

Для цитирования: А. Молнар. Трёхмерное детектирование гамма-излучения и загрязняющих газов при помощи квадрокоптеров. Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки. 2020; 47 (1): 102-116. DOI:10.21822/2073-6185-2020-47-1-102-116.

For citation: A. Molnár. Three-dimensional detection of gamma radiation and polluting gases using quadrocopters. Herald of Daghestan State Technical University. Technical Sciences. 2020; 47 (1): 102-116. (In Russ.) DOI:10.21822/2073-6185-2020-47-1-102-116

ИНФОРМАТИКА, ВЫЧИСЛИТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА И УПРАВЛЕНИЕ

УДК 681.518

DOI:10.21822/2073-6185-2020-47-1-102-116

ТРЕХМЕРНОЕ ДЕТЕКТИРОВАНИЕ ГАММА-ИЗЛУЧЕНИЯ И ЗАГРЯЗНЯЮЩИХ ГАЗОВ ПРИ ПОМОЩИ КВАДРОКОПТЕРОВ

А. Молнар

Университет в Старой Буде,
H-1034, Bécsi út 96/b, г. Будапешт, Венгрия

Резюме. Цель. Точное знание степени и локального распространения загрязнения играет ключевую роль во многих сферах жизни. **Метод.** Существует множество известных и общепринятых методов измерения намеченных данных, однако эти методы не дают удовлетворительного результата в тех случаях, когда быстро и на сравнительно небольшой площади (промышленная зона в несколько квадратных километров, жилой район и т.п.) требуется определить точные параметры загрязнения или установить изменения этих параметров, выраженные в цифрах. Небольшие БЛА (мультикоптеры с неподвижным или вращающимся крылом) оснащены чувствительными гамма-детекторами или детекторами по обнаружению загрязняющих газов; координаты полётных данных могут быть присвоены измеряемым данным. Такие информационные группы обеспечивают возможность в ходе зондирования территории определять распределение на ней излучения или загрязняющих воздух газов. С помощью данного метода можно выявить и локализовать незаконно хранящиеся или нелегально поставленные материалы, испускающие гамма-лучи, непрерывно мониторить вызванные химическими катастрофами загрязнения, определять пространственное распределение загрязнения. **Результат.** В статье представлены системы, основанные на практических экспериментах, позволяющие в случае использования гамма-детектора локализовать объекты с малыми дозами излучения, а также подготовить качественную карту гамма-излучения конкретной области, а в случае газовых датчиков визуализировать пространственное распространение газа-загрязнителя. Метод применяют, в первую очередь в полевых условиях для обнаружения гамма-излучателей с низкой активностью или с целью анализа эмиссии производственных объектов с выбросом загрязняющих веществ. **Вывод.** Комбинация пространственных координат с данными дистанционного зондирования является эффективным методом измерения. Разработанная система в целом применима для мобильных платформ, оснащённых датчиками. Системы предназначены для обеспечения быстрых, эффективных и надёжных измерений, которые можно использовать как для обнаружения, так и для контроля. Вид загрязняющих веществ, подлежащих измерению, зависит от используемых датчиков. Эксперименты указывают также и на то, что при замене применённых датчиков может возникнуть необходимость изменить обработку измеряемых данных в соответствии с характеристиками этого датчика, однако в целом обработку данных и визуализацию результатов можно практиковать.

Ключевые слова: беспилотный летательный аппарат, гамма-излучатели, гамма-детектор, детектирование

COMPUTER SCIENCE, COMPUTER ENGINEERING AND MANAGEMENT

THREE-DIMENSIONAL DETECTION OF GAMMA RADIATION
AND POLLUTING GASES USING QUADROCOPTERS

A. Molnar

Óbuda University,

H-1034, Bécsi út 96/b, Budapest, Magyarország, (Hungary)

Abstract. Aim. Accurate knowledge of the extent and local distribution of pollution plays a key role in many areas of life. **Method.** Although there are many well-known and generally-accepted methods for obtaining the intended data, these methods do not give a satisfactory result in cases when it is necessary to determine the exact parameters of pollution quickly and in a relatively small area (e.g. an industrial zone of several square kilometers, a residential area, etc.) and to determine changes in these parameters as expressed numerically. Small UAVs (multicopter with fixed or rotating wing) were equipped with sensitive detectors for gamma rays and polluting gases, including the assignation of flight data coordinates to the measured data. Such informational groupings provide the opportunity to determine the distribution of radiation or air polluting gases. Using this method, it is possible to identify and localise illegally-stored or illegally-released gamma ray emitting materials, continuously monitor pollution caused by chemical disasters and determine the spatial distribution of pollution. **Results.** The article presents systems based on practical experiments, which, in the case of using a gamma detector, allow the localisation of objects using low radiation doses along with a high-quality map of gamma radiation in a specific area; and, in the case of gas sensors, the visualisation of the spatial distribution of a polluting gas. The method is used primarily in the field to detect gamma emitters with low activity or to analyse the emission of industrial facilities with the emission of pollutants. **Conclusion.** The combination of spatial coordinates with remote sensing data comprises an effective measurement method. The developed system is generally applicable for mobile platforms equipped with sensors. The systems are designed to provide fast, efficient and reliable measurements that can be used for both detection and control. The type of pollutants to be measured depends on the sensors used. The experiments also indicate that, when replacing the used sensors, it may be necessary to change the processing of the measured data in accordance with the characteristics of the particular sensor; however, in general, data processing and visualisation of the results can be carried out in practice.

Keywords: unmanned aerial vehicle, gamma emitters, gamma detector, detection

Введение. Присвоив координату платформы (т.е. точки измерения) измеренным значениям данных измерительного комплекса, установленного на мобильной платформе, мы обеспечим возможности для множества новых методов анализа и отображения данных [1]. С помощью динамических данных измерения (измерения, периодически повторяющиеся в процессе движения) с присвоенными им координатами могут быть изображены в плоскости или пространстве количество анализируемого вещества или степень излучения, что позволит определить не только моментальное значение исследуемой характеристики, но и её пространственное распределение.

Постановка задачи. Цель разработки – показать такой общеприменимый метод, который базируется на обусловленной роботизированными летательными аппаратами возможности свободного передвижения в пространстве и возможности применять небольшие, высокочувствительные датчики, устанавливаемые на борту БЛА, вместе с глобальными системами позиционирования [2]. Эти аппараты измерений и обнаружения в зависимости от типа бортовых датчиков способны автоматически обнаруживать различные газы, пыль или излучение в заданной области.

Хотя эксперименты, представленные в данной работе, охватывают результаты измерения конкретных материалов и источников излучения, данный метод обычно применяют в том

случае, когда масса и диапазон действия измерительных аппаратов позволяют практиковать его на роботизированном летательном аппарате.

