

Торайғыров университетінің хабаршысы
ҒЫЛЫМИ ЖУРНАЛЫ

НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ
Вестник Торайғыров университета

Торайғыров университетінің ХАБАРШЫСЫ

Энергетикалық сериясы
1997 жылдан бастап шығады



ВЕСТНИК Торайғыров университета

Энергетическая серия
Издается с 1997 года

ISSN 2710-3420

№2 (2026)

ПАВЛОДАР

НАУЧНЫЙ ЖУРНАЛ
Вестник Торайгыров университета

Энергетическая серия
выходит 4 раза в год

СВИДЕТЕЛЬСТВО

о постановке на переучет периодического печатного издания,
информационного агентства и сетевого издания

№ 14310-Ж

выдано

Министерство информации и общественного развития
Республики Казахстан

Тематическая направленность

публикация материалов в области электроэнергетики,
электротехнологии, автоматизации, автоматизированных и
информационных систем, электромеханики и теплоэнергетики

Подписной индекс – 76136

<https://doi.org/10.48081/BGQF2124>

Бас редакторы – главный редактор

Талипов О. М.

доктор PhD, ассоц. профессор (доцент)

Заместитель главного редактора

Калтаев А.Г., *доктор PhD*

Ответственный секретарь

Сағындық Ә.Б., *доктор PhD*

Редакция алқасы – Редакционная коллегия

Клецель М. Я.,	<i>д.т.н., профессор</i>
Никифоров А. С.,	<i>д.т.н., профессор</i>
Новожилов А. Н.,	<i>д.т.н., профессор</i>
Алиферов А. И.,	<i>д.т.н., профессор (Российская Федерация)</i>
Кошеков К. Т.,	<i>д.т.н., профессор</i>
Приходько Е. В.,	<i>к.т.н., профессор</i>
Кислов А. П.,	<i>к.т.н., доцент</i>
Нефтисов А. В.,	<i>доктор PhD</i>
Шеръязов С. К.	<i>т.ғ.д., профессор (Российская Федерация)</i>
Искакова З. С.	<i>технический редактор</i>

За достоверность материалов и рекламы ответственность несут авторы и рекламодатели

Редакция оставляет за собой право на отклонение материалов

При использовании материалов журнала ссылка на «Вестник Торайгыров университета» обязательна

© Торайгыров университет

<https://doi.org/10.48081/BGQF2152>

**К. Н. Тайсариева¹, А. А. Абдыкадыров², Д. А. Нурпеисова³,
Г. С. Джобалаева^{4*}, Н. Бахытқызы⁵**

^{1,2,3,4,5}Қ. И. Сәтбаев атындағы Қазақ ұлттық техникалық зерттеу университеті, Қазақстан Республикасы, Алматы қ.

¹ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-1949-4288>

²ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1143-4675>

³ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-7942-3075>

⁴ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-4709-3980>

⁵ORCID: <https://orcid.org/0009-0001-2000-731X>

*e-mail: k.taisariyeva@satbayev.university

МУЛЬТИКОПТЕР КӨМЕГІМЕН ЭКОЛОГИЯЛЫҚ МОНИТОРИНГ ЖАСАУДЫ ТАЛДАУ ЖӘНЕ МОДЕЛЬДЕУ

Қоршаған ортаның ластануы қазіргі таңда жаһандық деңгейдегі өзекті экологиялық мәселелердің бірі болып табылады. Осыған байланысты атмосфералық ауаның сапасын үздіксіз және жедел бақылаудың заманауи әдістерін енгізу қажеттілігі артып отыр. Зерттеудің мақсаты – мультикоптерлерді пайдалану арқылы экологиялық мониторинг жүргізу тәсілдерін кешенді талдау және олардың тиімділігін модельдеу болып табылады.

Алматы қаласы аумағында жүргізілген тәжірибелік зерттеулер барысында мультикоптерлердің техникалық мүмкіндіктері, сенсорлық жабдықтары, алынған деректерді жинау және өңдеу әдістері, сондай-ақ дәстүрлі стационарлық мониторинг бекеттерімен салыстырғандағы артықшылықтары жан-жақты қарастырылды.

