, ВУЗ городок, Фундаментальная библиотека НУУз. Тел.: (99871) 246-67-71).

Автореферат диссертации разослан «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2025 года.  
(протокол рассылки №\_\_\_ от \_\_\_\_\_ 2025 года).

**З.А.Сманова**

Председатель Научного совета по  
присуждению ученых степеней,  
д.х.н., профессор

**Н.Х.Кутлимуратова**

Ученый секретарь научного совета по  
присуждению ученых степеней,  
д.х.н., профессор

**Н.Т.Катгаев**

Заместитель председателя научного семинара при  
научном совете по присуждению учёных степеней,  
д.х.н., профессор

## **ВВЕДЕНИЕ (аннотация диссертации доктора философии (PhD))**

**Актуальность и необходимость темы диссертации.** На сегодняшний день в мире органо-неорганические полимерные композиты рассматриваются как многофункциональные инновационные материалы. Такие материалы с улучшенными свойствами находят широкое применение в виде катализаторов, мембран, защитных покрытий, сенсоров и сорбентов. Особый интерес вызывают пористые полимер-кремнезёмные композиты, сочетающие высокую эффективность, низкую стоимость и экологическую безопасность.

В мире ведутся исследования, в первую очередь, по синтезу кремнезёмных композитов золь-гель методом с целью создания гибридных систем с контролируемой гидрофильно-гидрофобной природой, морфологией и физико-химическими характеристиками. Особое внимание уделяется разработке кремнезёмных матриц, способных выступать в роли носителей фотокаталитически активных фаз, таких как ZnO, а также встраиванию в них органических компонентов.

В Узбекистане достигнут ряд существенных результатов в разработке новых типов кремнезёмных композитов с заданной поверхностной природой и регулируемой структурой на основе золь-гель технологии. Выполняются научно-исследовательские и опытно-конструкторские работы по созданию кремнезёмных гибридных материалов, в том числе с внедрением функциональных наночастиц (например, ZnO), для применения в задачах высокоэффективной сорбции, фотокатализа, хроматографии, а также для разработки газочувствительных сенсоров и сенсорных покрытий. Данные исследования полностью соответствуют задачам Стратегии развития Нового Узбекистана на 2022–2026 годы, направленным на повышение качества продукции и «производство готовой продукции с высокой добавленной стоимостью на основе глубокой переработки местного сырья<sup>1</sup>». С этой точки зрения разработка амфифильных кремнезёмных композитов с управляемой и заданной текстурой является одной из актуальных проблем современной физической химии.

Указ Президента Республики Узбекистан от 28 января 2022 года № УП-60 «О стратегии развития нового Узбекистана на 2022-2026 годы», ПП-4265 от 3 апреля 2019 года «Меры по дальнейшему реформированию химической промышленности и повысить ее инвестиционную привлекательность» и Решение № ПП-4805 от 12 августа 2020 года «О мерах по повышению качества непрерывного образования и эффективности науки в областях химии и биологии» и другие нормативные правовые документы, связанные с данной деятельностью. Исследования служат в определенной степени.

**Соответствие исследований приоритетам развития науки и технологий республики.** Данное исследование выполнено в соответствии с приоритетным направлением развития науки и технологий Республики

---

<sup>1</sup> Указ Президента Республики Узбекистан от 6 июля 2022 года № ПФ-60 «О Стратегии развития Нового Узбекистана на 2022–2026 годы»

Узбекистан VII. «Химия, химическая технология и нанотехнология».

**Степень изученности проблемы.** В ряде ведущих научных центров за рубежом ведутся фундаментальные и прикладные исследования по созданию пористых гибридных композиций на основе кремнезема. В работах таких учёных, как Ахмед Салам, Соня Секейра, Вандана Сингх, Арно Демилекамп, Хуа Цзоу, Клемент Санчес, Си Джей Бринкер, Г.В. Шерер, Даниэль Элич-Али-Коми, И.В. Гренбенчиков, В.Я. Шевченко, О.А. Шилова, А.Д. Помогайло, И.П. Суздальев, П.Д. Шабанова, Ю.А. Щипунов, И.Б. Бакеева, А.И. Суворова, этому направлению отведено важное место. Их исследования охватывают широкий круг задач — от синтеза и модификации кремнезёмных матриц до изучения их сорбционных, каталитических и сенсорных свойств.

Научные работы таких исследователей как Ахмед Салама, А.И. Суворова, П.Д. Шабанова, Ю.А. Щипунов посвящены синтезу гибридных композитов золь-гель методом. Однако анализ литературных данных показывает, что во многих из этих исследований недостаточно изучена природа активных центров, ответственных за сорбцию паров воды и бензола. Этот аспект остаётся актуальной научной задачей и требует углублённого экспериментального и теоретического подхода в рамках физико-химии поверхностных явлений.

В Узбекистане научные исследования по получению полимеров и систем на основе кремнезема и исследованию их свойств активно проводились такими учёными, как Р.С. Тиллаев, У.Н. Мусаев, Б.Ж. Кабулов, О.Н. Рузимурадов, Э.К. Абдурахмонов, Х.И. Акбаров, А.Ю. Яркулов, Ж.Қ. Маматов. В результате этих работ были усовершенствованы методы синтеза гибридных органо-неорганических композитов, а также достигнуты значимые прикладные результаты, включая их применение в хроматографии, сенсорике, сорбции и каталитических системах. Однако при всей результативности указанных работ остаются недостаточно изученными механизмы сорбции растворителей, а также полные термодинамические и физико-химические параметры, раскрывающие природу активных центров и особенности строения таких кремнезёмных гибридных систем. Решение этой задачи представляет интерес как в научном, так и прикладном аспектах физико-химии дисперсных систем и материалов нового поколения.

**Связь темы диссертации с научно-исследовательской работой высшего учебного заведения, в котором выполнена диссертация.** Диссертационные исследования выполнены в рамках фундаментального проекта Национального университета Узбекистана № Ф-7-54 на тему «Исследование физико-химических закономерностей и механизмов формирования наноструктурных, пористых и полимер-кремнезёмных гибридных нанокompозитных материалов» (2017-2020).

**Целью исследования** Заключается в изучении физико-химических свойств кремнийорганических композиций с контролируемой гидрофильно-гидрофобной природой.

**Задачи исследования:**

синтез гидрофильного и гидрофобного  $\text{SiO}_2$  на основе TEOS и MTMS;  
получение нанодисперсного  $\text{ZnO}$  из местного вторичного сырья;  
разработка методов получения композитов  $\text{ZnO/SiO}_2$  с заданными свойствами;

характеристика полученных материалов методами Раман, РФА, СЭМ, ТЭМ, ЭДС, ДРС, ТГ-ДСК, БЭТ, UV-Vis;

определение сорбционных характеристик в отношении паров воды, бензола, азота и раствора метиленового синего;

изучение фотокаталитической деградции метиленового синего под действием УФ, видимого и солнечного излучения.

**Объектами исследования** являются аморфный диоксид кремния ( $\text{SiO}_2$ ), полученный на основе тетраэтоксисилана (TEOS) и метилтриметоксисилана (MTMS); оксид цинка ( $\text{ZnO}$ ), синтезированный из местного вторичного сырья; а также композиты  $\text{ZnO/SiO}_2$  с варьируемыми гидрофильными и гидрофобными свойствами.

**Предметом исследования** являются физико-химические закономерности формирования структуры, сорбционные и фотокаталитические свойства диоксида кремния и его композитов с оксидом цинка, а также механизмы взаимодействия этих материалов с водяным паром, органическими соединениями и метиленовым синим под действием различных видов излучения.

**Методы исследования.** Для комплексного изучения структуры, морфологии, пористой текстуры, термической стабильности, сорбционных и фотокаталитических свойств исследуемых образцов применялись современные методы физико-химического анализа: ИК- и Раман-спектроскопия, рентгенофазовый анализ (РФА), сканирующая и трансмиссионная электронная микроскопия (СЭМ и ТЭМ), динамическое светорассеяние (ДРС), низкотемпературная адсорбция азота (БЭТ), термогравиметрия (ТГ/ДСК/ДТА) и УФ-видимая спектрофотометрия (UV-Vis).