Методы исследования. Измерение распределения газов в пространстве. Для определения пространственного распределения газов важно как можно точнее соотнести данные, измеряемые датчиками, с пространственной координатой [3, 4].

В отличие от простого метода измерения по отношению к высоте, в настоящем случае, требуются медленные полеты, предопределённые, прежде всего, парящими летательными аппаратами типа вертолёта или мультикоптера [5].

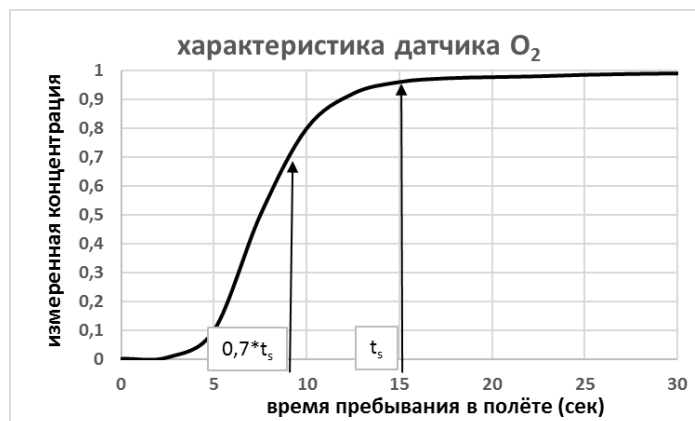


Рис. 1. Характеристика настройки датчика O₂
Fig. 1. Adjustment characteristic of the O₂ sensor

Для точности измерения следует выждать определенное время задержки датчика (t_s). Характерно, что электрохимические датчики, по сравнению с другими способами измерения (например, абсорбционные датчики), имеют большое время калибровки (время задержки), однако их размеры и вес достаточно малы, таким образом, они особенно подходят для использования в небольших летательных аппаратах.

При небольшом времени задержки путём экстраполяции можно определить фактическую концентрацию загрязнения.

Принцип такого метода заключается в следующем. Общеизвестно, что характеристика применяемого датчика (корреляция времени задержки и измеренного значения) обычно является нелинейной. К сожалению, эта корреляция зависит также от измеренной концентрации, таким образом, по сути дела ряд кривых более точно описывает характеристику датчика, но для практического применения производители предоставляют одну наиболее специфическую характеристику.

Отличным примером в применении газовых датчиков является характеристика используемого на экспериментальной установке датчика O₂ (кислорода), которую можно хорошо аппроксимировать с помощью следующей корреляции:

$$f(x) = \frac{x_2}{1 + x_1 e^{-x}} + c \quad (1)$$

где в конкретном случае

x_2 : 0,9552; x_1 : 3249; c : 0,008519

Необходимое время задержки этого датчика - 14 сек.

В зависимости от скорости летающей конструкции в таблице 1 ниже показана та часть пространства минимального диаметра, проходя через которое можно измерить концентрацию O₂, при условии, что концентрация на этом участке остается неизменной.

Таблица 1. Соотнесённый к необходимому времени задержки пройденный путь некоторых типовых датчиков с позиций разноразностных носителей

Table 1. Necessary residence time for carriers with different speeds for some typical sensors

	Время задержки датчика NO [сек.] Sensor Delay Time		Время задержки датчика NO ₂ [сек.] Sensor Delay Time		Время задержки датчика CO [сек.] Sensor Delay Time	
	25	17,5	60	42	40	28
Скорость [м/сек] Speed...	Пройденный путь [м] 100% Dis- tance trav- eled	Пройденный путь [м] 70% Dis- tance trav- eled	Пройденный путь [м] 100% Dis- tance trav- eled	Пройденный путь [м] 70% Dis- tance trav- eled	Пройденный путь [м] 100% Dis- tance trav- eled	Пройденный путь [м] 70% Dis- tance trav- eled
20	500	350	1200	840	800	560
10	250	175	600	420	400	280
5	125	87,5	300	210	200	140
2	50	35	120	84	80	56
1	25	17,5	60	42	40	28
0,5	12,5	8,75	30	21	20	14

Таблица 2. Соотнесённый к необходимому времени задержки пройденный путь некоторых типовых датчиков с позиций разноразностных носителей

Table 2. Travel distance for necessary residence time for carriers with different speeds for some typical sensors

	Время задержки датчика O ₃ [сек.] Sensor Delay Time		Время задержки датчика O ₂ [сек.] Sensor Delay Time		Время задержки датчика CO ₂ [сек.] Sensor Delay Time	
	60	42	14	9,8	90	63
Скорость [м/с] Speed...	Пройденный путь [м] 100% Dis- tance trav- eled	Пройденный путь [м] 70% Dis- tance trav- eled	Пройденный путь [м] 100% Dis- tance trav- eled	Пройденный путь [м] 70% Dis- tance trav- eled	Пройденный путь [м] 100% Dis- tance trav- eled	Пройденный путь [м] 70% Dis- tance trav- eled
20	500	350	1200	840	800	560
10	250	175	600	420	400	280
5	125	87,5	300	210	200	140
2	50	35	120	84	80	56
1	25	17,5	60	42	40	28
0,5	12,5	8,75	30	21	20	14

Из таблицы видно, что в зависимости от скорости изменяется и замеренный граничный уровень загрязнения (возрастает при больших скоростях).

Точность измерения и обусловленную этим точность определения границы зоны загрязнения достигают за счет снижения скорости перемещения устройства.

При известном, но по продолжительности меньшим, чем следует временем пребывания в полёте, зная характеристики датчика, можно посредством следующего ниже метода оценить фактическую концентрацию ($y_{\text{газ}}$): вычисленный

$$y_{\text{газ}} = \frac{y_{\text{сзámított}}}{y_{\text{измеренный}}} f(t_s) \quad (2)$$

где

$y_{измеренный}$: $0,7t_s$ концентрация, рассчитанная за время пребывания в полёте,

т.е. $y_{számított} = f(0,7t_s)$;

$y_{газ}$: измеренная концентрация;

$f(x)$: функция аппроксимации характеристик датчика.

Очевидно, что при большой разнице во времени (разница между необходимым и фактическим временем пребывания в полёте) неточность измерения даёт значительный разброс в оценке концентрации.

Соответствующую точность можно обеспечить в том случае, если время пребывания в полете придется на участок снижения крутизны характеристической функции. Как правило, это 70% времени пребывания в полёте.

На основании выше изложенного лётная скорость в заданном пространстве определяется следующим образом: зная минимальную пространственную точность, которую вы хотите определить (для обычных навигаторов GPS - 6 м), время, необходимое для калибровки датчика, должно составлять не менее 70% от полного времени.

