



АВТОМАТТАНДЫРУ ЖӘНЕ БАСҚАРУ
АВТОМАТИЗАЦИЯ И УПРАВЛЕНИЕ
AUTOMATION AND CONTROL

DOI 10.51885/1561-4212_2021_4_109
MPHTI 59.14.21

Д.Н. Титов

Сибирский государственный университет геосистем и технологий, г. Новосибирск, Россия
E-mail: titov200708@mail.ru*

ИНФОРМАЦИОННО-ИЗМЕРИТЕЛЬНАЯ СИСТЕМА МОНИТОРИНГА ЧРЕЗВЫЧАЙНЫХ СИТУАЦИЙ НА ОСНОВЕ БЕСПИЛОТНОГО ЛЕТАТЕЛЬНОГО АППАРАТА

ҰШҚЫШСЫЗ ҰШУ АППАРАТЫ НЕГІЗІНДЕ ТӨТЕНШЕ ЖАҒДАЙЛАР МОНИТОРИНГІНІҢ АҚПАРАТТЫҚ-ӨЛШЕУ ЖҮЙЕСІ

INFORMATION-MEASURING SYSTEM FOR MONITORING EMERGENCIES BASED ON UNMANNED AIRCRAFT

Аннотация. В статье представлена информационно-измерительная система для мониторинга концентрации газов атмосферного воздуха урбанизированных территорий на основе беспилотного летательного аппарата мультироторного типа. Разработан опытный образец дополнительного модуля беспилотного летательного аппарата, осуществляющего сбор данных о качестве воздушной среды с одновременной привязкой к координатам местности. Приведены результаты натурных испытаний системы в двух режимах: с использованием автотранспортного средства и беспилотного летательного аппарата. Результаты показали возможность использовать систему в реальных условиях эксплуатации.

Ключевые слова: беспилотный летательный аппарат, информационно-измерительная система, датчик газоанализатора, микроконтроллер.

Аңдатпа. Ұшқышсыз ұшу аппараты негізінде төтенше жағдайлар мониторингінің ақпараттық-өлшеу жүйесі. Мақалада мультироторлы типті пилотсыз ұшу аппараты негізінде урбанизация аумақтарындағы атмосфералық ауа газдарының шоғырлануын мониторингтеуге арналған ақпараттық-өлшеу жүйесі ұсынылған. Жергілікті жердің координаттарына байланыстыра отырып, ауа ортасының сапасы туралы деректерді жинауды жүзеге асыратын пилотсыз ұшу аппаратының қосымша модулінің тәжірибелік үлгісі әзірленді. Автокөлік құралы мен пилотсыз ұшу аппаратын пайдалана отырып, жүйені заттай сынаудың нәтижелері екі режимде келтірілген. Нәтижелер жүйені нақты жұмыс жағдайында пайдалану мүмкіндігін көрсетті.

Түйін сөздер: ұшқышсыз ұшу аппараты, ақпараттық-өлшеу жүйесі, газталдағыш датчигі, микроконтроллер.

Abstract. The article presents an information-measuring system for monitoring the concentration of gases in atmospheric air in urbanized areas based on a multi-rotor unmanned aerial vehicle. A prototype of an additional module for an unmanned aerial vehicle has been developed, which collects data on the quality of the air environment with simultaneous binding to the coordinates of the terrain. The results of field tests of the data collection system with reference to the terrain in two modes are presented - using a motor vehicle and an unmanned aerial vehicle. The results showed the possibility of using the system in real operating conditions.

Keywords: unmanned aerial vehicle, information-measuring system, gas analyzer sensor, microcontroller.

Введение. В эпоху четвертой промышленной революции и реализации программы индустриализации в Казахстане главой государства поставлена задача перейти к инновационной направленности индустриализации. Выделено, что основным фактором должно стать внедрение элементов четвертой промышленной революции: автоматизации, роботизации, искусственного интеллекта, обмена «большими данными» и других [1].

