



МРНТИ 47.61.33

<https://doi.org/10.32523/2616-7263-2024-147-2-168-187>

Научная статья

## Измерение распределения дозы гамма-излучения с помощью дрона дискретным методом измерения

А. Молнар 

Университет Обуда (Óbudai Egyetem), H-1034, Bécsi út 96/b, г. Будапешт, Венгрия

(E-mail: molnar@uni-obuda.hu)

**Аннотация.** С помощью детектора гамма-излучения, установленного на беспилотном летательном аппарате, было создано несколько карт распределения доз. На основе результатов и опыта, полученного в ходе экспериментов, были выявлены недостатки системы, а также возможности для дальнейшего развития. Основной целью разработки было создание более компактной, легко переносимой и развертываемой системы, но при этом, в отличие от предыдущих, более чувствительной. Несмотря на фоновое излучение (обычно 0,01 Зв/ч в зонах тестирования), в ходе проведенных до сих пор экспериментов была достоверно обнаружена разница в +0,009 Зв/ч. В данной разработке это значение было успешно снижено до +0.005 - +0.007 С/ч. Повышение чувствительности было достигнуто главным образом за счет увеличения времени измерения в каждой точке, что было реализовано с помощью специального программного обеспечения для управления полетом. Такое увеличение чувствительности позволяет либо увеличить высоту сканирования (приблизительно на +1-2 м), либо, в случае использования идентичного летательного аппарата на одинаковой высоте, увеличить площадь обзора за один взлет. Естественно, высота сканирования или скорость сканирования могут значительно увеличиться, если активность источника поиска высока. В наших экспериментах мы использовали природный урановый минерал (Autunit), активность которого намного ниже, чем у искусственно полученных изотопов. В этой серии экспериментов мы также рассмотрели идентификацию нескольких источников, которая моделирует возможность составления карт активных источников, разбросанных по месту возможной аварии. Основное преимущество разработанной и внедренной нами системы перед используемыми на практике процедурами обследования заключается в том, что ее легко мобилизовать, можно обследовать большую площадь с низкими затратами, не подвергая риску оператора в полевых условиях. Цель системы - обнаружить присутствие источника и локализовать его до такой степени, чтобы впоследствии можно было легко определить местоположение вручную или с помощью других наземных процедур. Поскольку мы не стремимся к сантиметровой точности определения местоположения, для измерений достаточно стандартной GPS-локализации. Во время измерений географические координаты интерпретируются в системе WGS'84. Круги, обозначающие координаты широты и долготы, также показаны в этой системе на представленных рисунках

**Ключевые слова:** дрон, детектор, гамма-излучения, счетчик Гейгера-Мюллера, датчик, отенит.

## **Введение**

С помощью детектора гамма-излучения, установленного на дроне, было создано множество карт распределения доз радиации. По результатам и опыту экспериментов были выявлены недостатки системы и возможности ее дальнейшего развития. Основная цель разработки - сделать систему более компактной, удобной для переноса и монтирования, но чувствительнее, чем раньше. В предыдущих экспериментах удалось достоверно зафиксировать отклонение  $+0,009$  мкЗв/ч., по сравнению с фоновым излучением (для области исследования обычно  $0,01$  мкЗв/ч). В настоящей разработке значение было снижено до  $+0,005$  -  $+0,007$  мкЗв/ч. Улучшение чувствительности было достигнуто, в первую очередь, за счет увеличения времени измерения на точку измерения, чему способствовало применение специального программного обеспечения для управления полетом. Такое увеличение чувствительности позволяет либо увеличить высоту сканирования (примерно  $+1-2$  м), либо обеспечить большую площадь измерения при одном взлете того же летательного аппарата на той же высоте. Конечно, высота сканирования или скорость сканирования могут значительно возрасти, если активность искомого источника излучения высока. В наших экспериментах мы использовали природный урановый минерал (отенит), активность которого намного ниже, чем у искусственно полученных изотопов. В серии экспериментов мы нацелились на обнаружение нескольких источников излучения, что моделирует возможность картирования активных излучающих источников, рассеянных на месте возможной аварии. Основное преимущество разработанной и представленной нами системы, по отношению к системам измерения, применяемым на практике, заключается в том, что замер местности может быть проведен оперативно, при небольших затратах и без полевого риска для человека, осуществляющего замеры большой территории. Система преследует цель обнаружить присутствие источника излучения и локализовать его в такой степени, чтобы можно было с легкостью уточнить локализацию посредством мануальных или прочих наземных методов. Поскольку мы не стремились к сантиметровой точности позиционирования, для измерений было достаточно стандартной GPS-локализации. В ходе измерений географические координаты интерпретировались в системе GWS'84. Координаты круга широты и долготы показаны в этой системе на приведенных рисунках.

