

## ДИСТАНЦИОННИ ИЗМЕРВАНИЯ НА АТМОСФЕРНИ ЗАМЪРСИТЕЛИ С БЕЗПИЛОТНИ ЛЕТАТЕЛНИ АПАРАТИ

Павлин Граматиков, Стефан Шопов

*Институт за космически изследвания и технологии – Българска академия на науките  
e-mail: pgramatikov@space.bas.bg; stephan.shopov@gmail.com*

**Ключови думи:** дистанционни измервания, атмосферни замърсители, безпилотни летателни апарати, бордни системи, мониторинг на околната среда

**Резюме:** Разгледани са видовете атмосферни замърсители, сензори и методи на тяхното измерване. Дадени са резултати от измервания на атмосферни замърсители, получени от системи, работещи на борда на спътник и безпилотни летателни апарати (БЛА), самолетен и мултикоптерен тип. Разглеждат се възможностите за приложение на БЛА в райони без изградени автоматични измервателни станции, при анализ на вертикалното разпределение на замърсителите. Обсъждат се предимствата на БЛА спрямо традиционните методи, свързани с мобилност, гъвкавост и висока пространствена и времева резолюция на данните. Получените резултати подчертават потенциала на БЛА да допълват съществуващите мониторингови мрежи и да осигуряват нови възможности за научни и приложни изследвания на качеството на въздуха.

## REMOTE MEASUREMENTS OF ATMOSPHERIC POLLUTANTS WITH UNMANNED AERIAL VEHICLES

Pavlin Gramatikov, Stefan Shopov

*Space Research and Technology Institute – Bulgarian Academy of Sciences  
e-mail: pgramatikov@space.bas.bg; stephan.shopov@gmail.com*

**Keywords:** remote sensing, atmospheric pollutants, unmanned aerial vehicles, onboard systems, environmental monitoring

**Abstract:** The types of atmospheric pollutants, sensors, and methods for their measurement are discussed. Results from measurements of atmospheric pollutants obtained from systems operating on board satellites and unmanned aerial vehicles (UAV), both aircraft and multicopter types, are presented. The possibilities for applying UAVs in areas without automatic measuring stations are examined in the analysis of the vertical distribution of pollutants. The advantages of UAV over traditional methods in terms of mobility, flexibility, and high spatial and temporal resolution of data are discussed. The results obtained highlight the potential of UAVs to complement existing monitoring networks and provide new opportunities for scientific and applied research on air quality.

### Въведение

Атмосферното замърсяване е резултат от разнообразни източници и включва широк спектър от замърсители: газове; твърди частици; биологични молекули; озон; тежки метали и радиоактивни изотопи. Тяхното въздействие варира от локални замърсявания до глобални ефекти върху климата и озоновия слой. Традиционните наземни методи за мониторинг са ограничени поради липса на мобилност и високи разходи, докато използването на безпилотни летателни апарати (БЛА) се очертава като ефективна алтернатива. В последните години БЛА се утвърждават като обещаващ инструмент за дистанционни измервания на атмосферни замърсители. БЛА могат да бъдат оборудвани с миниатюрни сензори за измерване на основни замърсители и измерват замърсявания по зададени маршрути. БЛА дават данни с висока пространствена и времева резолюция, които се анализират чрез географски информационни

системи (ГИС) и специализиран софтуер за създаване на карти на замърсяването и идентифициране на източници. Предимствата на БЛА включват мобилност, безопасност, икономическа ефективност, възможност за триизмерно картографиране и бърза реакция при аварийни ситуации. БЛА се прилагат за мониторинг на въздуха в градски и индустриални зони, откриване на течове, проследяване на пожари или вулканични изригвания, както и за научни изследвания. Съществуват предизвикателства при използване на БЛА, свързани с калибрирането на сензори, метеорологични условия, регулации и ограничения в продължителността на полета. БЛА е модерен и мощен инструмент, който усъвършенства методите за мониторинг и управление на качеството на атмосферния въздух.