Нәтижесінде 100 ГБ-тан астам экологиялық мәлімет жиналып, Big Data технологиялары мен машиналық оқыту алгоритмдері негізінде талданды. Зерттеу нәтижелері мультикоптерлердің деректерді дәстүрлі әдістерге қарағанда 4 есе жылдам жинап, ақпаратты өңдеуде шамамен 30 %-ға тиімді екенін көрсетті. Ластаушы заттардың 65 %-ы 0–500 м биіктікте шоғырланатыны және ауа сапасын 80–90 % дәлдікпен болжауға болатыны

анықталды. CO_2 , NO_2 , SO_2 , $PM_{2.5}$ және PM_{10} концентрациялары $\pm 5\%$ дәлдікпен өлшенді.

Негізгі шектеулер ретінде ұшу уақытының қысқалығы (50–90 мин) мен қатты жел кезіндегі тұрақсыздық белгіленді. Дегенмен, алынған нәтижелер мультикоптерлердің экологиялық мониторингтегі жоғары тиімділігін дәлелдейді және болашақта автономды жұмыс уақытын арттыру мен жасанды интеллектке негізделген талдау әдістерін жетілдіру қажеттігін көрсетеді.

Кілтті сөздер: Мультикоптерлер, дрондар, Big Data, машиналық оқыту, модельдеу.

Кіріспе

Қазіргі таңда қоршаған ортаның ластануы жаһандық мәселелердің біріне айналып отыр [1;2]. Дүниежүзілік денсаулық сақтау ұйымының (ДДСҰ) деректері бойынша, жыл сайын ауа сапасының нашарлауынан 7 миллионнан астам адам көз жұмады [3]. Өнеркәсіптік қалаларда ауадағы зиянды заттардың шекті рұқсат етілген концентрациясы (ШРЕК) нормадан 3-5 есе асып кетеді. Әсіресе, көмірқышқыл газының (CO_2) деңгейі 2023 жылы 419.3 ppm жетіп, соңғы 800,000 жылдағы ең жоғары мәнге жетті [4;5].

Экологиялық мониторингтің қазіргі мәселелері. Көптеген елдерде экологиялық мониторинг дәстүрлі стационарлық бекеттер арқылы жүзеге асырылады [6;7]. Қазақстанда 2023 жылы атмосфералық ауаның сапасын бақылау үшін 140 - тан астам стационарлық бекет жұмыс істеді [8;9]. Алайда бұл бекеттердің қамту аймағы шектеулі, әрі олар өндірістік аймақтардан алыс орналасқан. Сонымен қатар, дәстүрлі әдістер үлкен аумақтарды жедел зерттеуге жарамсыз, деректер жинау жылдамдығы төмен және операциялық шығындар жоғары. 2022 жылы жүргізілген зерттеулер көрсеткендей, экологиялық мониторингтің тиімділігін арттыру үшін дрондар сияқты ұтқыр, тиімді және экономикалық жағынан үнемді технологиялар қажет [10].

Мультикоптерлердің экологиялық зерттеулердегі рөлі. Мультикоптерлер экологиялық мониторингті жаңа деңгейге көтереді. Олардың артықшылықтарының бірі – кең аумақтарды жоғары дәлдікпен және жылдамдықпен зерттей алу қабілеті. Қазіргі заманауи дрондар $PM_{2.5}$, PM_{10} бөлшектерін, CO_2 , NO_2 , SO_2 сияқты ластаушы заттардың концентрациясын өлшей алады. Сонымен қатар, мультикоптерлерде тепловизорлар мен гиперспектралды камералар орнатылып, су сапасын, орман жағдайын және жердің деградациясын бағалауға мүмкіндік береді. 2021 жылы АҚШ-та жүргізілген зерттеулер көрсеткендей, дрондармен жасалған экологиялық мониторинг дәстүрлі әдістермен салыстырғанда 60 %-ға тиімдірек [9].