**Научная новизна исследования** заключается в следующем:

впервые разработаны воспроизводимые методы получения композитов  $\text{ZnO/SiO}_2$  с заданной гидрофильностью или гидрофобностью поверхности, обеспечивающие стабильные физико-химические свойства в широком температурном диапазоне (от 25 до 800 °С);

впервые показано, что варьирование природы прекурсоров (TEOS/MTMS) позволяет направленно управлять морфологией и размером пор (от 1,8 до 7,3 нм) в синтезируемых композитах, что непосредственно влияет на их сорбционные (до 4,3 моль/кг по водяному пару) и фотокаталитические свойства (до 96% деградции МС под солнечным светом);

установлена зависимость фотокаталитической активности от степени гидрофобизации поверхности кремнезёмной матрицы, подтверждённая детальным кинетико-механистическим анализом процессов деструкции

метиленового синего под действием различных типов излучения (УФ, видимое, солнечное);

впервые проведено сопоставление кинетических моделей (псевдопервого и псевдвторого порядка, Хигучи, Аварами–Эрофеева, Бейкера–Лонсдейла) применительно к системам с разной дисперсностью ZnO и степенью поверхностной модификации SiO<sub>2</sub>, что позволило количественно описать механизмы сорбции и фотодеструкции с коэффициентами корреляции R<sup>2</sup> до 0,9966;

получены и интерпретированы термодинамические параметры ( $\Delta H^\circ$  до +12,15 кДж/моль;  $\Delta G^\circ$  от -3,77 до -1,48 кДж/моль), что впервые позволило обосновать энергетическую эффективность взаимодействия красителя с активными центрами композитов различной природы.

**Практические результаты исследования заключаются в следующем:**

разработанные материалы обладают высокой прикладной ценностью и демонстрируют комплекс полезных свойств, сочетающих сорбционную ёмкость, термическую устойчивость и фотокаталитическую активность:

гидрофильные композиты ZnO/SiO<sub>2</sub> обеспечивают до 96% разложение метиленового синего за 60 мин под солнечным светом;

гидрофобные композиты эффективны при сорбции бензольных паров (до 1,90 моль/кг), что подтверждает их применимость в органоселективной фильтрации;

использование местного вторичного сырья (отходов GIAP-10) позволяет снизить себестоимость композита на 30–40% по сравнению с коммерческими аналогами.

**Достоверность** результатов обеспечивается воспроизводимостью полученных данных при повторных измерениях, использованием комплекса взаимодополняющих физико-химических методов анализа, а также сопоставлением экспериментальных данных с расчётными моделями. Корректность расчётов подтверждена высокой степенью аппроксимации ( $R^2 \geq 0,95$ ) для большинства использованных кинетических и термодинамических моделей.

**Научная и практическая значимость результатов исследования.**

Научная значимость результатов исследований объясняется системной проработкой влияния прекурсоров, морфологии и дисперсности на комплексные свойства кремнезёмных композитов с оксидом цинка. Впервые установлены количественные зависимости между степенью гидрофобизации, пористой структурой и кинетическими параметрами сорбции и фотокатализа, подтверждённые расчётами термодинамических характеристик ( $\Delta H^\circ$ ,  $\Delta G^\circ$ ) и высокими коэффициентами аппроксимации (до  $R^2 = 0,9966$ ). Полученные данные восполняют пробел в понимании влияния физико-химических параметров поверхности на эффективность композитов в задачах сорбции и деструкции органических загрязнителей.

Практическая значимость результатов исследований заключается в разработке композитов ZnO/SiO<sub>2</sub>, обладающих сочетанием высокой

сорбционной ёмкости, термостойкости и фотокаталитической активности, что делает их перспективными материалами для экологического и технологического применения. Гидрофильные модификации демонстрируют эффективность фотодеструкции до 96% метиленового синего за 60 минут под действием солнечного света, а гидрофобные формы обеспечивают сорбцию бензола до 1,90 моль/кг. Значения удельной поверхности (до 279 м<sup>2</sup>/г) и объёма пор (до 0,29 см<sup>3</sup>/г) обеспечивают высокую активность даже при малой массе материала. Применение отходов ГИАП-10 позволяет снизить себестоимость синтеза на 30–40%.

Полученные материалы применимы в системах очистки сточных вод от органических загрязнителей, сорбционно-фильтрационных блоках, сенсорных устройствах, а также в качестве компонентов защитных и фотокаталитически активных покрытий.

**Внедрение результатов исследований.** На основе синтеза и комплексного анализа структуры, фазового состава, морфологии и текстурных характеристик синтезированных кремнезёмных материалов и их композитов с оксидом цинка:

композит ZnO/SiO<sub>2</sub> включен в «Перечень перспективных разработок для внедрения в 2026-2027 годах» в Центральной химической лаборатории Шуртанского НГДУ (Выпуск Шуртанского НГДУ от 02.10.2025 г. №ОП 02, ЭД-3448). В результате удалось очистить природный газ от H<sub>2</sub>S до концентрации <1 ppm, что соответствует самым строгим промышленным и экологическим стандартам.

композиция ZnO/SiO<sub>2</sub> включена в «Перечень перспективных разработок для внедрения в 2026-2027 годах» Центральной научной лаборатории АО «Навоийский горно-металлургический комбинат» (Справка Центральной научной лаборатории АО «Навоийский горно-металлургический комбинат» от 08.10.2025 г. № 02-07/027/10451). В результате природный газ может быть очищен от сероводорода до 99,0%, что полностью соответствует международным стандартам транспортировки природного газа.

**Апробация результатов исследования.** Результаты исследования были представлены и обсуждены на 10, в том числе 4 международных и 6 республиканских научно-практических конференциях.

**Публикация результатов исследований.** По материалам диссертационной работы опубликовано всего 16 научных работ, из них 6 статьи в научных изданиях, рекомендованных к публикации основных научных результатов докторских диссертаций ВАК РУз, 6 из них опубликованы в национальных и 2 зарубежном журналах.

**Структура и объем диссертации.** Диссертация состоит из введения, пяти глав, выводов, списка использованной литературы и приложения. Объем диссертации составляет 123 страницу<sup>1</sup>.

---

<sup>1</sup> Автор выражает особую благодарность д.х.н., проф. Каттаеву Н.Т. за всестороннюю поддержку при выполнении данной диссертационной работы.

## ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

**Во вводной** части обосновывается актуальность и необходимость проводимого исследования, описываются цель и задачи, объекты и предметы исследования, показана совместимость с приоритетными направлениями развития науки и техники республики, Описаны научная новизна и практические результаты исследования, раскрыта научная и практическая значимость полученных результатов, описано внедрение результатов исследования в практику, структура опубликованных работ и диссертаций.

**В первой** главе диссертационной работы, озаглавленной «**Гидрофильно-гидрофобный природный кремнезём и его композиты**», приведён подробный обзор литературы, отражающий современное состояние исследований, посвящённых получению, структуре и применению диоксида кремния, оксида цинка, а также композиционных материалов на их основе. Рассмотрены золь-гель подходы к синтезу  $\text{SiO}_2$  с различной поверхностной природой (TEOS, MTMS), особенности нанодисперсного  $\text{ZnO}$  и его получение из вторичного сырья. Отдельное внимание уделено композитам  $\text{ZnO}/\text{SiO}_2$ , их структурным и функциональным характеристикам, а также практическим задачам – очистке воды, фотодеструкции красителей и газовой сорбции. Проанализированы кинетические и термодинамические модели сорбции и фотокатализа. Литературный обзор подтвердил актуальность темы и обосновал выбор исследуемых систем и методических подходов.

**Во второй** главе диссертационной работы, озаглавленной «**Методы получения и исследования образцов кремнезёма на основе тетраэтоксисилана и метилтриметоксисилана, оксида цинка и соответствующих композитов**», представлены оптимизированные методы получения гидрофильных–гидрофобных кремнезёмных материалов с использованием прекурсоров TEOS и MTMS, нанодисперсного оксида цинка, а также композитов  $\text{ZnO}/\text{SiO}_2$  с регулируемой поверхностной природой. Гидрофильный  $\text{SiO}_2$  получали в щелочной среде при контроле  $\text{pH} \approx 10$ , температуре 35–40 °С и последующей сушке и кальцинации, что обеспечивало сохранение силанольных групп. Введение MTMS позволило формировать гидрофобную структуру с остаточными  $-\text{CH}_3$ -группами, снижая сорбцию воды и повышая термическую стабильность.