Например, если при использовании датчика NO концентрация NO должна быть определена с точностью ± 3 метра, модуль должен пройти 6 м за 17,5 секунды с учетом времени пребывания датчика в полёте (25 секунд). Это соответствует скорости приблизительно 0,34 м/сек., что составляет 1,23 км/час.

Гамма-детекторы. При выборе гамма-детектора, устанавливаемого на небольшом БЛА и способного выполнять отдельные задачи полёта, следует основываться на двух аспектах [6-9].

Решающим фактором является масса детектора, поскольку полезная грузоподъемность малых дронов строго ограничена. Обычно здесь подходят детекторы с массой 500 грамм и менее. Важно отметить, что недостаточно поднять детектор в воздух, но и необходимо обеспечить для него как можно более длительный полёт. Минимальное время предполагаемого полёта составляет 15 минут. Газовые ионизационные детекторы (счетчик Гейгера-Мюллера) отвечают указанным выше условиям.

По причине измерений с относительно большого расстояния приоритетного внимания заслуживают также чувствительность и эффективность детектора. В этом отношении некоторые сцинтилляционные детекторы могут обеспечивать значительно лучшую эффективность демодуляции [10], чем газовые ионизационные детекторы.

Другим предпочтительным типом детектора может быть полупроводниковый детектор [11], но его стоимость, по сравнению со счётчиком Гейгера-Мюллера такой же чувствительности, очень высока.

При рассмотрении возможных типов детекторов и учитывая ожидаемую стоимость устройства, был выбран счетчик Гейгера-Мюллера с трубкой большого диаметра. Большой диаметр - для обеспечения достаточной чувствительности, а газоразрядная ионизионная трубка - из-за малой массы. Средние значения, измеренные прототипом детектора на тестовой площадке -80 сгс (число импульсов в минуту).

К детектору был подключен микроконтроллер, фиксирующий измеряемые значения в таком формате, чтобы запись данных содержала количество импульсов в минуту, присовокупленное к измерению времени (временная метка) и GPS-координате измерения. Поскольку система беспилотника каждую секунду показывала точные координаты GPS, число импульсов, собираемых в специальном окне времени, записывалось усреднённо. В используемом окне времени всегда было зарегистрировано число импульсов за последние 15 секунд; данные за время, превышающее 15 секунд, удалялись из окна времени, а новые импульсы записывались.

Такой метод гарантировал, чтобы число записываемых каждую секунду импульсов складывалось из статистически интерпретируемого объема данных. В то же время, 15-секундное по времени окно сбора информации при перемещающемся БЛА вызывает также

необходимость коррекции координат импульсов, присвоенных координатам, что следует учитывать при дальнейшей обработке данных.

Относительные технические характеристики встроенной трубки Гейгера-Мюллера[12]:

- эффективная длина: 298.5 мм
- эффективный диаметр: 20.0 мм
- гамма-чувствительность по изотопу ^{60}Co : 180 сгс/мР/ч.
- масса: 150г.

Детекторная система создает следующую структуру данных:

A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N
---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---	---

Расшифровка отдельных полей:

A: Идентификатор строки(в данном случае всегда: \$CGPS)

B: Дата GPS(день xx, месяц yy, год zz)

C: Время GPS (час. xx, мин. yy, сек. zz.zz)

D: Статус GPS (в данном случае GPSEN)

E: Широта (град. xx, мин. yy.uyyy)

F: Полушарие (северное N или южное S)

G: Долгота (град. xxx, мин. yy.uyyy)

H: Запад/Восток (E или W)

I:Высота над уровнем моря по атмосферному давлению (метров xxx.xx)

J: Высота над уровнем моря по показаниям GPS (метров xxx.xx)

K: Расчётное излучение (мР/ч.)

L: Число обнаруженных импульсов за единицу времени (единицу времени можно изменить, её значение считывают с поля M)

M: Единица времени отсчета импульсов (сек. xx.xxxxxx)

N: Контрольная сумма

Пример строки:

\$CGPS,170712,023259.746,GPSEN,4732.0185,N,01902.0008,E,175.40,175.40,0.0074,19,14.244000,*77

Система газонаполненных детекторов. Измерительный модуль фиксирует следующие атмосферные компоненты и загрязнители:

- Кислород (O_2)
- Озон (O_3)
- Углекислоту (CO_2)
- Окись углерода (CO)
- Двоокись азота (NO_2)
- Окись азота (NO)
- Температуру
- Влажность
- Взвешенную пыль

Измерительный модуль может включать в себя дополнительно 10 датчиков, а в случае замены газовых сенсоров становится пригодными для измерения других газов. Такой диапазон свободы обеспечивает широкое использование модуля.

Конструкция модуля основывалась на аспектах, сформулированных для гамма-детектора. Основные характеристики выбранных датчиков (табл. 3.)

Данные датчиков заложены в структуре, описанной для гамма-детектора.

Таблица 3. Параметры датчиков, используемых на сенсорной панели
Table 3. Parameters of the used sensors in the sensor panel

Тип датчика Sensor type	Газ Gas	Метод измерения Method of measurement	Диапазон обнаружения Detection range	Разрешение Resolution	Время пребывания Time stay	Рабочий диапазон Working range
NO/C-25	NO	Электрохимический датчик газа Electrochemical gas sensor	0-25 ppm	0,15 ppm	T90 :<25сек	-20-45 °C RH:15-90% 90-110KPa
NO2/C-20	NO ₂	Электрохимический датчик газа Electrochemical gas sensor	0-20 ppm	0,1 ppm	T90 :<60сек	-20-45 °C RH:15-90% 90-110KPa
CO/CFA-200	CO	Электрохимический датчик газа Electrochemical gas sensor	0-200 ppm	0,1 ppm	T90 :<40сек	-20-40 °C RH:15-90% 90-110KPa
O3/C-5	O ₃	Электрохимический датчик газа Electrochemical gas sensor	0-5 ppm	0,02 ppm	T80 :<60сек	-20-45 °C RH:15-90% 90-110KPa
KE-25	O ₂	Электрохимический датчик газа Electrochemical gas sensor	0-100% O ₂ -re	+ - 1%	T90 :<14сек	5-40 °C RH:10-90% 80-120KPa
tgs4161	CO ₂	Полупроводниковый датчик Semiconductor sensor	350 - 10,000 ppm CO ₂ -re	+ - 20%, 1000 ppm у CO ₂	T90 :<1,5мин	-10-50 °C RH:5-95%

Простые измерения в зависимости от высоты. Готовый измерительный блок в экспериментальных целях был интегрирован в роботизированный летательный аппарат (рис. 2) собственной конструкции. РБЛА смог самостоятельно выполнить заранее запрограммированное лётное задание [13]. Полёты были нацелены на выполнение нескольких экспериментов, включая исследование возможности измерения фонового излучения в полёте.