## **Методология**

Для тестирования были выбраны два датчика детекторов гамма-излучения, монтируемых на дроны. Поскольку мы не стремились определить энергию частиц, удобным в обращении и легко приспособляемым к цифровым устройствам оказался цилиндрический счетчик Гейгера-Мюллера. Проведение тестирования этого детектора в ходе измерений излучения с помощью дрона было очевидным. Однако соответствующие эксперименты [1] [2] указали и на его недостатки, в первую очередь на относительно большую массу созданной системы. Современные сцинтилляционные детекторы на

базе полупроводников могли бы стать перспективной альтернативой для решения поставленной задачи. Они нашли применение во многих подобных проектах [3] [4] [5] [6]. Именно поэтому мы рассмотрели использование такого детектора в конкретной операции измерения. Исследования энергии обнаруженной частицы при использовании сцинтилляционного детектора не проводилось, поэтому детектор рассматривался только как счетчик частиц.

### Счетчик Гейгера-Мюллера

Счетчик Гейгера-Мюллера представляет собой газоразрядную трубку, наполненную газом низкого давления, способную определять ионизирующее излучение. Как правило, специфическое излучение можно обнаружить через взаимодействие с материалом и покрытием трубки или посредством конструкции с окном. Во время работы устройство испускает электрические импульсы на каждый обнаруженный фотон. Вот почему детектор Гейгера-Мюллера часто называют счетчиком частиц. Хотя выходной сигнал трубки аналоговый, содержание информации выражается в импульсах на единицу времени (а не в амплитуде импульса!), поэтому счетчик можно относительно легко подключить к цифровым системам без использования аналого-цифрового преобразователя. Конструкция счетчика проста – металлическая трубка, заполненная газом низкого давления. По оси цилиндра проходит изолированный от него тонкий электрод. Для работы детектора на трубку (оболочку и центральный электрод) следует подать постоянное напряжение, соблюдая полярность. В зависимости от типа трубки напряжение составляет около 500-800 В. Каждый импульс фактически представляет собой электрический разряд внутри трубки. Во время разряда трубка не способна обнаружить новый фотон. Такое время называется мертвым. Мертвое время трубок Гейгера-Мюллера зависит от их типа, но обычно составляет порядка  $10^{-5}$  сек. При измерении необходимо учитывать его влияние. Влияние мертвого времени незначительно при слабом излучении, однако с повышением интенсивности излучения вероятность необнаруженных фотонов возрастает. Теоретически пробивание детектора фотонами является случайным, именно поэтому в случае слабого излучения за мертвое время, генерированное только что обнаруженным фотоном, в детекторе могут быть поглощены один или несколько фотонов, однако они не вызывают нового разряда, т.е. электрического импульса. В трубке Гейгера-Мюллера электрический разряд инициируется ионизирующим излучением, но по разряду, т.е. на базе возникшего электрического импульса нельзя определить энергию обнаруженного фотона. Отсюда следует, что применение трубок Гейгера-Мюллера не позволяет сделать вывод о качестве излучения (энергии гамма-фотонов, а следовательно, вызывающего распад изотопа). В то же время трубка Гейгера-Мюллера — это очень простой и хорошо функционирующий детектор, который легко подключить к блокам обработки (например, к динамике, частотой щелчков демонстрирующему интенсивность излучения, или к счетчику, показывающему количество частиц, обнаруженных за единицу времени), что делает его весьма распространенным в качестве несложного детектора излучения.