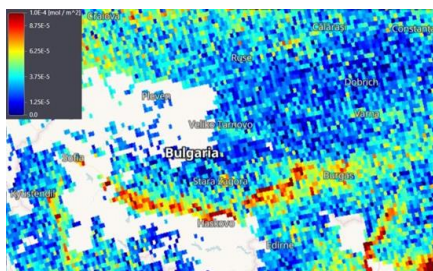
### Видове атмосферни замърсители и значение

Част от атмосферните замърсители са следните видове: газове – въглероден диоксид  $\text{CO}_2$ ; въглероден монооксид  $\text{CO}$ ; серен диоксид  $\text{SO}_2$ ; азотни оксиди  $\text{N}_2\text{O}$ ,  $\text{NO}$ ,  $\text{NO}_2$ ,  $\text{N}_2\text{O}_5$ ,  $\text{N}_2\text{O}_4$ ; метан  $\text{CH}_4$  и хлорфлуоровъглероди; частици – органични и неорганични; биологични молекули; озон  $\text{O}_3$  и олово  $\text{Pb}$ . При активно използване на изкопаеми енергоносители бързо се увеличава концентрацията на  $\text{CO}_2$  в атмосферата. След водната пара и  $\text{CO}_2$  метанът е третият по значение парников газ в атмосферата на Земята. Неговият принос към парниковия ефект е 4÷9%.

Въглеродният диоксид  $\text{CO}_2$  има дългосрочно въздействие върху климата в продължение на хиляди години, докато  $\text{CH}_4$  и азотният оксид  $\text{N}_2\text{O}$  имат кратък живот в свободно състояние.

Хлорфлуоровъглеродите са органични съединения, състоящи се от атоми на хлор (Cl), флуор (F) и въглерод (C). Различават се нисши хлорфлуоровъглероди (CFC) – нискокипящи органични съединения на базата на метанови, етанови и пропанови редове, както и висши хлорфлуоровъглероди, които са високомолекулни съединения. Разпространен представител е дифтордихлорметан (Фреон R12, Фреон-12, Хладон-12, CFC-12). Много хлорфлуоровъглероди се използват широко като хладилни агенти, в аерозолни системи и разтворители. Хлорфлуоровъглеродите допринасят за изчерпването на озоновия слой в горните слоеве на атмосферата и тяхното производство се преустановява.

Други видове атмосферни замърсители са: физически – механични (прах, твърди частици); радиоактивни (радиоактивно излъчване и изотопи); електромагнитни (различни видове електромагнитни вълни, включително радиовълни); акустични (различни силни звуци и нискочестотни колебания) и топлинни (изхвърляне на топъл въздух и др.); химически – газообразни вещества и аерозол; биологични – основното замърсяване е от микроби. Има замърсяване на въздуха с вегетативни форми, спори на бактерии и гъби, вируси, както и техните токсини и продукти на жизнената дейност. Основните химически замърсители на атмосферата са:  $\text{CO}$ ; азотни оксиди;  $\text{SO}_2$ ; въглеводороди; алдехиди; тежки метали (Pb, Cu, Zn, Cd, Cr); амониак; прах и радиоактивни изотопи. Изгарянето на каменни въглища, производството на цимент и топенето на чугун са основни източници на прах и черен въглерод (BC) в атмосферата.



Фиг. 1. Замърсяване с  $\text{NO}_2$  над магистралите в България [1]



Фиг. 2. Безпилотна летателна система MANTA C1 [3]

Директните измервания на атмосферните замърсители се извършват в една точка, а дистанционните методи предоставят данни за обемното съдържание на замърсители. Измерванията от спътници дават съдържанието на даден замърсител в цялата колона на атмосферата в дадена област [1]. Сателитът TROPOMI измерва в четири канала (UV, visible, NIR и SWIR) различни газови колони, както и свойства на облаци и аерозоли. Извличането на  $\text{NO}_2$  се извършва от видимата лента (400–496 nm), която има спектрална разделителна способност и дискретизация от 0,54 nm и 0,20 nm със съотношение сигнал/шум около 1500 [1]. Отделните наземни пиксели са 7,2 km по протежение и 3,6 km в напречните посоки в средата на участъка. Пълната ширина на ивицата е около 2600 km [1]. На Фиг. 1 е дадено увеличението на  $\text{NO}_2$  над големите райони над двете магистрала – Струма и Тракия [1].