Рис. 2. Измерительный модуль, установленный на БЛА Chelidon собственной конструкции
Fig. 2. The measuring module mounted on a self made robotic aircraft called Chelidon

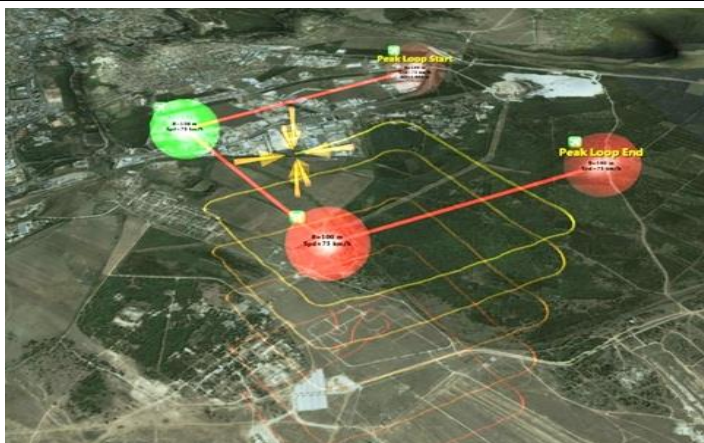


Рис. 3. Траектория полёта при измерениях, осуществленных в воздушном пространстве населённого пункта Варпалота (Венгрия) в процессе подъёма на 500 метров
Fig. 3. Flight track of a 500 meter ascent in Várpalota (Hungary) airspace

На рис. 3 представлена траектория полёта на высоте 500 метров. Лётная цель - на чётко обозначенной территории поднять самолёт с установленными на его борту приборами на высоту 500 м, а затем посадить над той же территорией [14].

Таким образом, в нашем распоряжении были данные и варианты, измеренные во время набора высоты, которые мы могли сравнить с данными, зафиксированными в процессе снижения. Результаты измерений в полете отражены на графиках рис. 4.

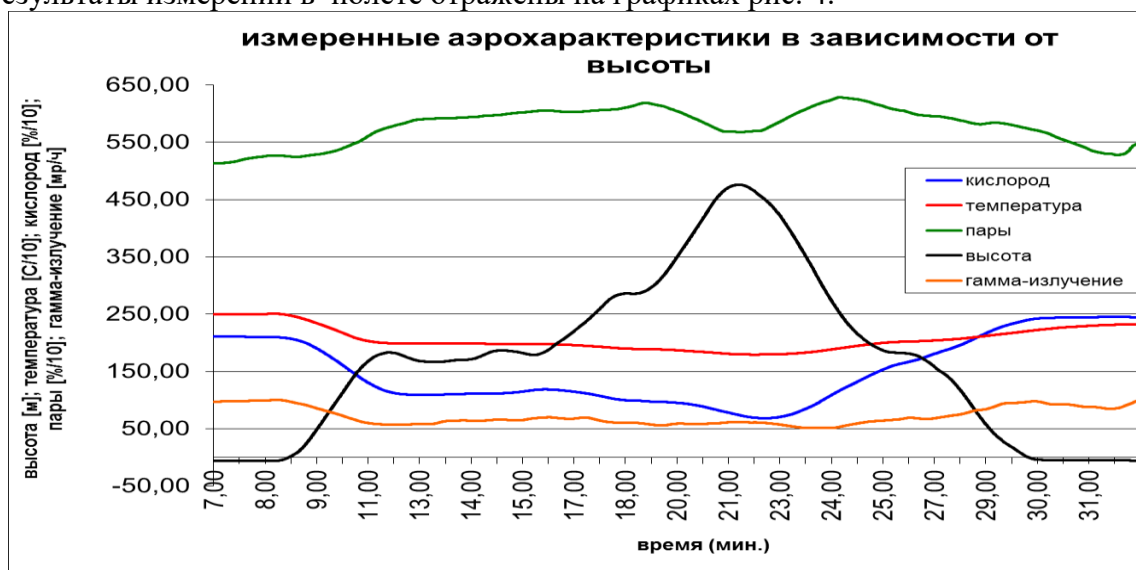


Рис. 4. Диаграммы компонент при наборе высоты 500 метров
Fig. 4. Components charts during a 500 meter climb

Изображенная на графике оранжевая кривая показывает формирование фонового излучения в зависимости от высоты. Детектор оказался достаточно чувствительным на обнаружение фонового излучения Земли. Видно, что вблизи земли были получены измеримо более высокие показатели излучения, чем в воздухе (излучение, измеренное как до подъема, так и после посадки, интенсивнее, чем во время полета).

Измерение трехмерного газового облака на практике. В ходе практических измерений были обнаружены источники выбросов CO и NO₂. Измерения проводились с помощью сенсорного блока, установленного на мультикоптере, перемещающемся со скоростью 0,27 м / с (1 км/ч). Полет охватывал зону измерения на нескольких отдельных высотах с ровными плоскостями сканирования на каждой высоте. На основе обработанных данных мы создали трехмерное облако, которое было построено с использованием программного обеспечения Google Earth в соответствии с реальным местоположением измерения (рис. 5, 6).

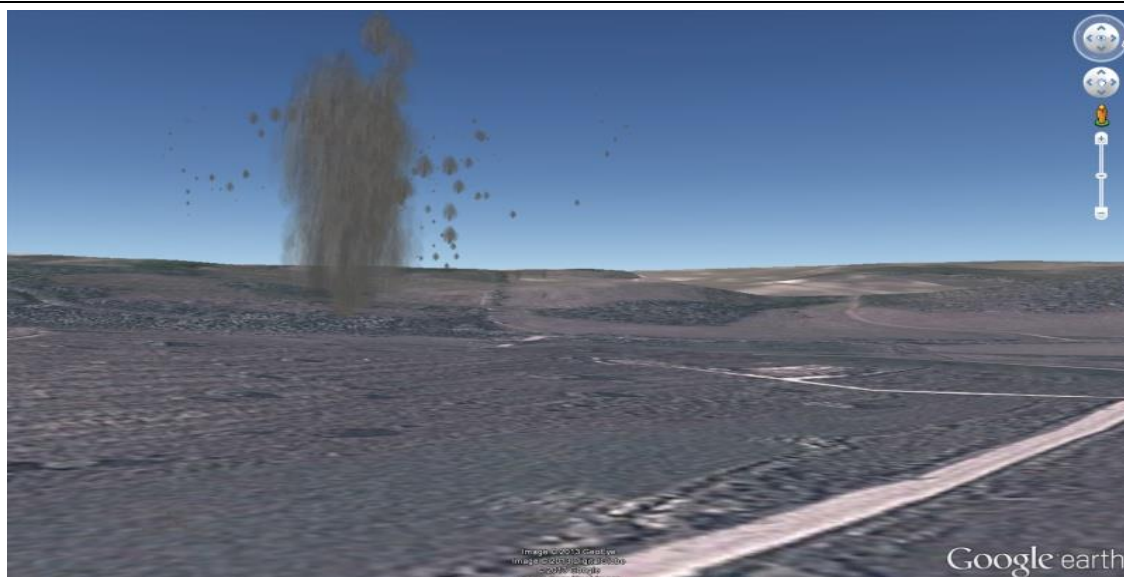


Рис. 5.Трехмерная визуализация экспериментального измерения CO
Fig. 5.3D display of experimental CO measurement