Оксид цинка синтезировали из местных катализаторных отходов методами осаждения и гидротермальной обработки, обеспечивающих получение чистых наночастиц  $\text{ZnO}$  с размером 30–40 нм. Комбинированный синтез композитов  $\text{ZnO}/\text{SiO}_2$  осуществлялся по золь-гель технологии с введением  $\text{Zn}^{2+}$  либо готового  $\text{ZnO}$  на стадии гелеобразования. Контроль параметров синтеза –  $\text{pH}$ , соотношения компонентов, температура и способ термообработки – позволял получать композиты с равномерным распределением нанофазы в аморфной или мезоструктурированной матрице кремнезёма.

В третьей главе диссертационной работы, озаглавленной «Синтез и структурные особенности кремнезёма гидрофильно-гидрофобной природы и его цинк-оксидных композитов», представлены результаты комплексного анализа структуры, фазового состава, морфологии и текстурных характеристик кремнезёмных материалов и их композитов, синтезированных в присутствии оксида цинка.

Сравнительный анализ Раман-спектров показал наличие характерных полос Si–OH ( $\sim 970 \text{ см}^{-1}$ ) у гидрофильных образцов и полос деформационных колебаний CH<sub>3</sub>-групп ( $\sim 1260\text{--}1280$  и  $1400\text{--}1470 \text{ см}^{-1}$ ) у гидрофобных форм, что свидетельствует об успешной химической модификации поверхности. В спектрах композитов ZnO/SiO<sub>2</sub> после модификации исчезает интенсивная полоса  $\sim 960 \text{ см}^{-1}$ , указывающая на удаление свободных Si–OH-групп. Дополнительно в спектрах выявлены моды, соответствующие колебаниям Zn–O и структурным элементам кремнезёма, включая D<sub>1</sub>-кольца.

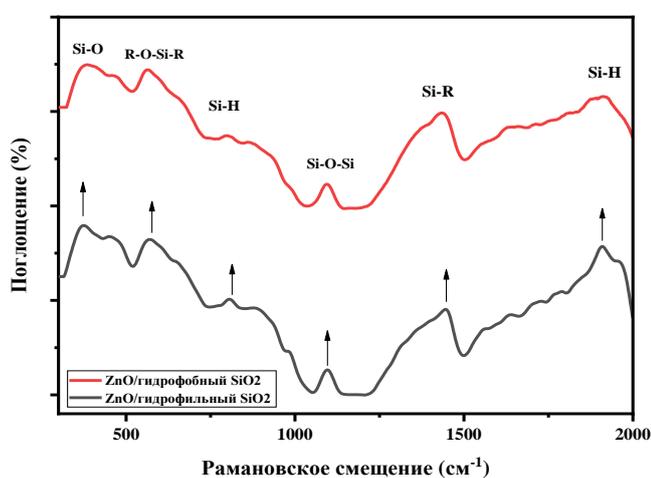
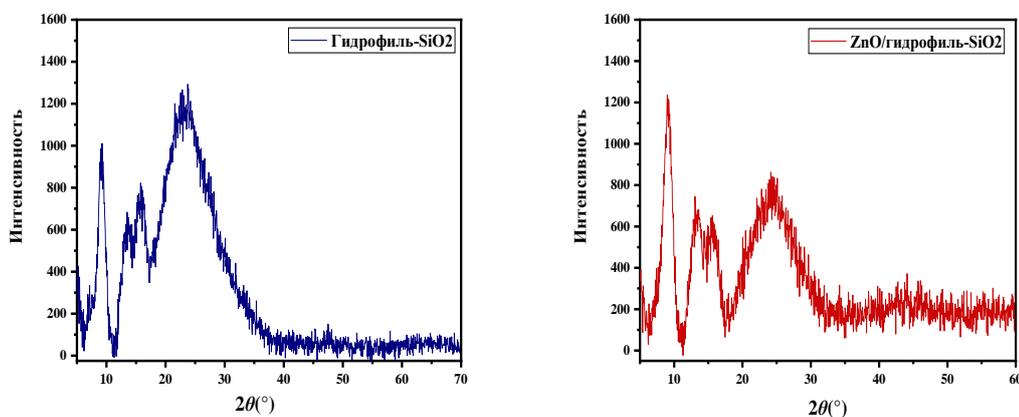
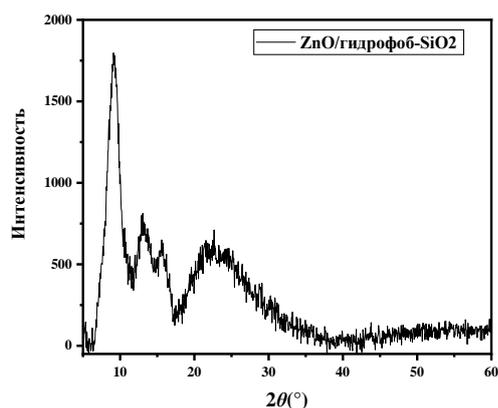


Рис. 1. Раман-спектры гидрофильного (чёрная линия) и гидрофобного (красная линия) композитов ZnO/SiO<sub>2</sub>

Рентгенофазовый анализ подтвердил аморфную природу SiO<sub>2</sub> (широкий дифракционный максимум в области  $2\theta = 22\text{--}25^\circ$ ) и наличие характерных рефлексов ZnO в композиционных образцах, соответствующих плоскостям (100), (002), (101) и др. вюрцитной структуры.

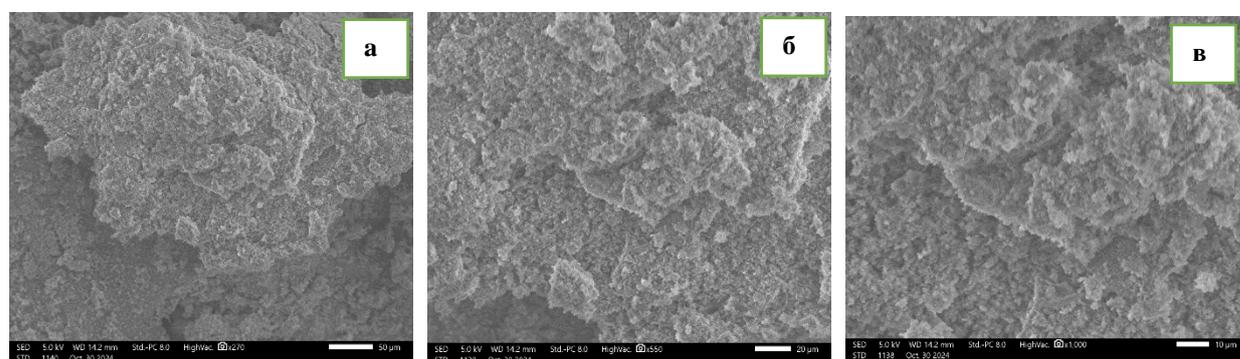




**Рис. 2. Рентгеновские дифрактограммы образцов  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{ZnO}/\text{SiO}_2$  (гидрофильный) и  $\text{ZnO}/\text{SiO}_2$  (гидрофобный) в диапазоне  $2\theta = 10\text{--}70^\circ$**

Размеры кристаллитов  $\text{ZnO}$ , рассчитанные по уравнению Шеррера, составили 30–35 нм. В композиционных материалах наличие слабых по интенсивности и частично уширенных дифракционных рефлексов в диапазоне  $2\theta = 20\text{--}35^\circ$  свидетельствует о присутствии нанодисперсных частиц  $\text{ZnO}$ . Размытый характер указанных рефлексов и отсутствие чётких кристаллографических максимумов указывают на низкую степень кристалличности оксида цинка, его крайне малые (наноразмерные) частицы, а также на возможность их равномерного распределения и частичного экранирования матрицей  $\text{SiO}_2$ .