Роботизированные системы используются во всех отраслях экономики, а также вошли в нашу повседневную жизнь. Классификация и видовой состав их очень разнообразен. Воздушные мобильные роботизированные системы изначально стали применяться в военных целях. Развитие микроэлектроники, нанотехнологий и информационно-вычислительных технологий привели к разработке совершенно нового класса воздушных роботов – беспилотных летательных аппаратов (БПЛА). Наибольшей популярностью пользуются малые летательные аппараты мультироторного типа [2-6]. Технические и конструктивные преимущества, возможность автоматического или дистанционного управления, невысокая стоимость по сравнению с обычным воздушным судном, простота в эксплуатации – все это повлияли на широкое применение мультироторов в различных отраслях экономики.

На сегодняшний день БПЛА мультироторного типа стали широко применяться в различных службах спасения и по предотвращению чрезвычайных ситуаций. Преимущества дронов позволяют осуществлять мониторинг, контроль и предотвращение чрезвычайных ситуаций природного и техногенного характера. В некоторых случаях используются не только для предупреждения, но для ликвидации возникших чрезвычайных ситуаций. Например, в настоящее время беспилотники используются для дезинфекции городских улиц и внутри крупных объектов от COVID-19.

Восточный регион Казахстана является крупнейшим центром по содержанию сырьевой базы. На территории области располагается большое количество горнодобывающих и обрабатывающих предприятий. Областной центр включает немало крупнейших предприятий обрабатывающей промышленности, металлургии и машиностроения. Расположение таких объектов внутри города приводит к необходимости постоянного мониторинга окружающей среды (воздух, вода, почва) и проведению контрольно-надзорных мероприятий. В настоящее время такие мероприятия в городе и области осуществляются при помощи летательных аппаратов винтокрылого типа (вертолета) и со стационарных пунктов. Применение БПЛА мультироторного типа позволит дополнительно усилить работу соответствующих служб, повысить эффективность реагирования на возникновение чрезвычайных ситуаций. Поэтому выбранная тематика исследования является актуальной.

Материалы и методы исследования. Применение БПЛА позволяет дистанционно, без участия человека и без подвергания его опасности, проводить мониторинг ситуации на достаточно больших территориях в труднодоступных районах. К достоинствам использования БПЛА, по сравнению с пилотируемой техникой, можно отнести: уменьшение стоимости производства работ и меньшее количество регламентных операций; отсутствие необходимости в высококвалифицированной технической помощи при обслуживании; обеспечение безопасности на объекте работ, а в случае использования беспилотника многократного действия – значительный срок эксплуатации беспилотника. Существующие недостатки связаны с невозможностью осуществлять дальние перелеты из-за низкой зарядки аккумуляторов, а также с малой грузоподъемностью дронов.

В зависимости от назначения и области применения, беспилотный летательный аппа-

рат может оснащаться различной технической аппаратурой, включающей в себя всевозможные датчики, камеры, различные средства фиксации, получения и передачи необходимой информации. Для эффективного решения задач мониторинга природных и техногенных объектов требуются недорогие и простые в использовании аппараты воздушного наблюдения мультироторного типа – дроны.

Дроны активно внедряются и уже активно применяются на практике в службах ликвидации чрезвычайных ситуаций (ЧС). Ценность их использования заключается, прежде всего, в экономии времени и ресурсов. В случае ЧС, когда счет идет на минуты, если не на секунды, особенно важно своевременное получение актуальных данных о происшествии. Информирование даёт возможность оперативно и эффективно реагировать на обстановку, сокращая людские потери и приносимый экономический ущерб.

Задачи применения беспилотных летательных аппаратов в ЧС можно разделить на четыре основные группы: обнаружение чрезвычайной ситуации, участие в ее ликвидации, поиск и спасение пострадавших и оценка ущерба [2].