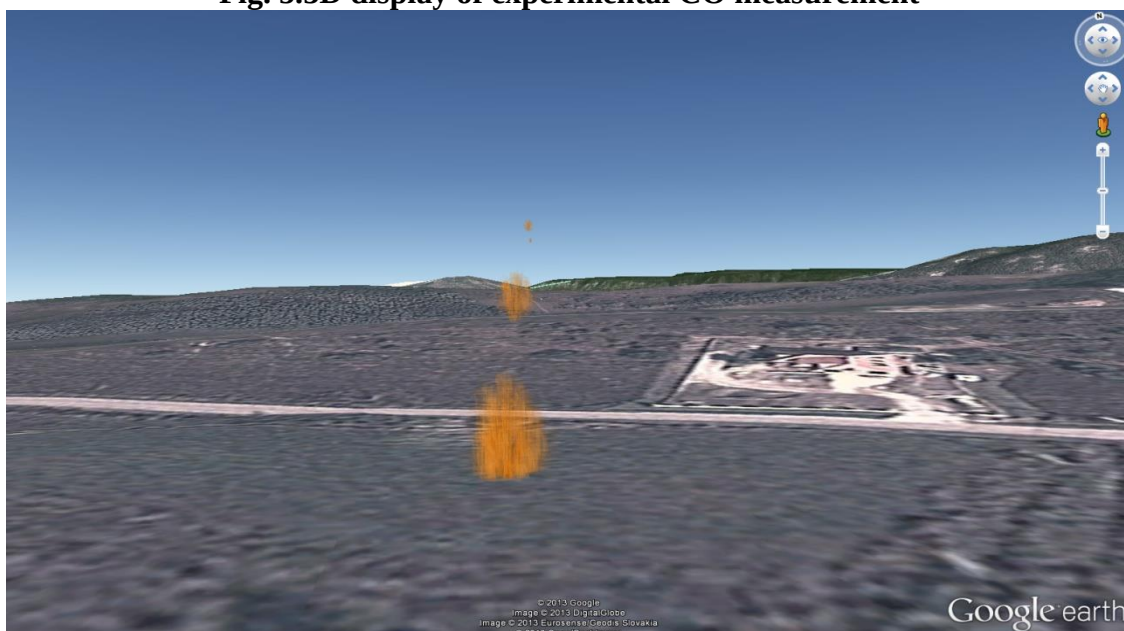


Рис. 6. Трехмерная визуализация экспериментального измерения NO₂
Fig. 6. 3D display of experimental NO₂ measurement

Измерение распределения гамма-излучения на практике. Разработка измерений в большинстве случаев основывалась на классической аэрофотосъемке, включая метод взаимоперекрывающего фотопанорамирования крупных площадей [15].

Сущность этого метода заключается в том, что беспилотник перемещается по охватывающей исследуемую область лётной траектории таким образом, чтобы сделанные за это время приближённо вертикальные снимки зондировали всю площадь, во всех направлениях перекрывая друг друга. Самый простой способ осуществления – перемещение по т. н. меандрирующей траектории, чтобы во время полёта делать снимки с регулярными интервалами. Конечно, высота орбиты, расстояние между параллельными участками и частота съемки должны соответствовать оптическим возможностям и скорости камеры [16].

Для определения распределения излучения нужно непрерывно измерять излучение в данной точке полета, или эквивалентное излучению число импульсов. Для последующей оценки измерений важно, чтобы полет выполнялся с постоянной скоростью и на постоянной высо-

те. Это гарантирует, что данные, измеренные детектором, могут быть сопоставимы для каждой точки полета.

Устройством-носителем был дрон DJI Inspire (рис. 7). Поскольку встроенная камера Inspire фиксирует данные GPS в момент каждой записи, составленное из снимков ортофото, имеет географическую привязку и является калиброванным [17]. Разрешение поля ортофото - 3 см/pxel, согласно нашему опыту геопривязка здесь точнее 3-х метров. Хотя эта точность может быть повышена за счет полевых опорных точек, в этом эксперименте было достаточно иметь фактор надежности в 3 метра.



Рис.7. Дрон Inspire с гамма-детекторами
Fig.7. The Inspire drone with gamma detectors

Учитывая, что данные GPS привязаны также и к измеряемым значениям гамма-детектора, полученная на их базе карта интенсивности может быть интегрирована в ортофото. Два слоя изображения посредством простой математической операции накладываются друг на друга, отображая таким образом местоположение источника излучения на карте.

Детекторный модуль рассчитывает показатели излучения по числу импульсов за единицу времени, определяемых счетчиком ГМ [18]. Это означает, что в определенной точке на время измерения нужно было бы остановить полет устройства, однако такие остановки (парение над территорией) требуют больших энергозатрат, а это резко сократило бы дистанцию полета и, в конечном счете, привело к радикальному уменьшению площади исследуемой области.

Именно поэтому в то время, когда детекторный модуль подсчитывает значения, несущая конструкция перемещается с постоянной скоростью 2 м/с. Отсюда следует: значение в каждой точке измерения относится не к фиксированной метке GPS, а к одному сегменту. Следовательно, координаты результатов измерений тоже должны быть скорректированы с учетом вектора скорости устройства-носителя. На данном этапе эксперимента поправка рассчитывается на половину значения окна усредненного времени, т.е. в координаты точки измерения вносятся поправка на путь, проделанный за 7,5 секунд. На практике это означает коррекцию на 15 м по отношению к направлению движения.

Отдельные измерения осуществляют над площадью в дискретных точках. При изображении распределения интенсивности (распределения излучения), накрывающей площадь, предполагается, что аналогичные значения могут быть измерены также и вблизи каждой точки измерения. Следовательно, значения соседних точек измерения вдоль соединяющих точки района вычисляем путем интерполяции измеренных значений.