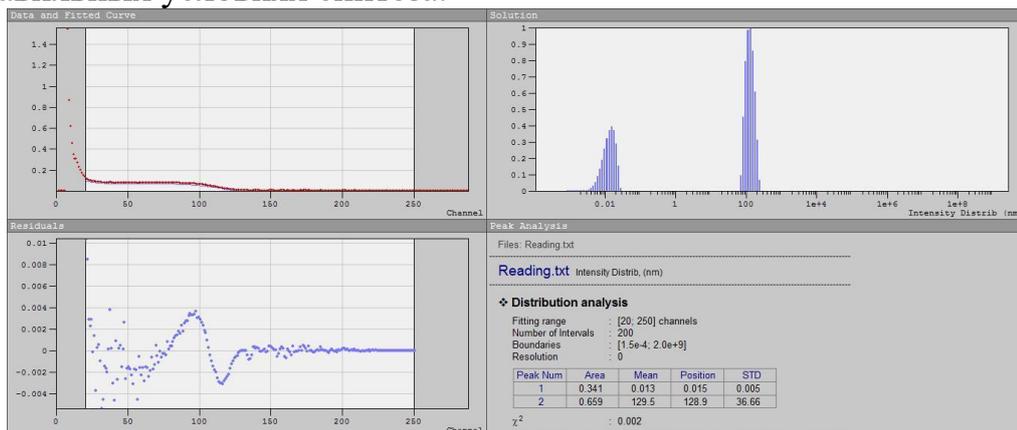
Морфология изучалась при увеличениях  $\times 270 - \times 2700$ . Гидрофильный  $\text{SiO}_2$  характеризуется сетчатой и волокнистой архитектурой с образованием агрегатов до 2 мкм, включающих субмикронные частицы размером 100–500 нм. Гидрофобный  $\text{SiO}_2$  имеет рыхлую, порошкообразную морфологию с преобладанием частиц округлой формы и менее плотной упаковкой. Композиты  $\text{ZnO}/\text{SiO}_2$  демонстрируют иерархическую структуру: от макроагрегатов (50–150 мкм) до наноразмерных включений  $\text{ZnO}$  (50–150 нм), равномерно распределённых в кремнезёмной матрице.



**Рис. 3. СЭМ-изображение композита  $\text{ZnO}/\text{SiO}_2$  (TEOS) при увеличениях  $\times 240$  (а),  $\times 550$  (б) и  $\times 1000$  (в)**

DLS-анализ подтвердил двухмодальный характер распределения частиц: основной пик соответствовал индивидуальным наночастицам (7–10 нм), вторичный – агрегатам с размером 100–270 нм, что согласуется с результатами

электронной микроскопии и указывает на устойчивость дисперсной системы при правильных условиях синтеза.



**Рис. 4. Результаты измерения распределения размеров частиц композита ZnO/гидрофильный SiO<sub>2</sub> методом DLS**

Текстурные характеристики, полученные методом БЭТ, показали, что гидрофильные материалы обладают большей удельной поверхностью (до 98,5 м<sup>2</sup>/г) и меньшими радиусами пор (1,8–2,4 нм), обеспечивая эффективную сорбцию полярных веществ. Гидрофобные композиты имеют более широкий поровый размер (до 7,3 нм), но меньшую поверхность (40–60 м<sup>2</sup>/г), что благоприятствует сорбции органических соединений, таких как бензол. Объём пор в композитах достигал 0,29 см<sup>3</sup>/г.

Энергодисперсионный анализ подтвердил равномерное распределение Zn и O в композитах, что указывает на однородность внедрения ZnO в матрицу. Доля Zn составляла до 73% по массе (в зависимости от исходного соотношения компонентов), что согласуется с расчётными данными и спектрами.

**Таблица 1. Кинетические и термодинамические параметры термического разложения композитов гидрофильного и гидрофобного SiO<sub>2</sub> с ZnO**

Тип композита	Стадия	T, °C	Потеря массы (%)	E <sub>a</sub> (кДж/моль)	ΔH (кДж/моль)	ΔS (Дж/моль·К)	ΔG (кДж/моль, 500 °C)
Гидрофильный	I (дегидратация)	18–430	16.78	60–80	55–75	65–85	18–22
Гидрофильный	II (деструкция)	430–802	7.78	100–130	90–110	45–65	40–46
Гидрофобный	I (дегидратация)	15–378	5.14	70–90	65–80	35–55	22–26
Гидрофобный	II (деструкция)	378–802	9.09	90–120	80–100	40–60	36–42

По данным TG/DSC/DTA установлено, что гидрофильные формы SiO<sub>2</sub> характеризуются тремя основными стадиями термодеструкции: удаление физически адсорбированной влаги до 150 °C, дегидроксилирование в диапазоне 150–500 °C (с потерей массы до 10,42%), а также термическая стабилизация и частичное разрушение силоксановой сетки при температурах выше 600 °C (дополнительная потеря до 7,57%). Гидрофобные образцы демонстрируют более высокую термостойкость: первая стадия

характеризуется меньшей потерей массы (9,54 против 13,87% у гидрофильных аналогов), а вторая стадия (293–538°C) составляет лишь 4,53%, что указывает на снижение гидрофильности и сорбции влаги. Композиты ZnO/SiO<sub>2</sub> сохраняют аналогичную многослойную модель термодеструкции, однако проявляют лучшую термическую стабильность с совокупной потерей массы, как правило, не превышающей 24%.

Энергия активации ( $E_a$ ) процессов дегидратации и дегидроксилирования по моделям Киссинджера и Коатса–Редферна составила 55–130 кДж/моль. Для гидрофильного SiO<sub>2</sub> значения  $\Delta H$  достигали 140 кДж/моль на заключительной стадии разложения, тогда как  $\Delta G$  при 500 °C составляла до 62 кДж/моль, подтверждая энергозатратный характер процессов. В то же время у гидрофобных образцов  $\Delta G$  находилась в пределах 32–54 кДж/моль, что свидетельствует о более термодинамически устойчивой структуре. Значения энтропии  $\Delta S$  варьировались от 40 до 85 Дж/(моль·К) в зависимости от стадии и типа модификации, что отражает различия в упорядоченности структуры и механизмах разрушения. Эти данные являются важными для выбора оптимальных условий эксплуатации и термической регенерации материалов.

Таким образом, третья глава подтверждает возможность управляемого синтеза материалов с заданной морфологией, фазовым составом и текстурными свойствами. Полученные данные доказывают, что направленная модификация структуры позволяет контролировать функциональные свойства кремнезёмных композитов, включая их способность к сорбции и фотокатализу.

**В четвёртой главе** диссертационной работы, озаглавленной «**Адсорбционные свойства кремнезема гидрофильного и гидрофобного характера и его цинк-оксидных композитов**», представлены результаты всестороннего анализа сорбционных характеристик синтезированных материалов. Проведены изотермические исследования сорбции водяных и бензольных паров, азота и водных растворов метиленового синего с использованием метода весовой адсорбции, низкотемпературной газовой адсорбции и УФ-спектрофотометрии. В качестве сорбатов были выбраны как полярные молекулы (H<sub>2</sub>O, метиленовый синий), так и неполярные (бензол), что позволило охарактеризовать взаимодействие исследуемых поверхностей с различными классами соединений.

Изотермы парофазной адсорбции воды показали, что наночастицы ZnO обладают наибольшей гигроскопичностью (до 4,3 моль/кг), что обусловлено высокой удельной поверхностью (до 279,6 м<sup>2</sup>/г) и наличием дефектных гидрофильных центров. Гидрофильный кремнезём сорбирует до 0,875 моль/кг, тогда как модификация поверхности метилсодержащими прекурсорами (MTMS) снижает водопоглощение до 0,6 моль/кг. Композиты ZnO/SiO<sub>2</sub> демонстрируют промежуточные значения (1,3–0,9 моль/кг), в зависимости от типа поверхности. Вычисленные значения удельной поверхности ( $S_{уд}$ ), объёма микропор ( $W_0$ ), общего объёма пор ( $V_s$ ) и среднего радиуса пор ( $R_{cp}$ ) варьируют в пределах: 38–98 м<sup>2</sup>/г, 0,026–0,073 см<sup>3</sup>/г, и 1,8–

3,3 нм соответственно. Анализ типа изотерм по классификации Брунауэра–Деминга–Теллера показал соответствие типам II и IV с выраженным гистерезисом, характерным для мезопористых структур.