Задача обнаружения ЧС является одной из самых важных и заключается в том, чтобы достоверно установить факт ЧС и оперативно передать соответствующие координаты. Как правило, мониторинг территорий инициируется в местах с высокой вероятностью возникновения различных аварий и катастроф. Полученная информация может обрабатываться в режиме реального времени, передаваясь по каналам связи на пункт управления, или анализироваться по возвращении беспилотника. Все это позволит своевременно оценить текущую ситуацию и значительно сократить жертвы и масштабы обнаруженных ЧС. Несомненным преимуществом БПЛА является то, что можно обследовать зоны радиоактивного, химического и биологического заражения без риска для здоровья или жизни людей. Для оценки заражения на беспилотных аппаратах используются специализированные дозиметры. Беспилотники также применяют для мониторинга промышленных и природных объектов, действия которых могут привести к чрезвычайной ситуации. Проведя анализ существующих на настоящее время мобильных систем сбора данных с использованием дронов, не было выявлено «гибких» систем [7-13]. Под «гибкими» системами понимается возможность быстрой замены датчика с одного типа на другой без глобального вмешательства в программное обеспечение системы и ее технологическую конструкцию. Можно отметить обзорные статьи [14,15].

Основная идея данной работы заключается в использовании квадрокоптера для проведения замеров параметров газа/дыма на местности с привязкой к координатам. Структурная схема разработанной информационно-измерительной системы приведена на рис. 1.

Проведение исследований осуществлялось на базе квадрокоптера Phantom 3, который является моделью третьего поколения квадрокоптеров от компании DJI [16]. Квадрокоптеры Phantom имеют обширные программные возможности и разные режимы полета. В разработке дронов такого типа закладывалась возможность полета на дальнее расстояние и способность управления за пределами видимости. Управление квадрокоптером за пределами видимости возможно с помощью использования встроенной камеры, которая имеет функцию потоковой передачи видео на смартфон. Предусмотрена автоматическая подвеска для камеры, которая использует амортизаторы. Данная конструкция подвески позволяет производить фото/видео съемку негилируя часть помех, вызванных вибрацией при полёте дрона.

Максимальная скорость, которую может развивать квадрокоптер в горизонтальной плоскости, составляет 16 м/с – одно из самых больших значений в данной ценовой кате-

гории. Скорость по вертикальной плоскости составляет 3-5 м/с. Настройка сети передачи данных для связи с квадрокоптером по технологии Wi-Fi создается с помощью приложения DJIGO. Питание квадрокоптера осуществляется от съемных литий-полимерных батарей. Несмотря на достаточно большую емкость одной батареи (68 Втч), следует учитывать, что квадрокоптер оснащен мощным мотором, поэтому лётное время дрона на одном заряде батареи не превышает 23 минут.

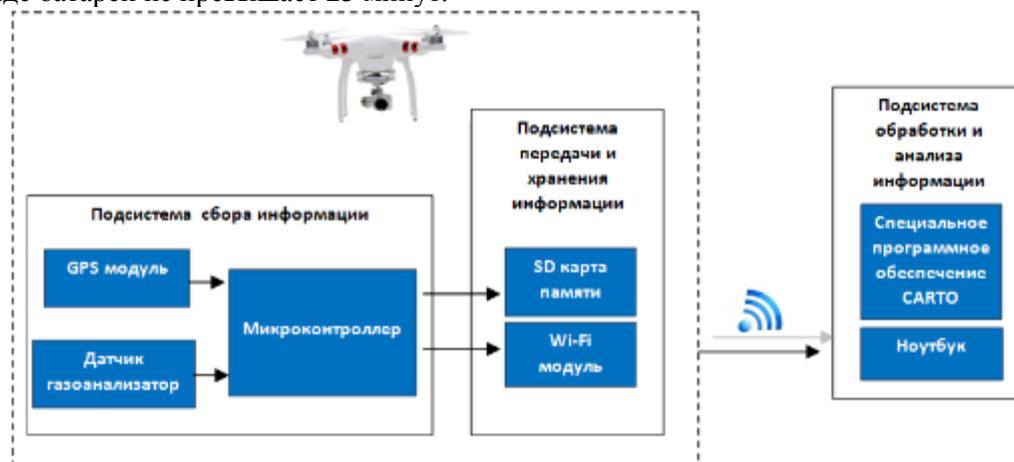


Рисунок 1. Структурная схема мобильной информационно-измерительной системы мониторинга концентрации газов атмосферного воздуха

При подборе датчика рассматривались следующие характеристики: габаритные размеры, вес, возможность подключения к микроконтроллеру напрямую, без дополнительного оборудования, чувствительность. Проведя сравнительный анализ, выбран датчик газа MQ-2 [17, 18]. Датчик позволяет обнаружить наличие в окружающем воздухе углеводородных газов, таких как пропан, метан, н-бутан, а также дыма и водорода. Датчик возможно применять для обнаружения утечек промышленного газа и задымления. Выходным результатом данного датчика является аналоговый сигнал, он пропорционален содержанию газов, которые может улавливать газоанализатор. Предусмотрена возможность настройки чувствительности путём регулирования переменного сопротивления, которое располагается на плате самого датчика.