Интерполяция также дает дискретные значения, однако расстояние между точками полученной таким образом геодезической сетки составляет одну десятую от точек измерения. Данные излучения (облако точек), сжатые интерполяцией, сглаживаем конволюционными фильтрами свертки. Это можно сделать, предполагая, что значение излучения вокруг заданной точки резко не изменится. Учитывая, что в при нефiltroванном облаке точек значение излучения в непосредственной близости от измеряемой или интерполированной точки сразу же переходит от измеренного значения к нулю, а затем снова к измеренному значению следующей точки, конволюционный фильтр (например, простое усреднение $n \times m$ -территории) обеспечит приближенный к реальному результат.

При помощи последующей коррекции следут удалить значения фонового излучения. Метод относительно прост: предполагая, что на время измерения на большую часть террито-

рии приходится только фоновое излучение, из каждой точки измерения нужно вычесть средние измеренные значения излучения. Это либо приведет к получению изображения со значительно более низкими значениями, чем уровень чувствительности детектора (в этом случае в исследуемой области не было источника излучения), либо останется несколько пиковых значений, которые означают, что на исследуемой территории обнаружен источник излучения.

Обсуждение результатов. Практические эксперименты были начаты с источника излучения низкой интенсивности. Активность источника составляла 14 $\mu\text{Звч}$ при фоновом излучении 0,8 $\mu\text{Звч}$. Пробу с низкой активностью можно было обнаружить только во время низкого полета. Примененный в эксперименте дрон Inspire при поддержке программного обеспечения Pix4D Capture [19] мог летать в автономном режиме на минимальной высоте 10 метров, однако для обнаружения пробы высота полета не должна превышать 1,5 м, поэтому полет дрона осуществлялся в ручном режиме.

На рис. 8 представлено распределение доз излучения, полученное на базе траектории экспериментального полета и обработанных результатов.

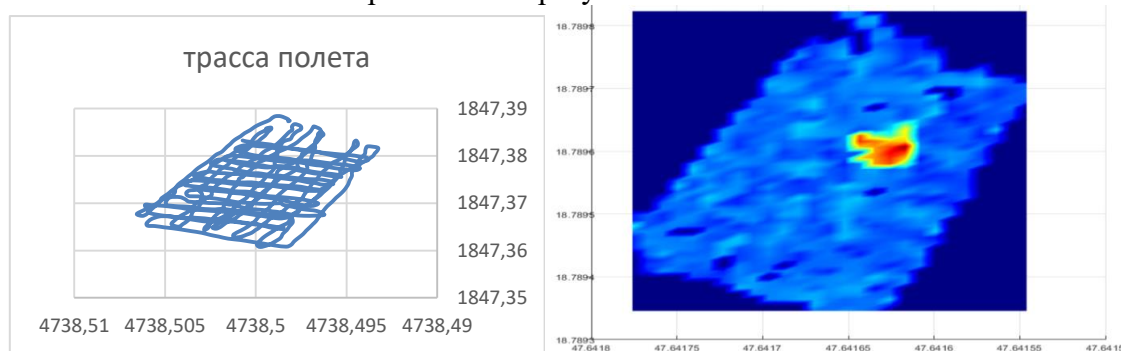


Рис. 8. Траектория экспериментального полета и изображение источника излучения

Fig. 8. Experimental flight track and radiation source

Для тестирования автоматического процесса мы использовали изотоп Тс-99m. Преимущество этого изотопа состоит в том, что благодаря 6-часовому периоду полураспада после отбора пробы остается достаточно времени, чтобы доставить пробу на место измерения и провести эксперимент, в то же время изотоп достаточно быстро распадается [20]. Активность проб во время каждого эксперимента была ниже так называемой «воспринимаемой» активности, т.е. не подлежала специальному лицензированию (не подпадает под действие Закона об атомной энергии 2005 года).

Обнаружение малоактивной пробы с довольно безопасного, но большего расстояния возможно только при наличии чувствительных детекторов. На начало измерения активность пробы составляла 221 $\mu\text{Звч}$ (рис. 9).



Рис. 9. Измерение активности пробы Тс-99m перед экспериментом

Fig. 9. Measuring the activity of the Tc-99m sample prior to the experiment

Рис. 10 иллюстрирует траекторию полета во время эксперимента. Полет проходил на высоте 9 метров ($\pm 0,1$ м) над пробой. Скорость полета - 2 м/с ($\pm 0,1$ м/с). Параметры исследуемой территории - ок. 80 x 80 м. или 6400 м². Представленная на рис.10 концентрация точек

указывает на место взлета и посадки, где дрон уже не перемещается с равномерной скоростью. Данные измерений, собранные в этой точке, при обработке во внимание приняты не были.

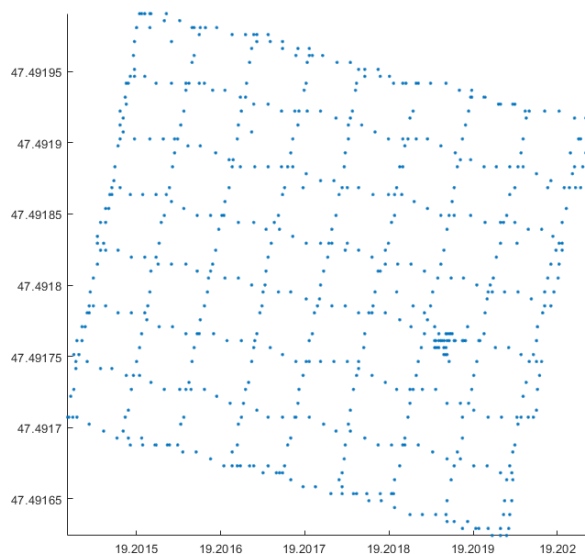


Рис. 10. Траектория автономного полёта с целью проведения измерения

Fig. 10. Autonomous flight track of a measurement

Для увеличения объема данных, устройство зондировало территорию дважды, чтобы траектории во второй фазе полета оказались перпендикулярными траекториям первой фазы. Таким образом, сложившаяся траектория полета привела к квадратной сетке. Траектория, изображенная на рис. 10, впоследствии была реконструирована по данным GPS, зафиксированным во время фактического полёта.

На рис. 11 показано скорректированное изображение излучения, спроецированное на ортофото с географической привязкой. Ортофотоснимок с географической привязкой был смодулирован на базе кадров бортовой камеры дрона.

Поскольку камера была позиционирована не по вертикали (80° вместо 90°), поступившая в наше распоряжение визуальная информация охватывала большую площадь, чем площадь зондирования, что облегчает калибровку ортофото.