**Таблица 2. Сорбционно-капиллярные свойства кремнезема и его ZnO-компози́тов по отношению к водяному пару**

№	Образец	A, моль/кг	S <sub>уд</sub> , м <sup>2</sup> /г	W <sub>о</sub> , см <sup>3</sup> /г	V <sub>s</sub> , см <sup>3</sup>	W <sub>ме</sub> , см <sup>3</sup> /г	R <sub>ср</sub> , нм
1	Наночастицы ZnO	4.300	279.6	0.2027	0.2862	0.080	2.05
2	Гидрофильный-SiO <sub>2</sub>	0.875	56.9	0.0516	0.0942	0.040	3.31
3	гидрофобный-SiO <sub>2</sub>	0.599	38.9	0.0261	0.0351	0.010	1.80
4	ZnO/гидрофильный-SiO <sub>2</sub>	1.311	85.2	0.0678	0.1021	0.030	2.40
5	ZnO/гидрофобный-SiO <sub>2</sub>	0.909	59.1	0.0449	0.0655	0.020	2.22

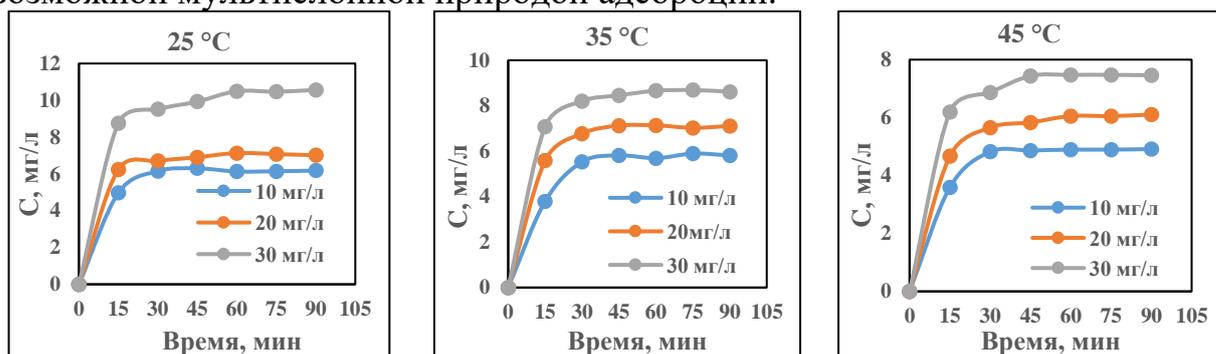
Сорбция бензола наиболее выражена на гидрофобных образцах: до 1,90 моль/кг у SiO<sub>2</sub> (MTMS), что подтверждает их органофильную природу. Композиты демонстрируют устойчивую сорбционную активность (до 0,4 моль/кг), обеспеченную сочетанием макропористой структуры и слабой полярности поверхности. Для ZnO сорбция бензола минимальна (~0,09 моль/кг), что объясняется его высокой полярностью. Расчётные порометрические параметры по бензольной адсорбции также подтверждают наличие широких каналов (R<sub>ср</sub> до 7,3 нм) и значительный объём доступных пор у гидрофобных образцов. Такие материалы перспективны в задачах фильтрации органических паров и в составе мембран.

Изотермы низкотемпературной адсорбции азота позволили оценить реальную площадь поверхности и текстурные параметры исследуемых материалов. Максимальные значения сорбции молекул N<sub>2</sub> и высокоразвитая пористая структура (объём пор до 0,29 см<sup>3</sup>/г) обнаружены у гидрофильных и смешанных композитов. Характер гистерезисных петель соответствует мезопористым системам с капиллярной конденсацией. Площадь поверхности в этих образцах может превышать 20 м<sup>2</sup>/г, что обеспечивает значительный сорбционный потенциал в отношении как газов, так и паров.

**Таблица 3. Сорбционно-капиллярные свойства кремнезема и его ZnO-компози́тов по отношению к жидкому азоту**

Образец	Удельная поверхность (м <sup>2</sup> /г)	Средний радиус пор (нм)
Наночастицы ZnO	27,37	0,408
Гидрофильный- SiO <sub>2</sub>	9,91	3,82
гидрофобный-SiO <sub>2</sub>	11,90	3,51
ZnO/гидрофильный-SiO <sub>2</sub>	26,14	1,68
ZnO/гидрофобный-SiO <sub>2</sub>	37,4	4,05

На основе сорбции метиленового синего проведён расширенный кинетико-термодинамический анализ взаимодействия с водными растворами. При температурах 25–45 °С сорбционная ёмкость гидрофильных композитов достигает 14,1 мг/г, а у гидрофобных – до 16,3 мг/г. Временные зависимости  $C_t/C_0$  хорошо аппроксимируются моделью псевдо-второго порядка ( $R^2 > 0,98$ ), что указывает на химически контролируруемую природу процесса. Изотермы Фрейндлиха ( $n = 0,24–0,89$ ) отражают кооперативный механизм сорбции и гетерогенность поверхности. В ряде случаев наблюдается отклонение от модели Лангмюра, что связано с неоднородностью энергетических центров и возможной мультислойной природой адсорбции.



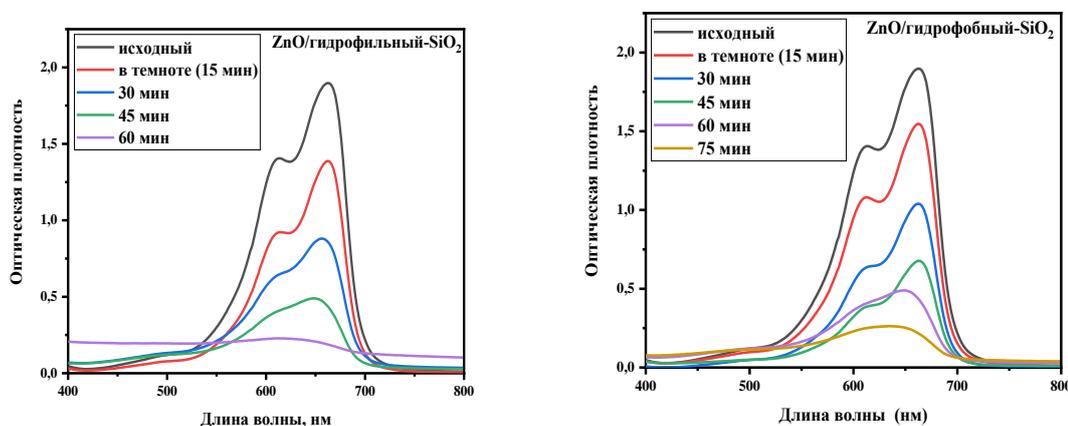
**Рис.5. Кинетические изотермы адсорбции МС на композите ZnO/гидрофильный-SiO<sub>2</sub>**

Термодинамический анализ по уравнению Вант-Гоффа показал, что процессы сорбции МС являются самопроизвольными ( $\Delta G^\circ$  от  $-1,48$  до  $-3,77$  кДж/моль) с выраженной эндотермией ( $\Delta H^\circ$  от  $+5,6$  до  $+12,2$  кДж/моль). При этом наблюдается положительное изменение энтропии ( $\Delta S^\circ$  до  $+50$  Дж/(моль·К) особенно в системах с гидрофобной модификацией, что указывает на повышение степени свободы молекул при взаимодействии с поверхностью. Такие параметры подтверждают высокую эффективность сорбентов при очистке водных растворов и стабильность сорбционных комплексов при повышенных температурах. Дополнительно построенные температурные зависимости позволили оценить изменения сорбционной энергии в динамике, что подтвердило термодинамическую избирательность композитов к целевым веществам.

Полученные результаты указывают на то, что модифицированные композиты ZnO/SiO<sub>2</sub> являются универсальными и термодинамически выгодными материалами для извлечения полярных и неполярных органических веществ из газовой и жидкой фаз. Они могут быть использованы в технологии очистки сточных вод, при создании сенсорных покрытий, а также в составе сорбционно-каталитических систем для экологического мониторинга.

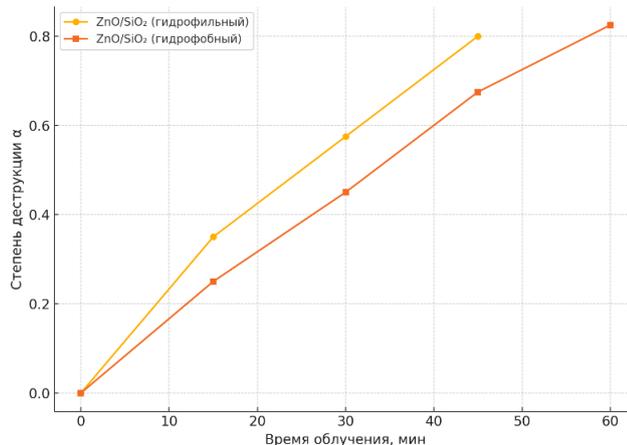
**В пятой главе диссертационной работы, озаглавленной «Фотокаталитические свойства кремнезема гидрофильной и гидрофобной природы и его композитов с оксидом цинка», представлены результаты всестороннего изучения фотокаталитических свойств синтезированных материалов под воздействием УФ-, видимого и солнечного**

излучения. В качестве модельного загрязнителя использовался МС, а эффективность процессов фотодеструкции оценивалась по изменению оптической плотности раствора при длине волны  $\lambda = 662$  нм с использованием УФ-видимой спектрофотометрии. Проведён анализ кинетики деградации МС, влияния природы поверхности, степени гидрофобизации, а также типа излучения на активность различных фотокаталитических систем.