## Сцинтилляционный детектор

Некоторые кристаллы излучают свет при воздействии гамма-излучения. На самом деле излучение света не является непрерывным, а производит вспышку света, пропорциональную энергии гамма-фотона, поглощенного каждым кристаллом. Это явление мерцания. Если кристалл установить на очень чувствительный датчик света, а датчик изолировать от всех других источников света, то вспышки могут быть обнаружены в виде электрических импульсов. ФЭУ (фотоумножитель) является первым и в наши дни широко используемым светодатчиком. Типичный сцинтилляционный детектор состоит из двух основных элементов. один из них – это непосредственно сцинтилляционный кристалл, а другой - ФЭУ, оптически связанный с кристаллом. Большим преимуществом таких детекторов является то, что плотность кристалла значительно выше, чем у ионизационных детекторов, таким образом, чувствительное устройство может быть меньших размеров. К тому же сцинтилляционные детекторы генерируют сигнал, пропорциональный воспринятой энергии гамма-фотона, что позволяет определять дальнейшие характеристики исследуемого источника. Недостатком обычных сцинтилляционных детекторов является применение ФЭУ. Это относительно большой по конструкции высоковольтный аппарат, чувствительный к внешним электромагнитным шумам. Для замещения ФЭУ в современных устройствах появились полупроводниковые датчики. Один из таковых - МППС (многопиксельный счетчик фотонов). Они имеют несколько преимуществ по сравнению с ФЭУ: могут работать на низком напряжении, потребляют мало энергии, менее чувствительны к электромагнитным полям и значительно меньше по размерам. Разумеется, при их использовании необходимо обеспечить стабилизированное питание и компенсацию тепла. В зависимости от степени излучения, количества энергии и интенсивности излучения применяют сцинтилляционные кристаллы из различных материалов. К наиболее распространенным относится легированный таллием (активированный) йодид натрия NaI (Tl). Наряду со многими полезными свойствами этот кристалл обладает весьма значительной способностью связывать воду, в чем его большой недостаток. Из-за связанной воды ухудшаются свойства кристалла (желтеет, становится непрозрачным), что в итоге приводит к значительному снижению эффективности детектора. Именно по этой причине во избежание повреждения в результате влажности воздуха кристаллы NaI (Tl) в детекторе должны быть герметически изолированы от внешней среды. Комбинация кристалла и светодатчика должна быть гармоничной. Необходимо учитывать длину световой волны, излучаемой сцинтилляционным кристаллом, и длину улавливающей волны светодатчика, например, CsI (Tl) (легированный таллием йодид цезия) [7] [8] [9] хорошо подходит для детекторов МППС. Однако кристалл CsI мягкий, хрупкий и влагопоглощающий. Как правило, его снабжают внешним покрытием, снижающем, в первую очередь, уязвимость поверхности. Источником гамма-излучения в экспериментальной зоне послужили кусочки отенита  $(Ca(UO_2)_2(PO_4)_2 \cdot (10 \sim 12)H_2O)$ , размещенные на диске диаметром 30 см. Отенит представляет собой природный минерал группы урановых слюдок. Активность минералов, использованных в эксперименте, была

ниже нормы угрозы здоровью. Приобретение и хранение в небольших количествах этих минералов не подлежит лицензированию. На рис. 1 показан спектр гамма-излучения образца отенита. Спектр был записан сцинтилляционным детектором. Оценка записи проводилась с помощью бесплатно загружаемой программы «BecquerelMonitor» [10]. Во время записи спектра образец находился в непосредственной близости от детектора. По причине конструктивного исполнения детектора расстояние между сцинтилляционным кристаллом и образцом составляло 3 мм. Время записи 60 минут. На рисунке представлено увеличение интенсивности радиации по сравнению с зарегистрированным контрольным фоновым излучением. Детекторы Гейгера-Мюллера не подходят для измерения уровня энергии обнаруженных гамма-частиц, а только указывают на их присутствие. Однако на диаграмме видно, что образец отенита вызывает определенное увеличение числа гамма-частиц. Исходя из этого факта, в дальнейших экспериментах в качестве источника излучения мы использовали минерал отенит.