## Технологии за измерване на атмосферни замърсители

Фотойонизационният детектор (PID), недисперсионният инфрачервен газов детектор (NDIR), електрохимичният сензор (ЕС) и сензорите за прахови частици (PM<sub>2,5</sub> и PM<sub>10</sub>) са част от технологии за откриване на различни газове и пари. Тези сензори се интегрират в преносими и стационарни системи за измерване на замърсители. PID сензорите се използват за откриване на летливи органични съединения (VOC) и други газове на нива от частици на милиард (ppb), с типична енергия на йонизация от 10,6 eV. За откриване на VOC се използват ултравиолетова (UV) светлина за йонизиране и газова хроматография (GC). Принцип на работа на PID:

1. Фотойонизация: Източник на UV светлина в сензора осветява анализирания газ.
2. Йонизиране на молекулите: UV светлината въздейства на молекулите на VOC, те губят електрони и се превръщат в положителни йони.
3. Откриване на йони: Генерираните положителни и отрицателни йони се събират от електроди в сензора и се измерва протичащият електрически ток.

NDIR измерва CO<sub>2</sub>, метан (CH<sub>4</sub>) и други газове, абсорбиращи инфрачервено лъчение и дава точни и стабилни показания във времето. Излъчва се инфрачервена светлина през проба от газ, като избраният газ абсорбира светлина на характерна дължина на вълната, което води до намаляване на преминаващата светлина. Измереното отслабване на светлината е пропорционално на концентрацията на газа в пробата. Принцип на работа на NDIR:

1. Източник на инфрачервена светлина: Широкоспектрален източник (например инфрачервена лампа или LED) излъчва светлина през газова камера.
2. Оптичен филтър: Филтърът пропуска само тази дължина на вълната, която е специфична за абсорбцията на газа, който трябва да бъде детектиран.
3. Газова камера: Газът преминава през камера, облъчен от инфрачервените вълни.
4. Детектор: Измерва количеството инфрачервена светлина, преминала през камерата.
5. Обработка на сигнала: Отслабването на преминаващата светлина е право пропорционално на концентрацията на газа и този сигнал определя количеството газ.

Терминът "недисперсионен" означава, че сензорът не използва дисперсионни елементи като призми или дифракционни решетки за разделяне на светлината на отделни спектрални компоненти, както правят други спектрометри. NDIR използва оптичен филтър за избиране само на необходимата дължина на вълната за измерване. NDIR сензорите са широко използвани за:

- Измерване на нивата на CO<sub>2</sub> във въздуха;
- Детекция на други газове като CH<sub>4</sub>, CO, хладилни агенти и други въглеводороди;
- Индустриална безопасност и околна среда.

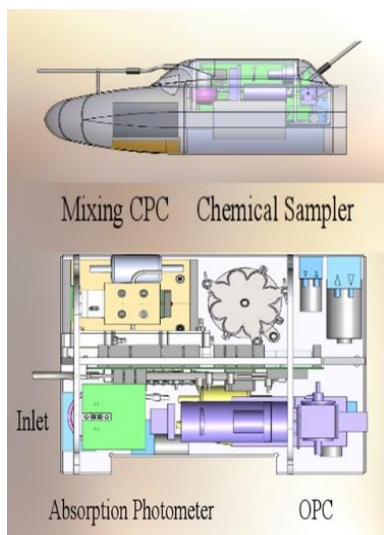
ЕС сензорите откриват специфични токсични газове като CO, сероводород (H<sub>2</sub>S), амоняк (NH<sub>3</sub>), NO<sub>2</sub> и SO<sub>2</sub> с висока чувствителност и селективност. ЕС откриват химични вещества чрез електрохимична реакция и измерват електрическия сигнал, получен от работен електрод, контраелектрод и електролит. Принцип на работа на ЕС:

- Дифузия: Веществото преминава през пореста мембрана към електрода на сензора.
- Електрохимична реакция: На работния електрод се получава каталитична реакция, при която измерваното вещество се окислява или редуцира.
- Генериране на ток: Тази окислително-редукционна реакция генерира електрически ток.
- Предаване на сигнал: Външна верига преобразува този ток в аналогов сигнал, като ток (амперометричен), напрежение (потенциометричен) или импеданс (импедиметричен).
- Противоелектрод: На противоелектрода се получава равна и противоположна реакция, за да се поддържа баланс на заряда, като кислородният сензор често се нуждае от кислород.