**Рис.6. Изменение интенсивности поглощения раствора МС в зависимости от продолжительности облучения солнечным светом в присутствии композитов ZnO/гидрофильный-SiO<sub>2</sub> и ZnO/гидрофобный-SiO<sub>2</sub>**

Сравнительный анализ показал, что нанодисперсный ZnO демонстрирует наибольшую фотокаталитическую активность: степень деградации МС достигает 96% уже за 60 мин под действием солнечного света. Это обусловлено его высокой удельной поверхностью, дисперсностью и эффективным переносом носителей заряда. В то же время макроразмерный ZnO демонстрирует более низкую активность ( $\approx 70\%$  за то же время), что связано с большей рекомбинацией  $e^-/h^+$  пар и ограниченным количеством активных центров.



**Рис.7. Зависимость степени деструкции МС ( $\alpha$ ) от продолжительности облучения солнечным светом в присутствии композитов**

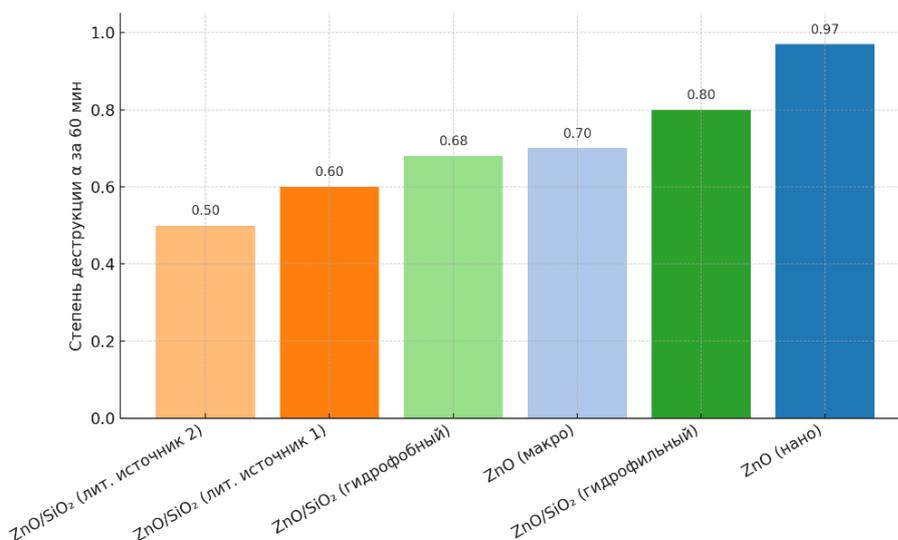
Композиты ZnO/SiO<sub>2</sub> с различной поверхностной природой проявляют различную степень активности. Гидрофильные композиты демонстрируют

более быструю и глубокую фотодеструкцию МС, что объясняется лучшим смачиванием поверхности, доступностью активных центров и возможностью эффективного образования гидроксильных радикалов ( $\bullet\text{OH}$ ). При солнечном облучении степень деградации достигает 93% за 60–75 минут. В случае гидрофобных композитов степень разрушения составляет 77% при аналогичных условиях, однако они демонстрируют более устойчивое поведение в средах с низким содержанием влаги.

Предполагается, что под действием солнечного света на поверхности фотокатализатора  $\text{ZnO}$ , входящего в состав композита  $\text{ZnO}/\text{SiO}_2$ , происходит возбуждение электронов из валентной зоны в зону проводимости. В результате формируются носители заряда – электроны ( $e^-$ ) и дырки ( $h^+$ ), которые инициируют последующую цепочку окислительно-восстановительных процессов. Кремниевая матрица ( $\text{SiO}_2$ ), будучи инертной, не участвует напрямую в генерации носителей заряда, однако играет ключевую роль в пространственной стабилизации  $\text{ZnO}$ , повышении удельной поверхности и снижении вероятности рекомбинации  $e^-/h^+$ .

Фотоэлектроны, обладая восстановительным потенциалом, взаимодействуют с растворённым в среде молекулярным кислородом, способствуя его восстановлению до активных форм, таких как супероксид-радикалы ( $\bullet\text{O}_2^-$ ), которые могут далее трансформироваться в гидроксильные радикалы ( $\bullet\text{OH}$ ), которые обладают чрезвычайно высокой реакционной способностью. Дополнительно дырки ( $h^+$ ), обладающие окислительным потенциалом, могут реагировать с молекулами воды или гидроксид-анионами с образованием тех же самых  $\bullet\text{OH}$ .

Гидроксильные радикалы являются основным окислительным агентом в механизме фотодеструкции. Они атакуют молекулы МС, разрушая их структуру и превращая в безвредные конечные продукты – воду, углекислый газ и низкомолекулярные органические соединения.



**Рис.8. Сравнительная фотокаталитическая активность  $\text{ZnO}$  и композитов  $\text{ZnO}/\text{SiO}_2$  по степени деструкции МС под действием солнечного света**

Проведён кинетический анализ деградации красителя с использованием моделей псевдопервого и псевдвторого порядка, Хигучи, Бейкера–Лонсдейла и Аварами–Эрофеева. Установлено, что наилучшее соответствие экспериментальным данным обеспечивают модель псевдвторого порядка ( $R^2 > 0,98$ ) и модель Аварами–Эрофеева, отражающая многостадийный характер реакции. Константы скорости ( $k$ ) для наночастиц ZnO превышают соответствующие значения для макро-ZnO в 2,2–3,1 раза. Композиты демонстрируют промежуточные значения, при этом гидрофильные материалы стабильно опережают гидрофобные аналоги.

**Таблица 4. Данные кинетического анализа в рамках различных моделей при фотокаталитической деградации МС под действием солнечного света в присутствии композитов ZnO/SiO<sub>2</sub>**

Модель	$k$ (гидрофильный)	$k$ (гидрофобный)	Единицы	$R^2$ (гидрофильный)	$R^2$ (гидрофобный)
Псевдопервый порядок	0.0350	0.0288	1/мин	0.98	0.97
Псевдвторой порядок	0.0493	0.0366	л/(мг·мин)	–	–
Хигучи	0.1097	0.0957	мин <sup>-1/2</sup>	–	–
Аварами–Эрофеева	1.1772	1.2971	безразмерно	–	–
Бейкера–Лонсдейла	0.0091	0.0073	1/мин	–	–

Также рассмотрены особенности фотокаталитического поведения под действием видимого и УФ-излучения. Под действием света наночастицы ZnO обеспечивают до 96% деградации МС за 120 мин, в то время как для макро-ZnO этот показатель составляет 64–70%. Композиты ZnO/SiO<sub>2</sub> показали эффективность 77–93% в зависимости от модификации. При воздействии УФ-излучения различия между образцами снижаются, однако нанокompозиты сохраняют преимущество за счёт более эффективной генерации активных форм кислорода.

Согласно термодинамическому анализу фотодеструкция МС протекает самопроизвольно ( $\Delta G^\circ$  от  $-2,81$  до  $-3,90$  кДж/моль), а величина  $\Delta H^\circ$  указывает на её эндотермический характер. Положительные значения энтропии ( $\Delta S^\circ$  до  $+50$  Дж/(моль·К)) интерпретируются как свидетельство увеличения беспорядка в системе при фотолизе. Эти параметры доказывают, что предложенные материалы работают эффективно даже в условиях ограниченной интенсивности излучения.

Важным результатом является выявление синергетического эффекта между компонентами композита. Кремнезёмная матрица не только стабилизирует наночастицы ZnO и предотвращает их агрегацию, но и способствует пространственному разделению зарядов, снижая вероятность их рекомбинации. Благодаря этому увеличивается продолжительность жизни активных радикалов и повышается фотокаталитическая эффективность.