Вместо использования газового датчика, можно применять и другие типы датчиков для замера различных физических величин, например: счетчик гейгера, магнетромтр и т.д. Но в данном случае был выбран датчик газа/дыма.

При выборе GPS-модуля учитывались следующие характеристики: габаритные размеры, вес, совместимость подключения к микроконтроллеру, точность измерения, потребляемая мощность.

Основываясь на требованиях, нами был выбран GPS-модуль u-bloxNEO-6M. Модуль GPS представляет из себя компактную плату, на которой расположены модуль NEO-6M-0-001, стабилизатор напряжения 3.3В, EEPROM память, аккумулятор и индикаторный светодиод. Модуль поставляется в комплекте вместе с активной антенной квадратной формы. Как и все GPS приемники, для осуществления передачи данных модуль использует популярный интерфейс UART. Модуль Neo-6M умеет использовать SBAS (спутниковые системы дифференциальной коррекции) для улучшения точности определения местоположения до 2 м, а также AGPS для уменьшения времени так называемого холодного старта. Получе-

ние данных AGPS происходит с сайта u-blox с помощью сервисов AssistNowOnline и AssistNowOffline. Модуль обладает поддержкой протоколов NMEA, UBX и RTCM. UBX – проприетарный протокол от u-blox, а RTCM – протокол для передачи модулю данных о дифференциальной коррекции DGPS. Также для связи доступны интерфейсы UART, I2C, SPI и USB, что облегчает его сопряжение с микроконтроллером [19].

Связь с GPS приемником реализована с помощью протокола NMEA 0183. Протокол NMEA 0183 включает в себя достаточно широкую базу сообщений и команд. Выбранный нами модуль достаточно быстро находит спутники, около 1 минуты при холодном старте.

Для обработки данных в подсистеме сбора информации основным элементом является микроконтроллер. Отладочная плата Arduino Uno предоставляет ряд возможностей для осуществления связи с компьютером или же с другими микроконтроллерами через подсистему передачи и хранения информации. Отладочная плата базируется на микроконтроллере ATmega328. В корпусе ATmega328 есть приемопередатчик UART, который может осуществлять последовательную связь посредством цифровых выводов [20].

Собственное устройство будет монтироваться на квадрокоптер, и понимание реального размера и веса готового устройства очень важно. Длина и ширина печатной платы Arduino UNO R3 с учетом разъема USB и разъема питания составляют 6,9 см и 5,4 см соответственно. Отладочная плата оснащена крепежными отверстиями, которые позволяют прикреплять плату к поверхности или корпусу.

В разрабатываемой системе также стоит задача обеспечить запись данных. В большей части микроконтроллеров встроенная память достаточно ограничена. Для примера, чип на ArduinoMega (Atmega2560) имеет всего лишь 4 Кбайта EEPROM для хранения данных. Флеш-памяти гораздо больше – 256 Кбайт, но при ее использовании могут возникнуть проблемы с записью. Основной проблемой является то, что можно нечаянно перезаписать саму программу, загруженную на плату. Если требуется загружать файлы больших размеров, можно использовать карты памяти. Карты памяти позволяют хранить большие объемы информации. Кроме того, на большей части компьютеров имеются кард-ридеры, поэтому с передачей полученной информации не возникнет никаких проблем.

Карты памяти рассчитаны на питание 3.3 В. При записи данных на карту памяти, сила тока может достигать значений до 120 мА и даже больше. Из этого следует, что необходимо обеспечить качественное питание для карты памяти. Кроме этого, необходимо иметь источник питания 3.3 В для питания логики.