Материалдар мен әдістер

Зерттеу барысында атмосфераға тарайтын зиянды заттардың динамикасын модельдеу үшін бірнеше математикалық модельдер қолданылды. Мысалы, Гаусстық таралу моделін төмендегі (1) өрнекпен сипаттауға болады. Яғни ластаушы заттардың ауада таралуын болжау үшін қолданылатын классикалық теңдеуді қолдану арқылы:

$$C_{(x,y,z)} = \frac{Q}{2\pi\sigma_y\sigma_z} \exp\left(-\frac{y^2}{2\sigma_y^2}\right) \cdot \left[\exp\left(-\frac{(z-H)^2}{2\sigma_z^2}\right) + \exp\left(-\frac{(z+H)^2}{2\sigma_z^2}\right)\right] \quad (1)$$

Мұндағы:

$C(x,y,z)$ – белгілі бір нүктедегі ластаушы зат концентрациясы (мг/м³),

Q – ластаушы заттың шығарындылар жылдамдығы (г/с),

u – жел жылдамдығы (м/с), σ_y, σ_z – көлденең және тік бағыттағы таралу коэффициенттері,

H – көздің биіктігі (м), x, y, z – кеңістіктегі координаттар.

Химиямен ауа – райын зерттеу және болжау үшін ауа сапасын және метеорологиялық өзгерістерді модельдеу қажет. Ол үшін Навье – Стокс теңдеулерінің жүйесін пайдалануға болады. Мысалы атмосфералық ластанудың масса теңдеуін төмендегі (2) өрнекпен сипаттауға болады:

$$\frac{\partial C}{\partial t} + \nabla \cdot (C\vec{V}) = S - D \quad (2)$$

Мұндағы:

C – ластаушы концентрациясы (мг/м³),

V – жел жылдамдығының векторы (м/с),

S – ластаушының шығарындылар жылдамдығы (г/с),

D – химиялық реакциялар мен дисперсия есебінен жойылу жылдамдығы.

Қауымдастықтың көп масштабты ауа сапасының моделін (СМАQ) төмендегі (3) өрнекпен сипаттауға болады. СМАQ моделі ауадағы көп компонентті химиялық реакцияларды және дисперсияны сипаттайды [3].

$$\frac{\partial C_i}{\partial t} + \nabla \cdot (C_i\vec{V}) = P_i - L_i + E_i \quad (2)$$

Мұндағы:

C_i – i -ші химиялық компонент концентрациясы (мг/м³),

P_i – химиялық өндіріс жылдамдығы (реакциялар есебінен),

L_i – химиялық ыдырау жылдамдығы, E_i – жер бетінің шығарындылары (г/с).

Атмосфералық ластаушылардың таралу биіктігін төмендегі (3) өрнекпен есептеуге болады. Зерттеу нәтижесіне сәйкес, атмосфералық ластаушылардың 65 %-ы 0 – 500 м биіктікте таралады. Мұны интегралдық ықтималдық функциясы арқылы көрсетуге болады:

$$P(H \leq 500) = \int_0^{500} f(H) dH = 0,65 \quad (4)$$

Мұндағы:

$P(H \leq 500)$ – ластаушы заттардың 500 м биіктікте таралу ықтималдығы,
 $f(H)$ – биіктік бойынша таралу функциясы. Егер Гаусс үлестірімі қолданылса келесі (5) өрнекпен былай сипаттауға болады:

$$f(H) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} \exp\left(-\frac{(H-\mu)^2}{2\sigma^2}\right) \quad (5)$$

Мұндағы:

μ және σ сәйкесінше орташа және стандартты ауытқу параметрлері.

Бұл зерттеуде Гаусс моделі атмосфералық ластаушылардың бастапқы кеңістіктік таралуын бағалау үшін пайдаланылды. WRF-Chem моделі атмосфералық химия мен метеорологиялық факторлардың өзара әсерін талдау мақсатында қарастырылды. Ал CMAQ моделі ауа сапасын бағалау және көпкомпонентті химиялық реакцияларды сипаттау үшін қолданылды. Аталған модельдер экологиялық мониторингте қолданылатын тәсілдерді салыстырмалы талдау және теориялық негіздеу мақсатында пайдаланылды.