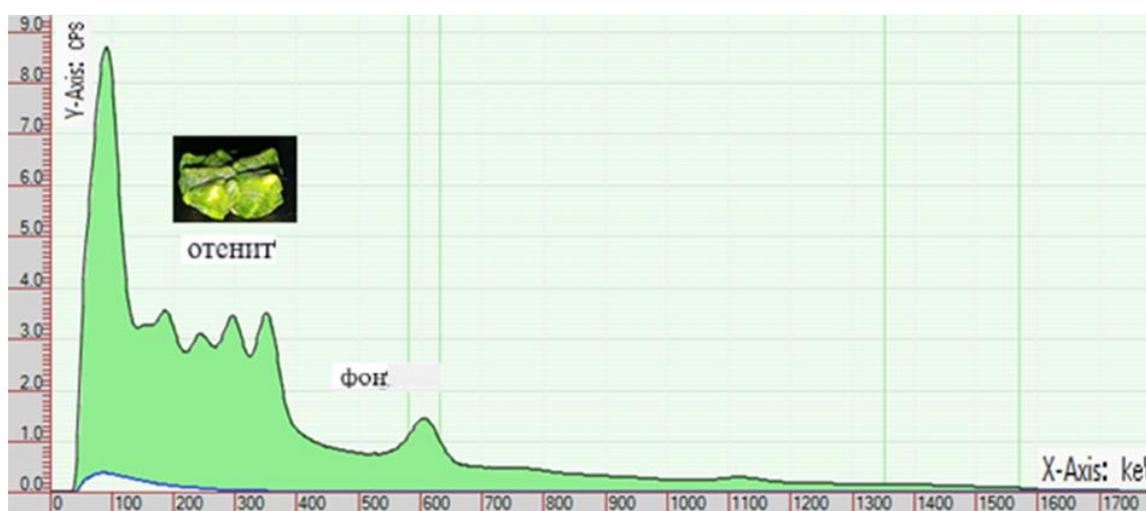


Рисунок 1. Спектр излучения одного из минералов отенита, использованного в экспериментах

Для эксперимента было необходимо определить расстояние измерения (высоту полета), на котором предполагается обнаружить источник излучения. При моделировании распространения излучения мы применяли простую геометрию (рис. 2) со следующими ограничениями:

- с расстояния измерения источник излучения считается точечным,
- ослаблением гамма-излучения в зависимости от пройденного в воздухе расстояния в диапазоне измерений можно пренебречь, т.е.

$$I = I_0 e^{-\mu r} \cong I_0 \quad (9)$$

где

$I$  – излучение, рассчитанное на расстоянии  $r$

$I_0$  – излучение, измеренное в контрольной точке

- $\mu$  – коэффициент затухания среды
- $r$  – расстояние от источника излучения (точки отсчета)
- источник излучения с дистанции измерения является чисто гамма-излучателем
- излучение изотропно

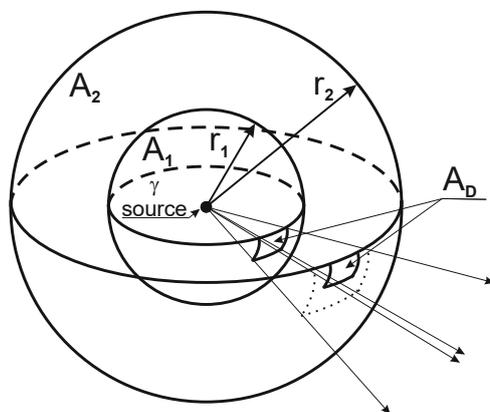


Рисунок 2. Моделирование зависящей от расстояния обнаруживаемости излучения

- $A_D$  – поверхность детектора;  $A_1$  – поверхность сферы, определяющей единицу расстояния;
- $A_2$  – поверхность сферы, определяющей расстояние обнаружения источника излучения;
- $r_1$  – единица расстояния от источника излучения;  $r_2$  – расстояние обнаружения от источника излучения