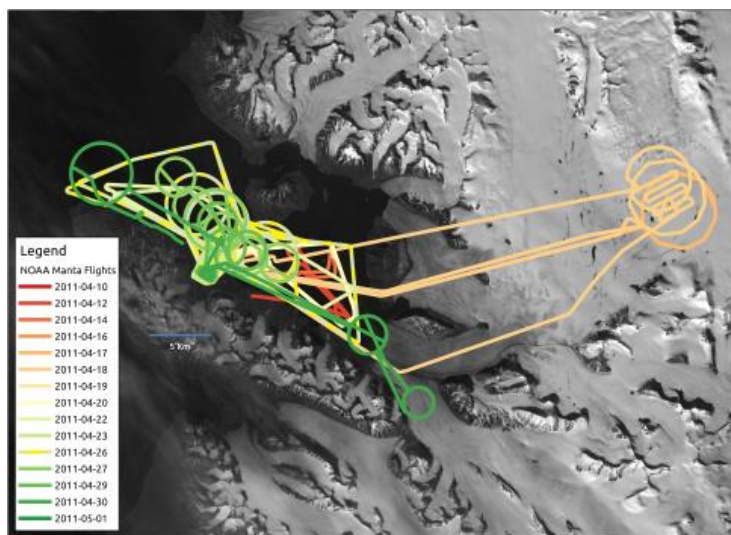
Сензорите PM използват лазерна технология за измерване, като се насочва лазерен лъч в камера за откриване, където въздухът се всмуква, обикновено чрез вентилатор. Когато въздушните частици преминават през лазерния лъч, те разсейват светлината му. Интензитетът на разсеяната светлина се преобразува в електрически сигнал от фотоелектричен сензор, който след това се усилва и после се обработва от микропроцесор. PM се ползват в преносими детектори за газ и стационарни системи за мониторинг и спазване на екологичните норми. PM се комбинират в мултисензорни инструменти за цялостен анализ на качеството на въздуха [6, 7].

### Изследвания на атмосферни замърсители с БЛА тип самолетен

MANTA C1 [3] е безпилотна летателна система (UAS) с фиксирано крило, проектирана и построена от Advanced Ceramics Research (Фиг. 2). Самолетът тежи 16,3 kg без полезен товар и гориво (27,7 kg максимално тегло). Размахът на крилата е 2,7 m, височината е 0,62 m и дължината е 1,92 m. Самолетът се задвижва от 3.8 kW бензинов двигател. Каца автоматично с помощта на DGPS и изисква < 300 m писта. Самолетът лети до 4,5 h максимално на 3660 m с резервоар за 8,1 литра гориво. Събирането на данни се извършва над 60 s, вертикалната разделителна способност е 75 m, а хоризонталната разделителна способност е 1560 m. Самолетът се управлява с автопилот, който навигира до 99 географски точки. Комуникацията с MANTA C1 е чрез ненасочена антена на 900 MHz. За далечна връзка се използва Iridium SatCom.



Фиг. 3. Модул за измерване на аерозоли в MANTA C1 [3]



Фиг. 4. Полетни траектории на MANTA през 2011 г. [3]

MANTA C1 е оборудван със сонда за температура и относителна влажност (RH), проектирана от Rotronic Instrument Corporation (модел HC2). Температурите се измерват между  $-40$  и  $60$  °C с точност до  $\pm 0.1$  °C. RH се измерва между  $0$ – $100$  % с точност от  $\pm 0,8$  %. Данните от сензорите за температура и RH се предават в реално време към наземния пункт.