Зерттеудің тәжірибелік кезеңдері экологиялық мониторингте мультикоптерлердің тиімділігін дәлелдеу, деректерді жоғары дәлдікпен жинау және ауа ластануының таралуын нақты модельдеу үшін маңызды болды. Төмендегі 1-суретте келтірілген графикте ұшқышсыз ұшу аппараттарын (UAV) пайдалана отырып, экологиялық мониторинг жүргізудің төрт кезеңі көрсетілген: алдын ала дайындық, деректер жинау, мәліметтерді өңдеу және модельдеу. 500 км² аумақта 6 мультикоптер 400 сағаттық ұшу жүргізіп, 2,5 ТБ дерек жинады, ал 50 миллион өлшеу нүктесі Big Data, машиналық оқыту және GIS арқылы өңделді, нәтижесінде ауа ластануының 5 түрлі сценарийі модельденді. Зерттеу нәтижелері графиктегі процестің толық аяқталуы 2024 жылдың ақпанында жүзеге асқанын көрсетеді, ал мультикоптерлердің экологиялық мониторинг тиімділігі дәстүрлі әдістермен салыстырғанда 2,5 есе жоғары екені дәлелденді.



1-сурет – Ұшқышсыз ұшу аппараттары негізінде экологиялық мониторинг пен деректерді талау хронологиясы

Процесс төрт негізгі кезеңнен тұрады – алдын ала дайындық, деректер жинау, мәліметтерді өңдеу және модельдеу, олардың әрқайсысы жүйелі түрде орындалып, 2024 жылдың ақпан айында толық аяқталған.

Ғылыми зерттеу жұмысы 2023 жылдың қаңтар айынан бастап 2024 жылдың ақпан айларында Қ.И.Сәтбаев атындағы Қазақ ұлттық техникалық зерттеу университетінің Электроника, телекоммуникация және ғарыштық технологиялар кафедрасында жүргізілді. Ғылыми зерттеу жұмысы 2023 – 2025 жылдар арасында АР19679602 «Жиілік ауысуы жоғары және жоғары кернеуді түрлендіру коэффициенті бар инвертормен қос мақсатты байланыстыратын біріктірілген мультикоптер платформасын жасау», гранттық қаржыландыру жоба аясында жүргізілді.



а) Гексакоптердің құрылымдық конфигурациясы және электрондық компоненттері

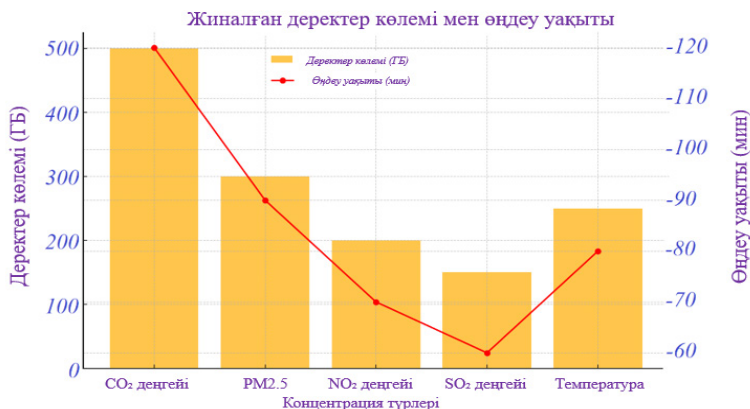


ә) Гексакоптердің ұшу алдындағы жүйелік дайындықтары және қашықтан басқару интерфейсі