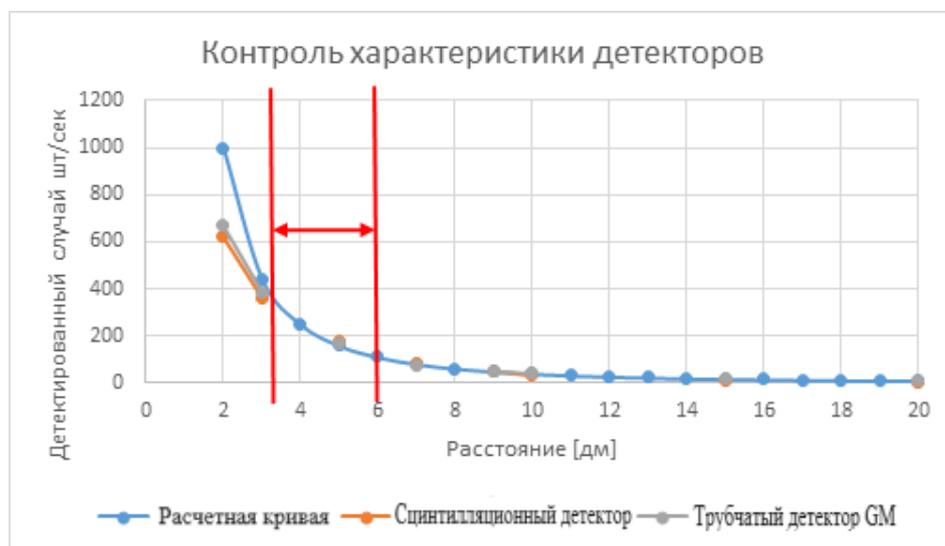


Рисунок 3. Определение эффективного расстояния для измерения

На рисунке 3 показаны результаты эксперимента, в ходе которого с разных дистанций проводились замеры на образцах в количестве, использованном в последующих экспериментах. Цель статического измерения состояла в том, чтобы

иметь возможность сравнить результаты измерения с теоретическими расчетами и определить минимальное и максимальное расстояние измерения. По рисунку видно, что измерения целесообразно проводить на высоте не более 6 метров от образца, так как при бóльшем расстоянии измерения сигнал источника уже при коротком времени измерения невозможно отделить от фонового излучения. Измерения на глубине ниже 3 метров дают констатируемые результаты, однако первоначальные ограничения больше не выполняются в полной мере. Поскольку использованный при тестировании источник излучения складывается из нескольких крошечных минералов, их комбинацию уже нельзя рассматривать вблизи как точечный источник, и результат измерения в итоге будет чреват крупными погрешностями, не позволяющими провести количественную оценку.

#### Генерирование и обработка данных измерений

Процедуру измерения можно разделить на два этапа. На первом этапе устройство в течение заданного времени зависает на запланированном маршруте в обозначенных точках измерения (образующих растровую сетку), а затем летит к следующей измеряемой точке. Запланированное время - 10 секунд. Таким образом, в соответствии с чувствительностью детектора мы можем регистрировать большой объем данных в каждой точке с постоянными координатами. Собранные в одной и той же точке многочисленные данные обеспечивают лучшее соотношение сигнала/шума (излучение образца/фоновое излучение), что увеличивает вероятность обнаружения искомого источника излучения. Если время полета дрона не позволяет провести замеры исследуемой местности, их можно выполнить с нескольких взлетов. На втором этапе измерения зарегистрированные во время полетов данные обрабатываются в автономном режиме с помощью разработанного нами программного обеспечения MATLAB и визуализируется результат.