Пакетът за измерване на аерозоли е проектиран и произведен от Brechtel Manufacturing Inc. (BMI, Хейуърд, Калифорния; ACCESS Модел 9400 <http://www.brechtel.com/ACCESS>) има модулен дизайн и може бързо да се монтира и демонтира от отделението за полезен товар на MANTA C1 (Фиг. 3), където има: смесител за вземане на проби от кондензирани частици (MCPC); 8-филтърна система за вземане на проби от химикали и абсорбционен фотометър (ABS). Модулът се захранва от една от двете батерии на самолета (15 Ah, 12 V всяка) по време на полета (до 4,5 h). Многоканалният пробоотборник има химически филтър. Аерозолният пакет включва пасивно изокинетичен вход за вкарване на въздух и частици в модула. Инструментите в модула включват MCPC (модифициран BMI, модел 1710 с обем  $12,7 \text{ cm}^3$ ) и абсорбционен фотометър с три дължини на вълната (BMI ABS,  $12,7 \times 7,6 \times 7,6 \text{ cm}$ ).

MCPC има време за реакция 180 ms и брой частици с размер  $5$ – $3000 \text{ nm}$ . Модификацирани са компонентите на модела 1710 за работа с бутанол поради високовибрационната среда на UAS. Концентрацията на MCPC се характеризира с вземане на проби от  $60 \text{ nm}$  частици. Електрометърът (Ionex Model 5030) взема проби паралелно с MCPC и осигурява референтно измерване на концентрацията в диапазона  $100$ – $100000 \text{ частици cm}^{-3}$ .

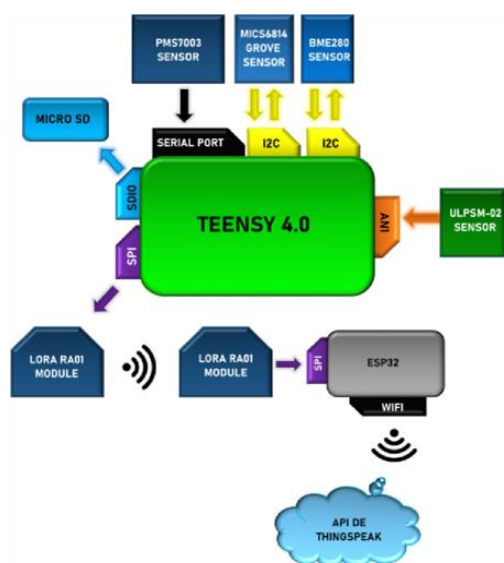
ABS осигурява измервания в реално време на коефициента на поглъщане на аерозолна светлина при  $450 \text{ nm}$ ,  $525 \text{ nm}$  и  $624 \text{ nm}$ . ABS пропуска светлина от LED източник през проба. Пробоотборникът се побира в цилиндричен обем с диаметър  $7,6 \text{ cm}$  и  $5,1 \text{ cm}$  дължина. Дебитът на пробата от  $2,5 \text{ L/min}^{-1}$  се измерва чрез спад на налягането през ламинарен проточен елемент (LFE) и потокът се контролира активно с интегрирана помпа. Филтрите могат да бъдат извлечени с вода или други разтворители за наземен химичен анализ чрез йонна хроматография или други техники. Типичният план на полета е изкачване до  $2700 \text{ m}$ , спускане до височината с максимална концентрация на аерозол и след това вземане на проби на тази височина за останалата част от полета (обикновено  $1$ – $2 \text{ h}$ ). Полет номер 15 над Kongsfjorden на

26 април дава граничен слой  $\approx 1000$  m, ограничен от малка температурна инверсия. Долният слой има относителна влажност между 70% и 80%. Относителната влажност спада над граничния слой до 15% на 1500 m и след това се увеличава до 40% на 2200 m. Има малко увеличаване на общия брой частици точно под горната част на граничния слой, но не и увеличаване на коефициента на поглъщане на аерозолна светлина от тези частици. Горният слой ( $> 1700$  m) има най-високи концентрации на брой частици и най-високи коефициенти на поглъщане на аерозолна светлина [3].