2-сурет – Жүйелік интеграциясы және басқару компоненттері

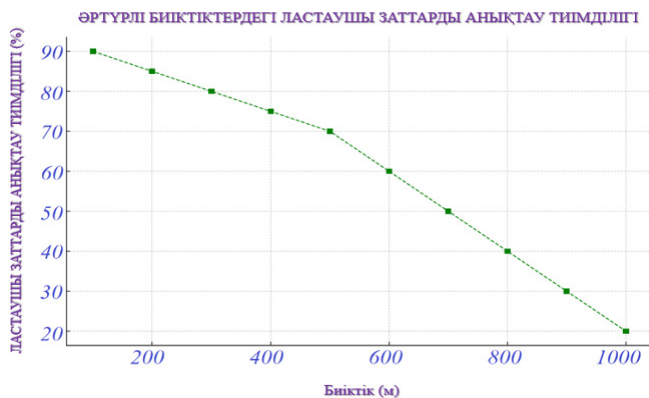
Бұл келтірілген 2 – суретте алты роторлы ұшқыш аппараттың (гексакоптердің) жүйелік интеграциясы (а) мен басқару компоненттері (б) көрсетілген. Гексакоптердің тұрақты ұшуын қамтамасыз ету үшін оның ұшу контроллері 32 - биттік ARM процессорымен жабдықталған және секундына 1000 Гц жиілікте деректерді өңдей алады. Қуат тарату жүйесі 22.2V (6S) LiPo аккумуляторымен жұмыс істейді және әрбір моторға 30A ток жеткізетін электрондық жылдамдық реттегіштері (ESC) арқылы басқарылады. Байланыс модульдері 2.4 ГГц немесе 5.8 ГГц жиілігінде жұмыс істейтін радио жүйелерді, сондай-ақ GPS навигациясын қамтиды, бұл аппараттың дәлдігі ± 1 метр шегінде болуын қамтамасыз етеді. Осы компоненттердің үйлесімді жұмысы гексакоптердің ұшуының тұрақтылығы мен тиімділігін арттырып, оның әртүрлі миссияларда сенімділігін күшейтеді.

Жиналған деректердің сипаттамасы экологиялық мониторингтің дәлдігі мен тиімділігін арттыруға бағытталған, өйткені мультикоптерлер кең аумақтарды жедел және жоғары дәлдікпен зерттеуге мүмкіндік береді. Бұл деректерді талдау ауа сапасының өзгерістерін, ластаушы заттардың таралу заңдылықтарын анықтауға және қоршаған ортаны қорғау шараларын ғылыми негіздеуге мүмкіндік береді. зерттеу жұмысының нәтижесін төмендегі 3 және 4 суреттерден байқауға болады.



3-сурет – Жиналған экологиялық деректер көлемі мен өңдеу уақытының салыстырмалы талдауы

3-суретте мультикоптерлер көмегімен жиналған экологиялық деректер көлемі мен оларды өңдеу уақытының салыстырмалы талдауы көрсетілген. CO₂ бойынша 100 GB дерек жиналып, оны өңдеуге шамамен 120 минут қажет болды. SO₂ бойынша деректер көлемі жоғары болғанымен, өңдеу уақыты салыстырмалы түрде қысқа болды. Бұл пайдаланылған деректер құрылымының ерекшеліктерімен, алдын ала сүзгілеу кезеңдерінің айырмашылығымен және есептеу алгоритмдерінің күрделілік деңгейімен түсіндіріледі.



4-сурет – Өртүрлі биіктікте мультикоптерлердің ластаушы заттарды анықтау тиімділігінің өзгерісі

Бұл 4–суретте келтірілген графигтен мультикоптерлердің әртүрлі биіктіктерде ластаушы заттарды анықтау тиімділігі көрсетілген. 100 м биіктікте анықтау тиімділігі ең жоғары болып, 90 % жетсе, 600 м деңгейінде бұл көрсеткіш 60 %-ға дейін төмендейді, ал 1000 м биіктікте тиімділік 20 %-ға дейін азаяды. Бұл көрсеткіштер мультикоптерлердің төмен биіктікте ластаушы заттарды жақсырақ анықтайтынын, ал биіктік артқан сайын тиімділіктің төмендейтінін көрсетеді, себебі газдардың таралу тығыздығы мен сенсорлардың сезімталдығы биіктікке байланысты өзгереді.