Есть два режима передачи данных – это SPI и SDIO. Режим передачи данных SDIO работает гораздо быстрее, но реализация его при работе с Arduino достаточно сложна. SPI настроить гораздо проще при работе с большей частью микроконтроллеров. При подключении режима SPI требуется всего четыре пина.

Для беспроводной передачи данных в подсистему обработки и анализа информации необходимо подключение Wi-Fi модуля к микроконтроллеру.

Алгоритм работы мобильной информационно-измерительной системы мониторинга концентрации газов атмосферного воздуха достаточно простой: микроконтроллер через заданные промежутки времени опрашивает датчик газоанализатор и GPS-модуль, далее все данные записываются на SD-карту или передаются по Wi-Fi модулю.

Для системы было разработано два варианта исполнения программного кода, а именно:

– запись данных на карту памяти производится только тогда, когда GPS-модуль под-

ключился к спутникам;

– запись данных на карту памяти производится сразу, то есть отсутствует необходимость ждать подключения GPS-модуля к спутникам.

Для второго варианта, данные с датчика MQ-2 записываются сразу на карту SD, но с нулевыми GPS-координатами. Как только GPS-модуль подключается к спутникам, происходит запись реальных координат местонахождения модуля.

Алгоритм работы программного обеспечения (рис. 2) следующий:

– для работы всех подключенных к микроконтроллеру элементов требуется подключение библиотек;

– обозначение типа используемых переменных;

– проверка подключения модуля карты памяти, если модуль подключен, переходим дальше, иначе возвращаем сообщение об ошибке;

– создаем и записываем на SD карту файл «data.txt», если не получается, возвращаем сообщение об ошибке;

– обозначаем таймер, задаем значения времени в миллисекундах;

– по истечении времени таймера, таймер перезапускается;

– по запуску таймера, происходит опрос переменных, а именно датчика и GPS-модуля;

– данные записываются на карту памяти SD;

– для остановки выполнения программы отключаем питание.

Программное обеспечение разработано с использованием языка программирования C++.

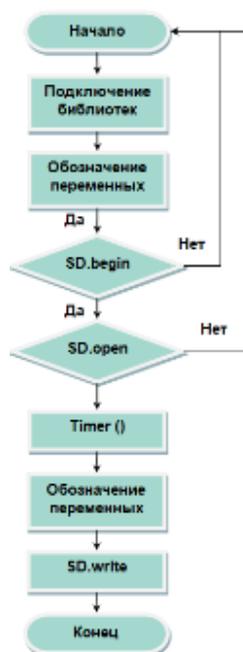


Рисунок 2. Алгоритм работы программного обеспечения

Для преобразования данных о местоположении нами используется платформа CARTO [21]. Редактор CARTO – удобная приборная панель, которая позволяет управлять наборами данных и применять расширенные функции стилизации к визуализации карты. Предусмотрена возможность загружать свой набор данных, используя любой из поддер-

живаемых форматов геопространственных данных, подключиться к общедоступному набору данных из библиотеки данных или создать пустой набор данных.

Результаты и их обсуждения. Для первичной проверки система мониторинга концентрации газов атмосферного воздуха была расположена на автотранспортном средстве. GPS-модуль и датчик-газоанализатор MQ-2 разместили на крыше автотранспортного средства. Для проверки работоспособности системы предусмотрена возможность просматривать в режиме реального времени данные с датчика-газоанализатора и модуля GPS. Средняя скорость движения автомобиля – 55 км/ч, данные с датчика и GPS-модуля записывались с промежутком в 3000 мс.

Полученные данные, а именно концентрация водорода (взвешенные частицы, являющиеся результатом горения) в условных единицах, и данные геолокации (широта и долгота) были обработаны и проанализированы. На основе полученных данных с привязкой к местности была проведена визуализация при помощи программного обеспечения CARTO, в результате получилось выделить зоны с близкой концентрацией. Для более наглядной визуализации, было решено разделить диапазон концентрации водорода от 15 до 161 на 5 частей и выделить каждую часть своим цветом. Минимальная концентрация выделена зеленым цветом, а максимальная – красным. Результаты приведены на рис. 3.