На первом этапе обработки данных область измерения делим на одинаковые ячейки, как показано на рисунке 4:

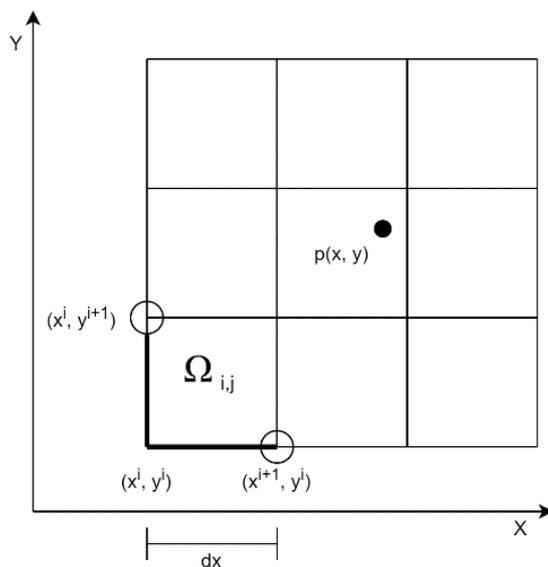


Рисунок 4. Деление территории на ячейки

Пусть ограничивающий прямоугольник будет до  $\Omega_{i,j} \subset R^2$   $X_{min} - tól$   
 $X_{max} - ig$  és  $Y_{min} - tól$   $Y_{max} -$  где

$$X_{min} = \min_{p \in P} p_x \quad (1)$$

$$X_{max} = \max_{p \in P} p_x \quad (2)$$

$$Y_{min} = \min_{p \in P} p_y \quad (3)$$

$$Y_{max} = \max_{p \in P} p_y \quad (4)$$

где  $p$  есть GPS-координата точки измерения ( $p_x, p_y \in R$ ), а  $P$  – включающее все точки множество. Ограничивающий прямоугольник в разбивке  $n \times m$  формируем следующим образом:

$$\Omega_{ij} = \begin{cases} [x^i, x^{i+1}) \times [y^j, y^{j+1}) & ha \quad i \in [0, n, \dots, n - 2] \text{ és } j \in [0, m, \dots, m - 2] \\ [x^i, x^{i+1}) \times [y^j, y^{j+1}) & ha \quad i = n - 1 \text{ és } j \in [0, m, \dots, m - 2] \\ [x^i, x^{i+1}) \times [y^j, y^{j+1}) & ha \quad i \in [0, n, \dots, n - 2] \text{ és } j = m - 1 \\ [x^i, x^{i+1}) \times [y^j, y^{j+1}) & ha \quad i = n - 1 \text{ és } j = m - 1 \end{cases} \quad (5)$$

где,

$$x^i = x_{min} + i \cdot dx \quad (6)$$

$$y^i = y_{min} + i \cdot dy \quad (7)$$

На основании вышеизложенного определяем функцию  $f(p)$ , которая дает значение точки  $p$ . Значение, привязанное к  $(i, j)$ -ой матрице, можно определить с помощью следующего уравнения:

$$\bar{p}\Omega_{i,j} = \frac{\sum_{p \in \Omega_{i,j}} f(p)}{|\{p: p \in \Omega_{i,j}\}|} \quad (8)$$

Функция усреднения может быть заменена любой другой функцией, например, медианой. Таким образом, территорию измерения мы делим по заранее заданным параметрам. Все точки измерения будут принадлежать определенной ячейке. В

зависимости от настройки значение отдельной ячейки определяют средним, медианным или максимальным значением измеренного гамма-излучения.

#### 4. Практический опыт

Для проверки метода на практике мы использовали два дрона с разными детекторными системами. Измерения проводились последовательно в одинаковых условиях, чтобы результаты были сопоставимы. При планировании эксперимента мы учитывали наш опыт измерения гамма-излучения в ходе непрерывных полетов [1][2].