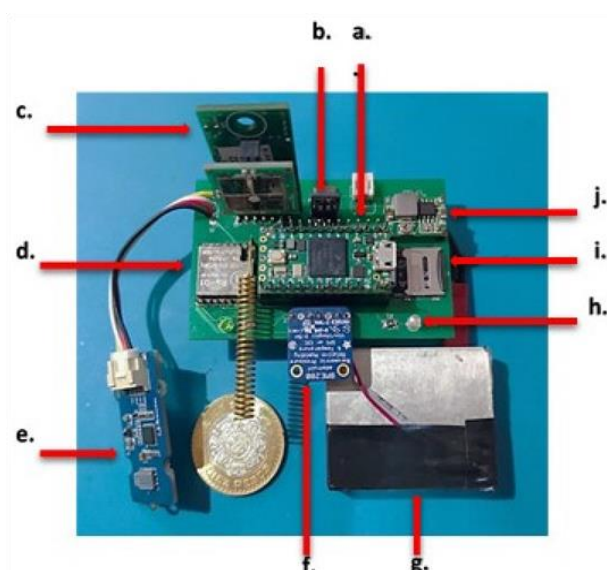
БЛА оперативно са по-гъвкави в сравнение с наземните подходи на измерване или други въздушни методи, като пилотирани самолети и сателити. БЛА "M2AV" осигурява 10 cm вертикална разделителна способност за температура, влажност, посока и скорост на вятъра [2]. БЛА ALADINA изследва 3D разпределението на ултрафините частици (UFP) в ABL и има два брояча на кондензационни частици (CPC) и оптичен брояч на частици (OPC) [2].

### Изследвания на атмосферни замърсители с БЛА тип мултикоптер

В атмосферата преобладава замърсител, наричан прахови частици (PM). PM се състои от малки частици и миниатюрни течни капчици [4]. PM имат две основни групи: груби с аеродинамичен еквивалентен диаметър (AED)  $2,5\text{--}10\text{ }\mu\text{m}$  и фини с  $\text{AED} < 2,5\text{ }\mu\text{m}$ .



Фиг. 5. Архитектура на интелигентен мултисензорен възел BME280 MICS-6814 [5]



Фиг. 6. Платки и устройства за интелигентния мултисензорен възел BME280 MICS-6814 [5]

UFP имат диаметър  $< 0,1\text{ }\mu\text{m}$  и са заплаха за човешкото здраве. UFP навлизат дълбоко в дихателната система и причиняват здравословни проблеми. Частиците BC се получават при непълно изгаряне на богати на въглерод горива, като дизел и биомаса.

На Фиг. 5 е дадена архитектура на интелигентен мултисензорен възел, използван при измервания с мултикоптер Mavic 3 [5]. Системата се състои от 4 елемента: интелигентен мултисензор (сензорен възел); мобилна батерия; безжичен комуникационен модул LoRa (шлюз) и данни за визуализация и обработка (базова станция). Управлението е базирано на платката Beagle Bone Black (BBB) AM335x, а WSN е имплементиран с LoRa NET. LoRaWAN е използван за безжични комуникации. За управление е използван едноплатков компютър SBC Raspberry. Платформите за управление, мобилната батерия и сензорите увеличават теглото до 1 kg. Измерват се концентрациите  $\text{CO}$ ,  $\text{NO}_2$ ,  $\text{SO}_2$ ,  $\text{NH}_3$  и суспендирани частици  $\text{PM}_{10}$  и  $\text{PM}_{2,5}$ , както и температура, влажност и налягане. Сензор BME280 (Bosh Sensortec GmbH) е интегриран за измерване на температура, относителна влажност, надморска височина и атмосферно налягане с разделителна способност 0,01. Сензор MEMS Multichannel Gas Sensor MICS-6814 (SGX Sensortech) измерва:  $\text{CO}$  1–1000 ppm;  $\text{NO}_2$  0,05–10 ppm;  $\text{NH}_3$  1–500 ppm.