Рис. 11. Ортофото с географической привязкой с изображением источника излучения

Fig. 11. Georeferenced orthophoto combined with radiation image

Проба была размещена в верхней части автомобиля, показанного на рис.11. Как можно заметить, согласно измерениям источник излучения располагается чуть-чуть дальше от автомобиля.

При оценке нескольких измерений мы установили, что отклонение от фактического местоположения пробы по разным направлениям составляло максимально 1,5 метра. Эта погрешность обусловлена частично погрешностью примененного GPS [21], частично неточностью в коррекции движения.

Вывод. Опыт, приобретённый в ходе осуществления представленных экспериментов, свидетельствует о том, что комбинация пространственных координат с данными дистанционного зондирования является эффективным методом измерения.

Начальные цели были достигнуты. Разработанная система в целом применима для мобильных платформ, оснащённых датчиками. Системы предназначены для обеспечения быстрых, эффективных и надежных измерений, которые можно использовать как для обнаружения, так и для контроля.

Вид загрязняющих веществ, подлежащих измерению, зависит от используемых датчиков.

Эксперименты указывают также и на то, что при замене применённых датчиков может возникнуть необходимость изменить обработку измеряемых данных в соответствии с характеристиками этого датчика, однако в целом обработку данных и визуализацию результатов можно практиковать.

Библиографический список:

1. Lazna, T., Gabrlík, P., Jilek, T., Zalud, L.: Cooperation between an unmanned aerial vehicle and an unmanned ground vehicle in highly accurate localization of gamma radiation hotspots (2018) *International Journal of Advanced Robotic Systems*, 15 (1).
2. Методические указания по применению беспилотных летательных аппаратов для обследования воздушных линий электропередачи энергетических объектов. Стандарт организации ПАО «ФСК ЕЭС». [Электронный ресурс]. URL: http://www.fsk-ees.ru/upload/docs/STO_5694700729.200.10.235-2016.pdf (дата обращения: 17.01.18).
3. Joseph G. Shanks, Andrey Dudkin, Mitigation of Atmospheric Uncertainty For Improved Trace-Gas Remote Sensing, in: Proc. of SPIE Proc. 5655: Multispectral And Hyperspectral Remote Sensing Instruments And Applications II: Remote Sensing of the Atmosphere, Ocean, Environment and Space, Volume: 5655 DOI: 10.1117/12.578952
4. Neumann, P. (2013). Gas Source Localization and Gas Distribution Mapping with a Micro-Drone. Ph. D. dissertation, Fern Universität Berlin.
5. Šálek, O., Matolín, M., Gryc, L.: Mapping of radiation anomalies using UAV mini-airborne gamma-ray spectrometry (2018) *Journal of Environmental Radioactivity*, 182, pp. 101-107.
6. Mochizuki, S. et al.: First demonstration of aerial gamma-ray imaging using drone for prompt radiation survey in Fukushima (2017) *Journal of Instrumentation*, 12 (11), art. no. P11014, .
7. Aleotti, J. et al.: Detection of nuclear sources by UAV teleoperation using a visuo-haptic augmented reality interface (2017) *Sensors (Switzerland)*, 17 (10), art. no. 2234, .
8. Hinterhofer, T., Pfennigbauer, M., Schraml, S., Hofstätter, M.: UAV-based multi-sensor system with real-time data processing and downlink for survey of nuclear disaster locations for first-responder support (2017) *AUVSI XPO-NENTIAL 2017*, .
9. Mousa Hussein, et al., Development of Autonomous Drone for Gas Sensing Application, 2017 International Conference on Electrical and Computing Technologies and Applications (ICECTA), 978-1-5386-0872-2/17/\$31.00 ©2017 IEEE
10. K. Torigoe, et al., Performance study of a large CsI(Tl) scintillator with an MPPC readout for nanosatellites used to localize gamma-ray bursts, *Nuclear Inst. and Methods in Physics Research, A* (2018), <https://doi.org/10.1016/j.nima.2018.08.039>.
11. Nagy Gábor - Bäumlér Ede - Csurgai József - Molnár László - Pintér István - Vincze Árpád - Zelenák János - Solymosi József, PIN DIÓDA ALKALMAZHATÓSÁGA PILÓTA NÉLKÜLI LÉGI SUGÁRFELDERÍTÉSBEN, *Repüléstudományi Közlemények XXI. évf. 2. szám 2009*.
12. 7808 Gamma Detector Specification, LND INC., p. 5.
13. Stojcsics D., Molnár A.: AirGuardian - UAV Hardware and Software System for Small Size UAVs *INTERNATIONAL JOURNAL OF ADVANCED ROBOTIC SYSTEMS* 9: pp. 1-8. (2012)
14. Somlyai L., Turóczy A., Molnár A.: Atmospheric Analyser for Mobile Robots, *Proceedings of The 13th IEEE International Symposium on Computational Intelligence and Informatics: CINTI 2012. Budapest, 2012.* pp. 181-185.

15. Дейвис Динков: Триизмерно (3D) моделиране на обекти на културно-историческото наследство с използване на безпилотни летателни системи, ISSN 0204-7209 ISSN 2367-6671 (Online) ПРОБЛЕМИ НА ГЕОГРАФИЯТА Книга 3-4 София 2018
16. Мельников А.В. Построение оптимальной траектории полета беспилотного летательного аппарата при выполнении задачи поиска / А.В. Мельников, В.А. Гайдай, Е.А. Рогозин // Вестник Воронежского института МВД России. – 2017. – № 1. – С. 52–62.
17. Sato, Y., et al.: Remote radiation imaging system using a compact gamma-ray imager mounted on a multicopter drone (2018) *Journal of Nuclear Science and Technology*, 55 (1), pp. 90-96.
18. G. Prasanna and J. Jayapandian, "An embedded read-out for GM counter" in *Int. J. Instrum. Technol.*, vol. 1, no. 3, p. 228 (2014).]
19. Röder, M.; Hill, S.; Latifi, H. (2017). Best Practice Tutorial: Technical handling of the UAV DJI Phantom 3 Professional and processing of the acquired data. Würzburg, University of Würzburg.
20. M. E. Bunker and R., Radiations from Mo" and Tc99m, Canada, *Phys. Rev.* 80, 961 (1950).
21. Anandrao Shesherao Biradar. Wind Estimation and Effects of Wind on Waypoint Navigation of UAVs. / A Thesis Presented in Partial Fulfillment of the Requirements for the Degree Master of Science. Arizona State University. May 2014.12. Martin Sele. Wind Corrections in Flight Path Planning / *International Journal of Advanced Robotic Systems* // Martin Sele, Petr Van, Milan Rollo, Tomas Meiser. Received 13 Jun 2012; Accepted 27 Jan 2013.