Таким образом, фотокаталитические исследования подтвердили высокую эффективность, стабильность и адаптивность композитов ZnO/SiO<sub>2</sub>, которые представляют собой перспективные материалы для очистки воды и воздуха от стойких органических загрязнителей, пригодны для работы как при естественном освещении, так и под УФ- и видимым светом. Материалы отличаются высокой степенью деструкции, воспроизводимостью и доступностью синтеза, что открывает путь к их масштабированию и практическому применению.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Разработаны гидрофильные и гидрофобные модификации SiO<sub>2</sub> и их композиты с ZnO, отличающиеся по структуре, морфологии и термостабильности. Гидрофильный SiO<sub>2</sub> (TEOS) содержит активные Si–ОН-группы (~970 см<sup>-1</sup>), характеризуется высокой массопотерей (31.9 %) и размером частиц ~9.1 нм. Гидрофобный SiO<sub>2</sub> (MTMS) включает метильные группы (1260–1470 см<sup>-1</sup>), теряет всего 19.7 % массы и стабилен до 300 °С. Композиты ZnO/SiO<sub>2</sub> демонстрируют наноструктурированную морфологию (ZnO ~9.1 нм, агрегаты до 175 нм, кристаллиты ~35 нм), с аморфной матрицей SiO<sub>2</sub>.

2. Анализ спектров, морфологии и термогравиметрии подтвердил эффективность модификации и высокую стабильность материалов. После гидрофобизации исчезают Si–ОН-группы, усиливаются Si–O–Si-связи (1060–1120 см<sup>-1</sup>) и формируется плотная пористая структура. Термическая устойчивость гидрофобных образцов выше: энергия активации до 120 кДж/моль, ΔG при 500 °С – до 62 кДж/моль, что определяет их перспективность в фотокатализе, сенсорике, сорбентах и покрытиях.

3. Максимальная сорбционная ёмкость по водяному пару зафиксирована у нанодисперсного ZnO – 4.3 моль/кг, в то время как композиты с TEOS удерживают 1.31 моль/кг, сохраняя гидрофильность при включении неорганической фазы. Гидрофобные композиты показали высокую сорбцию бензола – до 0.186 моль/кг, что почти в 3 раза выше, чем у гидрофильных аналогов (0.063 моль/кг), что подчёркивает их селективность к органическим молекулам.

4. При адсорбции МС на всех сорбентах реализуется хемосорбционный механизм, описываемый моделью псевдотортого порядка с коэффициентом детерминации R<sup>2</sup> > 0.98. Максимальная сорбционная ёмкость составила 21.88 мг/г (для гидрофильного ZnO/SiO<sub>2</sub>), а значения n в модели Фрейндлиха (n = 0.71–0.85) свидетельствуют о гетерогенности поверхности и кооперативных взаимодействиях молекул красителя с сорбентом.

5. Наночастицы ZnO обеспечивают до 97 % деструкции МС за 60 мин при солнечном освещении, а композиты ZnO/SiO<sub>2</sub> с гидрофильной поверхностью достигают 80–85 % деструкции за 45 минут. Эти значения превышают показатели как гидрофобных композитов (68 % за 60 мин), так и литературных аналогов (50–60 %) в аналогичных условиях.

6. Кинетический анализ показал, что для гидрофильных композитов константы скорости по модели псевдопервого порядка достигают  $0.0350 \text{ мин}^{-1}$ , а  $R^2 > 0.97$ . По модели Аварами–Эрофеева значения параметра  $n > 1.4$ , что указывает на многостадийный механизм, включающий последовательную генерацию активных радикалов и глубокое расщепление хромофорных групп.

7. Новый композит ZnO/SiO<sub>2</sub> рекомендован и внедрен в Центральные научных лабораториях Шуртанского нефтегазодобывающего управления и Навоийского горно-металлургического комбината для очистки природного газа от сероводорода.

**THE SCIENTIFIC COUNCIL FOR AWARDING SCIENTIFIC DEGREES  
DSc.03/30.12.2019.K.01.03 AT THE NATIONAL UNIVERSITY OF  
UZBEKISTAN**

---

**NATIONAL UNIVERSITY OF UZBEKISTAN**

**MUYASSAROVA RAYKHONA**

**PHYSICO-CHEMICAL PROPERTIES OF CONTROLLED HYDROPHILIC-  
HYDROPHOBIC SILICA COMPOSITES**

**02.00.04 – Physical chemistry**

**DISSERTATION ABSTRACT OF THE DOCTOR  
OF PHILOSOPHY (PhD) ON CHEMICAL SCIENCES**

**Tashkent - 2025**

**The topic of the dissertation for the degree of Doctor of Philosophy (PhD) in Chemistry is registered with the Higher Attestation Commission under the Ministry of Higher Education, Science and Innovation of the Republic of Uzbekistan under the number B2024.3.PhD/K828.**

The dissertation was carried out at the National University of Uzbekistan.

The abstract of the dissertation in three languages (Uzbek, Russian and English (resume)) is available online at [ik-kimyo.nuu.uz](http://ik-kimyo.nuu.uz) and on the website of the Ziyonet information-educational portal [www.ziyonet.uz](http://www.ziyonet.uz).

**Scientific supervisor:** **Akbarov Khamdam Ikramovich**  
doctor of Chemical Sciences, Professor

**Official opponents:** **Ruzimuradov Olim Narbekovich**  
doctor of Chemical Sciences, Professor  
**Yoldoshov Sherzod Abdullayevich**  
doctor of Chemical Sciences, Senior Researcher

**Leading organization:** **Institute of General and Inorganic Chemistry**

The defense of the dissertation will take place on « \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2025 in « \_\_\_\_ » at the meeting of Scientific council 03/30.12.2019.K.01.03 at the National University of Uzbekistan (Address: 100174, Tashkent, University street, 4. Ph.: (99871)227-12-24, Fax: (99824) 246-53-21; 246-02-24. e-mail: [ilmiy\\_kengash@nuu.uz](mailto:ilmiy_kengash@nuu.uz)).

The doctoral dissertation has been registered at the Information Resource Centre of the National University of Uzbekistan under № \_\_\_\_ (Address: 100174, 4 University street, Tashkent, Administrative Building of the National University of Uzbekistan, tel.: (99871) 246-67-71).

The abstract of the dissertation has been distributed on « \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2025 year.  
Protocol at the register № \_\_\_\_\_ dated « \_\_\_\_ » \_\_\_\_\_ 2025 year.

**Z. Smanova**  
Chairman of the Scientific Council  
for awarding the scientific degrees,  
Doctor of Chemical Sciences, Professor

**N. Kutlimurotova**  
Scientific Secretary of the Scientific Council  
for awarding the scientific degrees,  
Doctor of Chemical Sciences, Professor

**N. Kattaev**  
Vise chairman of the Scientific Seminar under the Scientific  
Council for awarding the scientific degrees,  
Doctor of Chemical Sciences, Professor

## INTRODUCTION (abstract of Doctor of Philosophy (PhD) thesis)

**The aim of research work** consists of studying the physicochemical properties of silica compositions with controlled hydrophilic-hydrophobic nature.

**The objects of research** are amorphous silicon dioxide ( $\text{SiO}_2$ ) obtained from tetraethoxysilane (TEOS) and methyltrimethoxysilane (MTMS); zinc oxide ( $\text{ZnO}$ ) synthesized from local secondary raw materials;  $\text{ZnO}/\text{SiO}_2$  composites with variable hydrophilic and hydrophobic properties.

**The novelty of the research work** is as follows:

for the first time reproducible methods for obtaining  $\text{ZnO}/\text{SiO}_2$  composites with a given surface hydrophilicity or hydrophobicity have been developed, providing stable physico-chemical properties in a wide temperature range (from 25C to 800C);

for the first time it has been shown that varying the nature of precursors (TEOS/MTMS) allows for targeted control of the morphology and size of pores (from 1.8 to 7.3 nm) in the synthesized composites, which directly affects their sorption (up to 4.3 mol/kg for water vapor) and photocatalytic properties (up to 96% degradation of MS under sunlight);

the dependence on photocatalytic activity on the degree of hydrophobization of the silica matrix surface has been established, confirmed by a detailed kinetic-mechanistic analysis of the processes of methylene blue destruction under the influence of various types of radiation (UV, visible, solar);

for the first time a comparison of kinetic models (pseudo-first and pseudo-second order, Higuchi, Avrami-Erofeev, Baker-Lonsdale) was carried out in relation to systems with different  $\text{ZnO}$  dispersion and degree of  $\text{SiO}_2$  surface modification, which made it possible to quantitatively describe the mechanisms of sorption and photodestruction with correlation coefficients  $R^2$  up to 0.9966;

thermodynamic parameters were obtained and interpreted ( $\Delta H^\circ$  up to +12.15 kJ/mol;  $\Delta G^\circ$  from -3.77 to -1.48 kJ/mol), which for the first time made it possible to substantiate the energy efficiency of the interaction of the dye with the active centers of composites of various natures.