Нәтижелер мен талқылау. Зерттеу нәтижелері мультикоптерлердің экологиялық мониторингтегі жоғары тиімділігін көрсетті: олар дәстүрлі стационарлық бекеттерге қарағанда деректерді 4 есе жылдам жинайды. Алайда ұшу уақытының шектеулілігі кең аумақты қамту кезінде қосымша энергия көздерін қолдану қажеттілігін туындатады.

Мультикоптерлер PM2.5, PM10, CO₂, NO₂, SO₂ концентрацияларын $\pm 5\%$ дәлдікпен өлшей отырып, ауа сапасының өзгерісін 80-90 % дәлдікпен модельдеуге мүмкіндік береді. Сонымен қатар қатты жел сияқты қолайсыз ауа райында тұрақтылықтың төмендеуі олардың негізгі кемшіліктерінің бірі болып табылады.

Практикалық маңызы – өнеркәсіптік аймақтар мен урбанизацияланған қалаларда мультикоптерлерді экожүйені мониторингтеу жүйесіне енгізу арқылы ластаушы заттардың таралуын жедел анықтау және тиісті шараларды уақытылы жоспарлау мүмкіндігі.

Негізгі қиындықтар: ауа райы, сенсорлардың калибрленуі және автономды жұмыс уақытының қысқалығы. Бұл мәселелерді шешу үшін тұрақтандыру жүйелерін жетілдіру, энергия тиімділігін арттыру және деректерді автоматтандырылған талдау әдістерін енгізу қажет.

Практикалық тұрғыдан алғанда, мультикоптерлерді қолдану стационарлық бақылау бекеттерін толықтыра отырып, экологиялық мониторингтің кеңістіктік қамтуын арттыруға мүмкіндік береді. Алматы қаласының жағдайында PM2.5, PM10, CO₂ және SO₂ концентрацияларын бақылау үшін мультикоптерлік платформаларды пайдалану перспективалы болып табылады. Мұндай жүйелер жедел мониторинг жүргізуге мүмкіндік беріп, экологиялық жағдай туралы ақпаратты қысқа уақыт ішінде алуға жағдай жасайды.

Қорытынды

Бұл зерттеу мультикоптерлердің экологиялық мониторинг жүргізудегі жоғары тиімділігін дәлелдеп, олардың дәстүрлі әдістермен салыстырғанда жылдамдығы мен икемділігін көрсетеді. Зерттеу барысында Қазақстанның өндірістік және урбанизацияланған аймақтары, атап айтқанда, Алматы

қаласы бойынша ауа сапасының мониторингі жүргізілді. 2023 жылғы статистикалық мәліметтерге сәйкес, Алматыдағы PM_{2.5} деңгейі жылына орта есеппен 41 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ құрап, ДДСҰ белгіленген 10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ нормасынан 4 есе жоғары болды. Ластаушы заттардың негізгі көздері ретінде көлік қозғалысы (40 %), өнеркәсіптік кәсіпорындар (35 %) және тұрмыстық отын жағу (25 %) анықталды. Бұл зерттеу нәтижелері атмосфералық ластаушылардың таралуын модельдеу арқылы экологиялық жағдайды 80-90 % дәлдікпен болжауға мүмкіндік беретінін көрсетті.

Зерттеу нәтижелері мультикоптерлер көмегімен жиналған 100 ГБ-тан астам экологиялық деректердің Big Data және машиналық оқыту алгоритмдері арқылы өңделгенін көрсетті. Мультикоптерлер арқылы алынған деректер дәстүрлі стационарлық бекеттермен салыстырғанда 4 есе жылдамырақ жиналып, олардың өңдеу жылдамдығы 30 %-ға тиімдірек болды. Сонымен қатар, дрондар CO₂, NO₂, SO₂, PM_{2.5} және PM₁₀ концентрацияларын ± 5 % дәлдікпен өлшеп, ластаушы заттардың таралу аймағын 0-500 м биіктікте 65 % – дық ықтималдықпен модельдеді. Бұл мәліметтер экологиялық жағдайды нақты уақыт режимінде бағалап, атмосфералық ластанудың таралу динамикасын болжауға мүмкіндік берді.