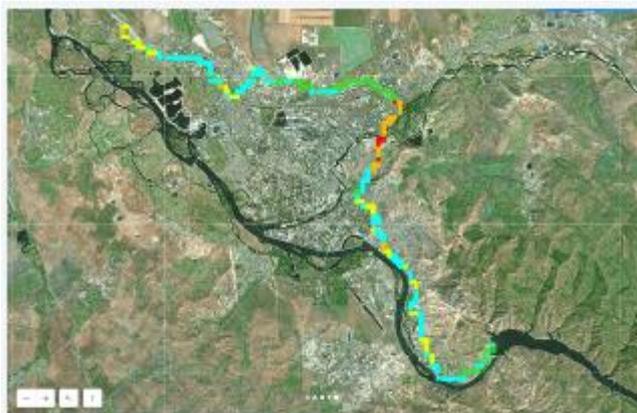


Рисунок 3. Наглядная визуализация концентрации водорода на местности

После апробации системы на автотранспортном средстве проводились измерения с использованием дрона.

На квадрокоптере DJI Phantom было закреплено и подключено к питанию разработанное устройство подсистемы сбора данных. Замеры проводились днем в солнечный день. Площадь полетной территории примерно 4747 метров квадратных. Данные с датчика и GPS-модуля записывались с промежутком в 3000 мс. Полученные данные, а именно концентрация водорода в условных единицах, и данные геолокации (широта и долгота) были обработаны и проанализированы. На основе полученных данных с привязкой к местности была проведена визуализация при помощи программного обеспечения CARTO, в результате получилось выделить зоны с близкой концентрацией (рис. 4-6).



Рисунок 4. Участки с содержанием водорода от 16 до 40.1 (усл.ед)



Рисунок 5. Участки с содержанием водорода от 40.4 до 64.1 (усл.ед)



Рисунок 6. Участки с содержанием водорода от 64.4 до 90 (усл.ед)

Для более наглядной визуализации было решено разделить диапазон концентрации водорода от 16 до 90 на 3 части и выделить каждую часть своим цветом (рис. 7). Минимальная концентрация выделена зеленым цветом, а максимальная – красным.



Рисунок 7. Наглядная визуализация концентрации водорода на местности

Данные по замерам, а именно карты с концентрацией водорода, привязанной к координатам, можно посмотреть по ссылкам. Используя функционал платформы carto.com, можно выделить интересующую концентрацию, которая будет отображена на карте.

Заключение. В данной работе представлена информационно-измерительная система сбора данных по траектории движения беспилотного летательного аппарата с привязкой к местности. Разработанная система позволяет производить замеры концентрации газов в атмосфере в труднодоступных и вредных для человеческого здоровья средах, повысить эффективность процесса мониторинга заданных показателей.

Анализ результатов проведенных натурных испытаний показал работоспособность системы сбора данных с целью мониторинга содержания примесей и качества атмосферного воздуха.

Данная система является универсальной и может быть использована не только для замера водорода, как в данном случае, но и других физических величин.

Таким образом, применение недорогих и простых в использовании беспилотных аппаратов воздушного наблюдения мультироторного типа будет эффективным для решения задач мониторинга природных и техногенных объектов.

Список литературы

1. Искусственный интеллект и цифровые фабрики: как внедряются элементы Индустрии 4.0 на казахстанских предприятиях [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://primeminister.kz/ru/news/reviews/>
2. Нам сверху видно все: Отчет PwC о коммерческом применении беспилотных летательных аппаратов в мире [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.pwc.kz/en/services/drones-technologies/clarity-from-above-rus.pdf>
3. Тепловизор на дроне [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://www.aerophoto.com.ua/>
4. Claesson A., Fredman D., Svensson L., Ringh M., Hollenberg J. Unmanned aerial vehicles (drones) in out-of-hospital-cardiacarrest. Scandinavian journal of trauma, resuscitation and emergency