**Implementation of research results.** Based on the synthesis and comprehensive analysis of the structure, phase composition, morphology and textural characteristics of the synthesized silica materials and their composites with zinc oxide:

the  $\text{ZnO}/\text{SiO}_2$  composite was included in the “List of promising developments for implementation in 2026-2027” at the Central Chemical Laboratory of the Shurtan Oil and Gas Production Department (Release of the Shurtan Oil and Gas Production Department dated October 2, 2025, № ОИ 02, ЭД-3448). As a result, it was possible to purify natural gas from  $\text{H}_2\text{S}$  to a concentration of <1 ppm, which meets the strictest industrial and environmental standards;

the  $\text{ZnO}/\text{SiO}_2$  composition is included in the “List of promising developments for implementation in 2026-2027” of the Central Scientific Laboratory of JSC Navoi Mining and Metallurgical Plant (Certificate of the Central Scientific Laboratory of JSC Navoi Mining and Metallurgical Plant dated 10/08/2025 № 02-07/027/10451).

As a result, it is possible to purify natural gas from H<sub>2</sub>S by 99,0 %, which fully complies with international standards for the transportation of natural gas.

**The structure and volume of the thesis.** The dissertation consists of an introduction, five chapters, a conclusions, a list of literature used and an appendix. The volume of the dissertation is 123 pages.

## ЭЪЛОН ҚИЛИНГАН ИШЛАР РЎЙХАТИ СПИСОК ОПУБЛИКОВАННЫХ РАБОТ

### LIST OF PUBLISHED WORKS

#### I бўлим (I часть; part I)

1. Муяссарова Р.И., Қораев С.Э., Каттаев Н.Т., Акбаров Х.И., Дадаходжаев А.Т. Синтез и фотокаталитические свойства гибридного композита  $ZnO@SiO_2$  // Узбекский химический журнал, 2025. –№ 3, –С. 29-35. (02.00.00. №6).

2. Муяссарова Р.И., Қораев С.Э., Каттаев Н.Т., Акбаров Х.И. Синтез амфифильного кремнезема и исследование его капиллярно-пористой структуры // Композиционные материалы, 2025. –№ 3. –С. 17-21. (02.00.00. №4).

3. Муяссарова Р.И., Қораев С.Э., Акбаров Х.И., Каттаев Н.Т., Тилеубаев С.О. Исследование структурно-пористых характеристик амфифильного кремнезема методом низкотемпературной адсорбции азота // *Universum: химия и биология*, 2024. –№12/126, –С. 35-40. (02.00.00. №2).

4. Муяссарова Р.И., Қораев С.Э., Акбаров Х.И., Сагдуллаев Б.У., Каттаев Н.Т. Адсорбция метиленового синего на гидрофильном и гидрофобном кремнеземе // ВЕСТНИК НУУз, естественные науки, 2025 –№3/2, –С. 413-417. (02.00.00.№12).

5. Muayassarova R.I., Sidrasulieva G.B. Koraev S.E., Tileubaev S.O., Akbarov Kh.I., Kattaev N.T. Adsorption of water vapor on hydrophilic and hydrophobic  $SiO_2$  and their hybrid composites with ZnO // Science and education in Karakalpakstan, 2025. – № 3/2, –P. 64-67. (02.00.00.№16)

6. Muayassarova R., Koraev S., Sidrasulieva G., Kattaev N., Akbarov Kh. Dimensional and morphological properties of nanodispersed ZnO obtained on the basis of the spent industrial sorbent GIAP // International Journal of Material and Chemistry, 2025. –№3, –P. 204-210. (02.00.00.№13)

#### II бўлим (II часть; part II)

1. Muayassarova R.I., Sotiboldiyev B.S., Qorayev S.E., Kattayev N.T., Akbarov X.I. Metiltrimetoksisilan asosida olingan gidrofil tabiatli kremnezemning sorbsion xususiyatlari // O‘zbekiston Milliy universitetining 105 yilligiga bag‘ishlangan “Analitik kimyoning dolzarb muammolari” mavzusidagi xalqaro professor-o‘qituvchilar va yosh olimlar ishtirokidagi respublika ilmiy-amaliy anjumani materiallari to‘plami. –Toshkent, 2023. 11-12 may. –B. 241-242.

2. Акбаров Х.И., Сагдуллаев Б.У., Муяссарова Р.И., Қораев С.Э., Раҳмонов Ж.А., Каттаев Н.Т. Ўзгарувчан кутблиликка эга кремнеземнинг капилляр-ғоваклик хусусиятлари // “Физикавий ва коллоид кимё фанларининг фундаменталь ва амалий муаммолари ҳамда уларнинг инновацион ечимлари” мавзусида халқаро илмий-амалий анжуман материаллари тўплами.–Наманган, 2024. 9-10 февраль. –Б. 588-591.

3. Муяссарова Р.И., Қораев С.Э., Каттаев Н.Т., Акбаров Х.И. Гидрофиль-гидрофоб табиатли кремнезем синтези ва капилляр-ғовак тузилиши // “Замонавий органик кимё: ютуқлар, муаммолар, ечимлар” мавзусидаги хорижий олимлар иштирокидаги Республика илмий-амалий анжумани. –Тошкент, 2024. 20-21 сентябрь. –Б. 185-187.
4. Муяссарова Р.И., Қораев С.Э., Каттаев Н.Т., Акбаров Х.И. Ўзгарувчан кутбиликка эга бўлган кремнезем синтези // Ўзбекистон Миллий университетининг кимё факультети “Барқарор ривожланишда кимёнинг рўли” мавзусидаги профессор-ўқитувчилар, ёш олимлар, магистрантлар ва иқтидорли талабалар иштирокидаги илмий-амалий анжуман. –Тошкент, 2024. 21-22 февраль. –Б. 161-163.
5. Muiassarova R.I., Qorayev S.E., Kattayev N.T., Akbarov H.I. Amfifil kremnezem@ZnO kompozitlari sintezi // “Kimyo va kimyoviy texnologiya sohalarining dolzarb muammolari va istiqbollari” Xalqaro ilmiy-amaliy konferensiya. –Jizzax, 2025. 25-26 aprel. –B. 130-133.
6. Муяссарова Р.И., Шарифжонова С.Х., Есиркепова В.Қ., Қораев С.Э., Акбаров Х.И., Каттаев Н.Т. Амфифиль кремнезем синтези ва физик-кимёвий хоссалари // Ўзбекистон Миллий университети кимё фалултетининг 95 йиллик юбилейига бағишланган “Келажакка кимё билан интиламиз” мавзусидаги профессор-ўқитувчилар, ёш олимлар, магистрантлар ва иқтидорли талабалар иштирокидаги илмий-амалий анжуман. –Тошкент, 2025. 22-23 май. –Б. 101.
7. Муяссарова Р.И., Қораев С.Э., Акбаров Х.И., Каттаев Н.Т. Изотермическая адсорбция поров воды на амфифильном кремнеземе и его композите с оксидом цинка // Материалы международной научной конференции студентов и молодых ученых “Фараби элеми”. –Алмата, 2025. 3-5 апреля. –С. 457.
8. Қораев С.Э., Муяссарова Р.И., Акбаров Х.И., Каттаев Н.Т. Сорбционные свойства композита на основе бентонита и кремнезема // “Аниқ ва табиий фанларнинг ривожланиш истиқболлари” Республика илмий-амалий анжумани. –Денов, 2024. 7-май. –Б. 494-496.
9. Muiassarova R.I., Akbarov H.I., Kattayev N.T. Gidrofil-gidrofob kremnezem@ZnO kompozitlari sintezi // “Fan va ishlab chiqarish sohalarida zamonaviy fizik-kimyoviy tadqiqot usullari integratsiyasi” mavzusidagi II-respublika miqyosidagi anjuman. –Toshkent, 2025. 17-18 oktabr. –B. 352-354.
10. Муяссарова Р.И., Қораев С.Э., Акбаров Х.И., Каттаев Н.Т. Размерные свойства амфифильных композитов ZnO/кремнезем // I-международная научно-техническая конференция «Инновационные технологии переработки минеральных и вторичных ресурсов в химической и пищевой промышленности». –Янгиер, 2025. 16-17 октября. –С.220-222.