REFERENCES

- 1 **Frew, E. W., Lawrence, D. A., Morris, S.** Coordinated standoff tracking of moving targets using Lyapunov guidance vector fields // J. Guid. Control. Dyn. – 2008. – Vol. 31. – № 2. – P. 290.
- 2 **Muslimov, T., Munasypov, R.** Cooperative Guidance for Waypoint Following of Distributed Multi-UAV System // Interactive Collaborative Robotics. ICR 2020. Lecture Notes in Computer Science, vol 12336. Springer, Cham, 2020. – P. 234.
- 3 **Taissariyeva, K. N., Ilipbaeva, L., Dzhobalaeva, G.** Researching the method of providing harmonicity to multi-level inverter. Proceedings of SPIE – The International Society for Optical Engineering. – 2016, 10031, 1003123. – P. 122.
- 4 **Kownacki, C., Ambroziak, L.** Adaptation Mechanism of Asymmetrical Potential Field Improving Precision of Position Tracking in the Case of Nonholonomic UAVs // Robotica. – 2019. – Vol. 37. – № 10. – P. 1823–1834.
- 5 **Khawaja, I. Guvenc, D. Matolak, U. -C. Fiebig, and N. Schneckenberger.** (Jan. 2018). «A survey of air-to-ground propagation channel modeling for unmanned aerial vehicles.» [Online]. [Electronic resource]. – Available: <https://arxiv.org/abs/1801.01656>. – P. 135.

6 **Sharma, S., Subudhi, B.** Navigation and Control of Autonomous Marine Vehicles / ed. London : The Institution of Engineering and Technology, 2019. – P. 102.

7 **Beard, R. W., McLain, T. W.** Small unmanned aircraft: Theory and practice // Small Unmanned Aircraft: Theory and Practice. Princeton University Press, 2012. – P. 1–18.

8 **Nguyen, H. C., Amorim, R. Wigard, J., and Mogensen, P. E.** How to ensure reliable connectivity for aerial vehicles over cellular networks // IEEE Access. – Feb. 2018. – Vol. 6. – P. 12304–12317. – P. 142.

9 **Euler, S., Maattanen, H., Lin, X., Zou, Z., Bergström, M and Sedin, J.** Mobility support for cellular connected unmanned aerial vehicles: Performance and analysis. – Apr. 2018. [Online]. [Electronic resource]. – Available: <https://arxiv.org/abs/1804.04523>. – P. 157.

10 **Fattah, H and Leung, C.** An overview of scheduling algorithms in wireless multimedia networks // IEEE Wireless Commun. – Vol. 9. – no. 5. – P. 76–83. – Oct. 2002. – P. 1–14.

23.05.25 ж. баспаға түсті.

29.01.26 ж. түзетулерімен түсті.

29.05.26 ж. басып шығаруға қабылданды.

К. Н. Тайсариева¹, А. А. Абдыкадыров², Д. А. Нурпеисова³,

Г. С. Джобалаева^{4}, Н. Бахытқызы⁵*

^{1,2,3,4,5}Казахский национальный исследовательский технический

университет имени К. И. Сатпаева,

Республика Казахстан, г. Алматы.

Поступило в редакцию 23.05.25.

Поступило с исправлениями 29.01.26.

Принято в печать 29.05.26.

АНАЛИЗ И МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭКОЛОГИЧЕСКОГО МОНИТОРИНГА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МУЛЬТИКОПТЕРА

Загрязнение окружающей среды является одной из наиболее актуальных глобальных экологических проблем современности. В связи с этим возрастает необходимость внедрения современных методов оперативного и непрерывного мониторинга качества атмосферного воздуха. Целью исследования является комплексный

анализ методов экологического мониторинга с использованием мультикоптеров и моделирование их эффективности.

Экспериментальные исследования, проведённые на территории города Алматы, включали оценку технических возможностей мультикоптеров, сенсорного оборудования, методов сбора и обработки данных, а также сравнительный анализ с традиционными стационарными мониторинговыми станциями.