References:

1. Lazna, T., Gabrlík, P., Jilek, T., Zalud, L.: Cooperation between an unmanned aerial vehicle and an unmanned ground vehicle in highly accurate localization of gamma radiation hotspots (2018) *International Journal of Advanced Robotic Systems*, 15 (1).
2. Metodicheskie ukazaniya po primeneniyu bespilotnykh letatel'nykh apparatov dlya obsledovaniya vozdukhnykh liniy elektropredachii energeticheskikh ob"ektov. Standart organizatsii PAO "FSK EES". [Elektronnyi resurs]. URL: http://www.fsk-ees.ru/upload/docs/STO_56947007-29.200.10.235-2016.pdf (data obrashcheniya 17.01.18). [Methodical instructions for the use of unmanned aerial vehicles for the inspection of overhead power transmission lines and power facilities. The standard of organization of PAO "FSK EES". [Electronic resource]. URL: http://www.fsk-ees.ru/upload/docs/STO_5694700729.200.10.235-2016.pdf (access date 17.01.18). (in Russ.)]
3. Joseph G. Shanks, Andrey Dudkin, Mitigation of Atmospheric Uncertainty For Improved Trace-Gas Remote Sensing, in: *Proc. of SPIE Proc.* 5655: Multispectral And Hyperspectral Remote Sensing Instruments And Applications II: Remote Sensing of the Atmosphere, Ocean, Environment and Space, Volume: 5655 DOI: 10.1117/12.578952
4. Neumann, P. (2013). Gas Source Localization and Gas Distribution Mapping with a Micro-Drone. Ph. D. dissertation, Ferien Universität Berlin.
5. Šálek, O., Matolín, M., Gryc, L.: Mapping of radiation anomalies using UAV mini-airborne gamma-ray spectrometry (2018) *Journal of Environmental Radioactivity*, 182, pp. 101-107.
6. Mochizuki, S. et al.: First demonstration of aerial gamma-ray imaging using drone for prompt radiation survey in Fukushima (2017) *Journal of Instrumentation*, 12 (11), art. no. P11014, .
7. Aleotti, J. et al.: Detection of nuclear sources by UAV teleoperation using a visuo-haptic augmented reality interface (2017) *Sensors (Switzerland)*, 17 (10), art. no. 2234, .
8. Hinterhofer, T., Pfennigbauer, M., Schraml, S., Hofstätter, M.: UAVbased multi-sensor system with real-time data processing and downlink for survey of nuclear disaster locations for first-responder support (2017) *AUVSI XPO-NENTIAL 2017*, .
9. Mousa Hussein, et all., Development of Autonomous Drone for Gas Sensing Application, 2017 International Conference on Electrical and Computing Technologies and Applications (ICECTA), 978-1-5386-0872-2/17/\$31.00 ©2017 IEEE
10. K. Torigoe, et al., Performance study of a large CsI(Tl) scintillator with an MPPC readout for nanosatellites used to localize gamma-ray bursts, *Nuclear Inst. and Methods in Physics Research, A* (2018), <https://doi.org/10.1016/j.nima.2018.08.039>.
11. Nagy Gábor - Bäumlér Ede - Csurgai József - Molnár László - Pintér István - Vincze Árpád - Zelenák János - Solymosi József PIN DIÓDA ALKALMAZHATÓSÁGA PÍLÓTA NÉLKÜLI LÉGI SUGÁRFELDERÍTÉSBEN, Repüléstudományi Közlemények XXI. évf. 2. szám 2009.
12. 7808 Gamma Detector Specification, LND INC., p. 5.
13. Stojcsics D., Molnár A.: AirGuardian - UAV Hardware and Software System for Small Size UAVs *INTERNATIONAL JOURNAL OF ADVANCED ROBOTIC SYSTEMS* 9: pp. 1-8. (2012)
14. Somlyai L., Turóczy A., Molnár A.: Atmospheric Analyser for Mobile Robots, *Proceedings of The 13th IEEE International Symposium on Computational Intelligence and Informatics: CINTI 2012. Budapest, 2012.* pp. 181-185.

15. Davis Dinkov: 3D MODELING OF CULTURAL HISTORICAL HERITAGE SITES USING UNMANNED AERIAL SYSTEMS, ISSN 0204-7209 ISSN 2367-6671 (Online) PROBLEMS OF GEOGRAPHY Volume 3-4 Sofia 2018
16. Mel'nikov A.V., Gaidai V.A., Rogozin E.A. Postroenie optimal'noi traektorii poleta bespilotnogo letatel'nogo aparata pri vypolnenii zadachi poiska. Vestnik Voronezhskogo instituta MVD Rossii. 2017;1:52–62. [Mel'nikov A.V., Gaidai V.A., Rogozin E.A. The construction of the optimal flight path of an unmanned aerial vehicle when performing a search task. The bulletin of Voronezh Institute of the Ministry of Internal Affairs of Russia. 2017;1:52–62. (in Russ.)]
17. Sato, Y., et al.: Remote radiation imaging system using a compact gamma-ray imager mounted on a multicopter drone (2018) Journal of Nuclear Science and Technology, 55 (1), pp. 90-96.
18. G. Prasanna and J. Jayapandian, "An embedded read-out for GM counter" in Int. J. Instrum. Technol., vol. 1, no. 3, p. 228 (2014).]
19. Röder, M.; Hill, S.; Latifi, H. (2017). Best Practice Tutorial: Technical handling of the UAV DJI Phantom 3 Professional and processing of the acquired data. Würzburg, University of Würzburg.
20. M. E. Bunker and R., Radiations from Mo⁹⁹ and Tc^{99m}, Canada, Phys. Rev. 80, 961 (1950).
21. Biradar A. S. Wind estimation and effects of wind on waypoint navigation of UAVs. A thesis presented in partial fulfillment of the requirements for the Master of Science degree. Arizona State University. May 2014. 12. Selecký M., Váňa P., Rollo M., Meiser T. Wind corrections in flight path planning. International Journal of Advanced Robotic Systems. 2013;10:1-9.

Сведения об авторе:

Андраш Молнар, доктор технических наук, доцент, факультет информатики им. Яноша Нейманн; проректор университета Обуда; e-mail: molnar@uni-obuda.hu

Information about the author:

Andras Molnar, Dr. Sci. (Technical), Assoc. Prof., John von Neumann Faculty of Informatics; Vice rektor for General affairs of Obuda University; e-mail: molnar@uni-obuda.hu

Конфликт интересов.

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

Поступила в редакцию 08.03.2020.

Принята в печать 18.03.2020.

Conflict of interest.

The author declare no conflict of interest.

Received 08.03.2020.

Accepted for publication 18.03.2020