- medicine, 24(1), 2016.
5. Adams Stuart M., Marc L. Levitan, and Carol J. Friedland. High Resolution Imagery Collection Utilizing Unmanned Aerial Vehicles (UAVs) for Post-Disaster Studies. In American Society of Civil Engineers, 2012.
 6. Jones Brennan et al. Elevating Communication, Collaboration, and Shared Experiences in Mobile Video through Drones. In ACM Press, 2016.
 7. Malaver A., Motta N., Corke P. and Gonzalez F. Development and Integration of a Solar Powered Unmanned Aerial Vehicle and a Wireless Sensor Network to Monitor Greenhouse Gases, *Sensors* 2015, 15, 4072-4096; doi:10.3390/s150204072.
 8. Van den Bossche J., Peters J., Verwaeren J., Botteldooren D., Theunis J., De Baets B. Mobile monitoring for mapping spatial variation in urban air quality: Development and validation of a methodology based on an extensive dataset. *Atmospheric Environment*, 105, 148–161. 2015. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2015.01.017>.
 9. Villa T., Gonzalez F., Miljevic B., Ristovski Z., Morawska L. An overview of small unmanned aerial vehicles for air quality measurements: Present applications and future perspectives. *Sensors* 2016, 16(7), 1072. <https://doi.org/10.3390/s16071072>.
 10. Yang Y., Hu Z., Bian K., Song L. ImgSensingNet: UAV vision guided aerial-ground air quality sensing system. In IEEE INFOCOM 2019-IEEE conference on computer communications. 1207–1215. <https://doi.org/10.1109/INFOCOM.2019.8737374>.
 11. Yungaicela-Naula N. M., Zhang Y., Garza-Castañon L. E., Minchala L. I. UAV-based air pollutant source localization using gradient and probabilistic methods. In 2018 International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS), pp. 702–707. <https://doi.org/10.1109/ICUAS.2018.8453430>.
 12. Qijun Gu, Drew R. Michanowicz and Chunrong Jia. Developing a Modular Unmanned Aerial Vehicle (UAV) Platform for Air Pollution Profiling, *Sensors* 2018, 18, 4363; doi:10.3390/s18124363
 13. Rohi G., Ejofodomi O., Ofualagba G. Autonomous monitoring, analysis, and countering of air pollution using environmental drones, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2020.e03252>.
 14. Wei Ying Yi, Kin Ming Lo, Terrence Mak, Kwong Sak Leung, Yee Leung and Mei Ling Meng. A Survey of Wireless Sensor Network Based Air Pollution Monitoring Systems, *Sensors* 2015, 15, 31392–31427; doi:10.3390/s151229859
 15. Lambey V., Prasad, A.D. A Review on Air Quality Measurement Using an Unmanned Aerial Vehicle. 2021. <https://doi.org/10.1007/s11270-020-04973-5>
 16. Сайт компании DJI [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://www.dji.com/phantom-3-standard/info>
 17. Определение концентрации углеводородных газов с помощью датчика MQ-2 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://arduino-kit.ru/>
 18. Датчик широкого спектра газов MQ-2 [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <http://wiki.amperka.ru/>
 19. GPS модуль Ublox NEO-6M (GY-GPS6MV2) [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://radiomart.kz/datchiki-polozeniya/162-gps-modul-ublox-neo-6m-gy-gps6mv2.html>
 20. Плата Arduino Uno R3: схема, описание, подключение устройств [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://arduinomaster.ru/platy-arduino/plata-arduino-uno/>
 21. Сайт компании CARTO [Электронный ресурс]. – Режим доступа: <https://carto.com/>

References

1. Iskusstvennyj intellekt i cifrovye fabriki: kak vnedryayutsya elementy Industrii 4.0 na kazhstanskih predpriyatiyah [Elektronnyj resurs]. – Rezhim dostupa: <https://primeminister.kz/ru/news/reviews/>
2. Nam sverhu vidno vse: Otchet PwC o kommercheskom primenenii bespilotnyh letatel'nyh apparatov v mire [Elektronnyj resurs]. – Rezhim dostupa: <https://www.pwc.kz/en/services/drones-technologies/clarity-from-above-rus.pdf>
3. Teplovizor na drone [Elektronnyj resurs]. – Rezhim dostupa: <http://www.aerophoto.com.ua/>
4. Claesson A., Fredman D., Svensson L., Ringh M., Hollenberg J. Unmanned aerial vehicles (drones) in out-of-hospital-cardiacarrest. *Scandinavian journal of trauma, resuscitation and emergency medicine*, 24(1), 2016.
5. Adams Stuart M., Marc L. Levitan, and Carol J. Friedland. High Resolution Imagery Collection Utilizing Unmanned Aerial Vehicles (UAVs) for Post-Disaster Studies. In American Society of Civil Engineers, 2012.