В результате было собрано более 100 ГБ экологических данных, которые были обработаны с применением технологий Big Data и алгоритмов машинного обучения. Полученные результаты показали, что мультикоптеры обеспечивают сбор данных в 4 раза быстрее и позволяют повысить эффективность обработки информации примерно на 30 % по сравнению с традиционными методами. Установлено, что до 65 % загрязняющих веществ концентрируется на высоте 0–500 м, а прогнозирование качества воздуха возможно с точностью 80–90 %. Концентрации CO₂, NO₂, SO₂, PM_{2.5} и PM₁₀ были измерены с точностью ±5 %.

Основными ограничениями являются ограниченное время полёта (50–90 мин) и снижение устойчивости при сильном ветре. Тем не менее, результаты подтверждают высокую эффективность мультикоптеров в экологическом мониторинге и указывают на необходимость дальнейшего развития автономных режимов работы и интеллектуальных методов анализа данных.

Ключевые слова: мультикоптеры, дроны, большие данные (BigData), машинное обучение, моделирование.

K. Taissariyeva¹, A. Abdykadyrov², D. Nurpeissova³,

**G. Jobalayeva⁴, N. Bakhytkyzy⁵*

^{1,2,3,4,5}K. Satpayev Kazakh National Research Technical University,
Republic of Kazakhstan, Almaty.

Received 23.05.25.

Received in revised form 29.01.26.

Accepted for publication 29.05.26.

ANALYSIS AND MODELING OF ENVIRONMENTAL MONITORING USING MULTICOPTERS

Environmental pollution is one of the most pressing global ecological challenges of the modern world. In this context, the implementation of advanced methods for continuous and rapid air quality monitoring is of increasing importance. The objective of this study is to conduct a comprehensive analysis of environmental monitoring approaches based on the use of multicopters and to model their effectiveness.

Experimental studies carried out within the territory of Almaty city evaluated the technical capabilities of multicopters, sensor systems, data acquisition and processing techniques, as well as their advantages compared to conventional stationary monitoring stations.

As a result, more than 100 GB of environmental data were collected and analyzed using Big Data technologies and machine learning algorithms. The results demonstrate that multicopters enable data acquisition up to four times faster and improve data processing efficiency by approximately 30 % compared to traditional methods. It was found that about 65 % of air pollutants are concentrated within the altitude range of 0–500 m, while air quality can be predicted with an accuracy of 80–90 %.

Concentrations of CO₂, NO₂, SO₂, PM_{2.5}, and PM₁₀ were measured with an accuracy of ± 5 %. The main limitations include limited flight endurance (50–90 minutes) and reduced stability under strong wind conditions. Nevertheless, the findings confirm the high effectiveness of multicopters for environmental monitoring and highlight the need for further improvements in autonomous operation and artificial intelligence-based data analysis methods.

Keywords: multicopters, drones, Big Data, machine learning, modeling.

Теруге 09.06.2026 ж. жіберілді. Басуға 30.06.2026 ж. қол қойылды.

Электронды баспа

5,86 Mb RAM

Шартты баспа табағы 34,4. Таралымы 300 дана. Бағасы келісім бойынша.

Компьютерде беттеген: А. Б. Шукитова

Корректор: А. Р. Омарова, Д. А. Кожас

Тапсырыс № 4557

Сдано в набор 09.06.2026 г. Подписано в печать 30.06.2026 г.

Электронное издание

5,86 Mb RAM

Усл. печ. л. 34,4. Тираж 300 экз. Цена договорная.

Компьютерная верстка: А. Б. Шукитова

Корректор: А. Р. Омарова, Д. А. Кожас

Заказ № 4557

«Toraighyrov University» баспасынан басылып шығарылған

Торайғыров университеті

140008, Павлодар қ., Ломов к., 64, 137 каб.

«Toraighyrov University» баспасы

Торайғыров университеті

140008, Павлодар қ., Ломов к., 64, 137 каб.

67-36-69

E-mail: kereku@tou.edu.kz

www.vestnik-energy.tou.edu.kz