MICS-6814 може да измерва  $\text{H}_2$ ,  $\text{CH}_4$ , пропан, етанол и изо-бутан. Сензорът ULPSM-SO<sub>2</sub> (SPEC Sensors) измерва  $\text{SO}_2$  в диапазон 0–20 ppm с разделителна способност  $1,5\text{ }\mu\text{m}$  и точност  $\pm 2\%$ . На Фиг. 6 са представени печатни платки и устройствата на интелигентен мултисензорен възел: а) микроконтролер; б) регулатор 3.3 V; в)  $\text{SO}_2$  газов сензор; г) LoRa WAN; д) сензор за множество газове; е) метеорологичен сензор; ж) сензор за прахови частици; з) светодиодни индикатори; и) MicroSD; й) регулатор на напрежението.

За откриване на частици във въздуха в сензора се използва лазер, а фотодиод измерва количеството разсеяна светлина. Сензорът *Nova SDS011* има вграден вентилатор, позволяващ вземане на проби от въздуха в реално време. Освен това сензорите *Nova SDS012* и *Plantower PMS5003* са ценни алтернативи за измерване на атмосферния прах, въпреки недостатъците си от трудно калибриране [4]. За осигуряване на точни данни за позициониране БЛА има GPS модул с висока честота на актуализиране и вграден компас. Модулите *Holybro Ublox M8N-GPS* имат съвместимост с автопилота и дават надеждни и точни данни за позициониране. Тези модули поддържат проследяване на GPS и ГЛОНАСС сателити. Избира се компактен лек телеметричен радиокомплект, проектиран за използване с автопилотни полетни контролери [4].

#### **Измерването на атмосферни замърсители с БЛА включва [5]:**

1. Сензори: БЛА се оборудват с миниатюрни сензори за фини прахови частици (PM<sub>2,5</sub> и PM<sub>10</sub>); азотни оксиди NO<sub>x</sub>; SO<sub>2</sub>; O<sub>3</sub>; CO; VOC и CH<sub>4</sub>.
2. Полетни планове: Задава се маршрут на БЛА, който обхваща зони с източници на замърсяване, градски райони, индустриални зони или земеделски площи. Налични са няколко инструмента за планиране на полета като DroneDeploy, Pix4D или DJI Ground Station Pro.
3. Събиране на данни: По зададения маршрут сензорите непрекъснато измерват замърсителите във въздуха. Данните се записват с информация за GPS координати, надморска височина, температура и влажност.
4. Предаване и анализ: Данните се предават в реално време към наземна станция или се записват на борда за последващ анализ. Софтуер за ГИС и специализирани програми визуализират данните, създават карти на замърсяването и идентифицират горещи точки.

#### **Предимства на измерването на атмосферни замърсители с БЛА:**

- \* Гъвкавост и мобилност: БЛА достигат труднодостъпни райони, индустриални инсталации, високи комини, големи градски площи, а наземните станции измерват локално само.
- \* Висока пространствена и времева резолюция: БЛА събират данни на много места за кратко време, осигурявайки детайлна картина на разпространението на замърсяването.
- \* Икономична ефективност: В дългосрочен план измерванията с БЛА са по-евтино решение от разполагането и поддръжката на голям брой стационарни наземни станции.
- \* Безопасност: Не са застрашени хора при измервания в рискови зони, а БЛА.
- \* 3D картографиране: Позволява измервания на различни височини, което дава представа за вертикалното разпределение на замърсителите.
- \* Идентифициране на източници: Помага за по-точното локализиране на източниците на замърсяване, което е ключово при ефективни мерки за контрол.
- \* Бърза реакция: БЛА могат да бъдат бързо разгърнати при инциденти, като промишлени аварии или разливи на опасни вещества.

#### **Приложения на измерването на атмосферни замърсители с БЛА:**

- \* Мониторинг на качеството на въздуха в градски и индустриални зони.
- \* Откриване на течове на газ от газопроводи и промишлени съоръжения.
- \* Оценка на разпространението на замърсители от горски пожари или вулканични изригвания.
- \* Научни изследвания на атмосферни процеси и климатични промени.
- \* Контрол на емисиите от селскостопански дейности.