6. Jones Brennan et al. Elevating Communication, Collaboration, and Shared Experiences in Mobile Video through Drones. In ACM Press, 2016.
 7. Malaver A., Motta N., Corke P. and Gonzalez F. Development and Integration of a Solar Powered Unmanned Aerial Vehicle and a Wireless Sensor Network to Monitor Greenhouse Gases, *Sensors* 2015, 15, 4072-4096; doi:10.3390/s150204072.
 8. Van den Bossche J., Peters J., Verwaeren J., Botteldooren D., Theunis J., De Baets B. Mobile monitoring for mapping spatial variation in urban air quality: Development and validation of a methodology based on an extensive dataset. *Atmospheric Environment*, 105, 148–161. 2015. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2015.01.017>.
 9. Villa T., Gonzalez F., Milijevic B., Ristovski Z., Morawska L. An overview of small unmanned aerial vehicles for air quality measurements: Present applications and future perspectives. *Sensors* 2016, 16(7), 1072. <https://doi.org/10.3390/s16071072>.
 10. Yang Y., Hu Z., Bian K., Song L. ImgSensingNet: UAV vision guided aerial-ground air quality sensing system. In IEEE INFOCOM 2019-IEEE conference on computer communications. 1207–1215. <https://doi.org/10.1109/INFOCOM.2019.8737374>.
 11. Yungaicela-Naula N. M., Zhang Y., Garza-Castañon L. E., Minchala L. I. UAV-based air pollutant source localization using gradient and probabilistic methods. In 2018 International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS), pp. 702–707. <https://doi.org/10.1109/ICUAS.2018.8453430>.
 12. Qijun Gu, Drew R. Michanowicz and Chunrong Jia. Developing a Modular Unmanned Aerial Vehicle (UAV) Platform for Air Pollution Profiling, *Sensors* 2018, 18, 4363; doi:10.3390/s18124363
 13. Rohi G., Ejofodomi O., Ofualagba G. Autonomous monitoring, analysis, and countering of air pollution using environmental drones, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2020.e03252>.
 14. Wei Ying Yi, Kin Ming Lo, Terrence Mak, Kwong Sak Leung, Yee Leung and Mei Ling Meng. A Survey of Wireless Sensor Network Based Air Pollution Monitoring Systems, *Sensors* 2015, 15, 31392–31427; doi:10.3390/s151229859
 15. Lambey V., Prasad, A.D. A Review on Air Quality Measurement Using an Unmanned Aerial Vehicle. 2021. <https://doi.org/10.1007/s11270-020-04973-5>
 16. Сajt kompanii DJI [Elektronnyj resurs]. – Rezhim dostupa: <https://www.dji.com/phantom-3-standard/info>
 17. Opredelenie koncentracii uglevodородnyh gazov s pomoshch'yu datchika MQ-2 [Elektronnyj resurs]. – Rezhim dostupa: <https://arduino-kit.ru/>
 18. Datchik širokogo spektra gazov MQ-2 [Elektronnyj resurs]. – Rezhim dostupa: <http://wiki.amperka.ru/>
 19. GPS modul' Ublox NEO-6M (GY-GPS6MV2) [Elektronnyj resurs]. – Rezhim dostupa: <https://radiomart.kz/datchiki-polozeniya/162-gps-modul-ublox-neo-6m-gy-gps6mv2.html>
 20. Plata Arduino Uno R3: skhema, opisanie, podklyuchenie ustrojstv [Elektronnyj resurs]. – Rezhim dostupa: <https://arduino-master.ru/platy-arduino/plata-arduino-uno/>
 21. Sajt kompanii CARTO [Elektronnyj resurs]. – Rezhim dostupa: <https://carto.com/>
-
-