#### **Предизвикателства при измерването на атмосферни замърсители с БЛА:**

- \* Калибриране на сензорите: Миниатюрните сензори могат да изискват по-често калибриране и да имат по-ниска прецизност от наземните лабораторните уреди.
- \* Метеорологични условия: Вятър, дъжд и екстремни температури спират полетите на БЛА.
- \* Регулации: Нужни са разрешения за полети в определени зони.
- \* Автономност на батерията: Времето за полет е ограничено от заряда на батерията.

Въпреки предизвикателствата, дистанционните измервания на атмосферни замърсители с БЛА представляват перспективна и развиваща се технология, която значително подобрява възможностите за мониторинг и управление на качеството на въздуха.

## Литература:

1. Dimitrova, Maria, and Plamen Trenchev. "Space distribution of NO<sub>2</sub> pollution over Bulgaria." *Aerospace Research in Bulgaria* 35 (2023): ISSN:1313-0927, pp. 28–33  
<https://doi.org/10.3897/arb.v35.e03>  
[http://journal.space.bas.bg/arhiv/n%2035/Articles/3\\_Dimitrova.pdf](http://journal.space.bas.bg/arhiv/n%2035/Articles/3_Dimitrova.pdf)
2. Villa, T. F., Gonzalez, F., Miljevic, B., Ristovski, Z. D., & Morawska, L. An overview of small unmanned aerial vehicles for air quality measurements: Present applications and future perspectives. *Sensors*, 16(7), 1072, (2016). ISSN:1424-8220, pp. 1–19  
<https://doi.org/10.3390/s16071072>  
<https://www.mdpi.com/1424-8220/16/7/1072/pdf?version=1468322670>
3. Bates, T. S., Quinn, P. K., Johnson, J. E., Corless, A., Brechtel, F. J., Stalin, S. E., & Burkhardt, J. F. (2013). Measurements of atmospheric aerosol vertical distributions above Svalbard, Norway, using unmanned aerial systems (UAS). *Atmospheric Measurement Techniques*, 6(8), ISSN:1867-8548, 2115-2120, pp. 1–29  
<https://doi.org/10.5194/amt-6-2115-2013>  
<https://amt.copernicus.org/articles/6/2115/2013/amt-6-2115-2013.pdf>
4. Bakirci, Murat. "Efficient air pollution mapping in extensive regions with fully autonomous unmanned aerial vehicles: A numerical perspective." *Science of the Total Environment* 909 (2024): 168606, ISSN: 1879-1026, pp. 1–16  
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.168606>  
[https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0048969723072340/pdf?casa\\_token=W\\_LDUi\\_il1sAAAA:s49dHvw49LNQlo9n37vMa1rVgqwmAhMePTTskUysiVtDu1nZEXdnkd8lJLSAKo36fiSRPBXQgs&md5=c5dae8aad45a50078090a3b88773f992&pid=1-s2.0-S0048969723072340-main.pdf](https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0048969723072340/pdf?casa_token=W_LDUi_il1sAAAA:s49dHvw49LNQlo9n37vMa1rVgqwmAhMePTTskUysiVtDu1nZEXdnkd8lJLSAKo36fiSRPBXQgs&md5=c5dae8aad45a50078090a3b88773f992&pid=1-s2.0-S0048969723072340-main.pdf)
5. Camarillo-Escobedo, R., Flores, J. L., Marin-Montoya, P., García-Torales, G., & Camarillo-Escobedo, J. M. (2022). Smart multi-sensor system for remote air quality monitoring using unmanned aerial vehicle and LoRaWAN. *Sensors*, 22(5), 1706., ISSN: 1879-1026, pp. 1–29  
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.168606>  
<https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0048969723072340/pdf?casa-main.pdf>
6. Наредба №1, 27 юни 2005 г., Норми за допустими емисии на вредни вещества (замърсители), изпускани в атмосферата от обекти и дейности с неподвижни източници на емисии - в сила от 06.08.2006 г.
7. Закон за чистотата на атмосферния въздух – посл. изм. ДВ. бр. 41 от 10 Май 2024 г.