Измерения детектором Гейгера-Мюллера, установленном на дроне JI Inspire JI Inspire Inspire – давний продукт компании DJI. Благодаря большому размеру и грузоподъемности дрон пригоден для перевозки больших грузов весом до 1000 граммов. Его надежная летная способность особенно выгодна для транспортировки детекторной системы Гейгера-Мюллера, устанавливаемой с целью измерения радиации. Сама детекторная система состоит из четырех высокочувствительных ГМ-трубок (LND 7808) [11], источников соответствующего питания напряжением, GPS-модуля и микрокомпьютера, записывающего данные измерений. Система разработана таким образом, чтобы разрозненные данные измерений каждого детектора и сводные данные измерений четырех детекторов архивировались периодически за единицу времени с интервалами в единицу времени. Благодаря этому впоследствии можно проверить эффективность измерения дублирования детекторными трубками.

Время полета оснащенного детекторами дрона составляет 10-18 минут. Такой продолжительности полетного времени было недостаточно для обследования тестируемой зоны длиной 27 м и шириной 24 м. Территория была разбита на квадратную сетку с ячейками по 3х3 метра. В каждой из точек сетки беспилотник зависал на 10 секунд. Замеры были выполнены шестью взлетами. Во время посадок с целью минимизировать погрешности измеряемых точек непрерывно работал GPS-модуль детекторной системы. За время шести полетов территория сканировалась дважды, чтобы в конечном итоге точки измеряемой сетки оказались на расстоянии 1,5 метра друг от друга.

В процессе эксперимента было выполнено 1620 измерений почти в 162 измеряемых точках. Данные измерений иллюстрирует диаграмма на рисунке 5. На ней хорошо видно, что детекторы во время измерений зарегистрировали активность (0,015-0,017 мкЗв/ч), лишь незначительно отличающуюся от типичного фонового излучения в этом регионе (0,015-0,017 мкЗв/ч). Максимальная величина серой линии на диаграмме означает фазу полета, а минимальная - время нахождения на земле (замена батареи). Среди нижних линий диаграммы максимальное значение тонкой сплошной линии показывает генерируемые образцом пики, а максимальное значение пунктирной линии, скорее всего, показывает привязанные к образцу данные.

Поскольку эксперимент был спланирован таким образом, чтобы физическое расположение отдельной измеряемой точки и образца не имели связи по отношению друг к другу, измерение поверх образца не гарантировалось, однако частота расположения точек измерения предполагала наличие нескольких замеров, достаточно близких

к образцу, что уже обуславливает модификацию измеренного значения излучения. В результате присутствовали точки измерения, хорошо характеризующие влияние образца, но были и такие, которые немного отклонялись от фонового излучения, однако присовокуплялись образцу. Хотя диаграмма содержит названные точки измерения, их невозможно четко разделить без дополнительной информации.



Рисунок 5. Медианная фильтрация данных измерения радиации над площадью 650 м<sup>2</sup> и интерпретация каждого пика

Данные обнаруженного излучения, показанные на рисунке 5, были отфильтрованы с помощью 5-элементного медианного фильтра. Это связано с тем, что измерения проводились в дискретных точках. В каждой точке система фиксировала 10 измерений за 10 секунд. Медианный фильтр отфильтровывал всплески, зарегистрированные на время сугубо одного измерения. Из-за естественной природы излучения могут возникать короткие импульсы, но они не указывают на присутствие постоянно высокого уровня излучения. Предположительно, образец вместо кратковременных импульсов в течение многократно осуществленных измерений будет генерировать постоянно увеличенные значения.



Рисунок 6. Нефильтрованные данные излучения при экспериментальном измерении

На рисунке 6 собраны нефильтрованные данные измерения. По рисунку видно, что в нефильтрованном наборе данных сложно найти сигнал образца, к тому здесь присутствует и ряд ложных пиков.

С учетом того, что при каждом измерении излучения записывают также и координату измерения, эту дополнительную информацию можно использовать при анализе данных [12], [13], [14]. Тестируемая территория была разделена на участки размером  $m \times m$ . В ходе анализов значение « $m$ » было равно 1; 2; было 3 и 4 метрам. Размеры такого деления адаптированы к расстоянию между дискретными точками измерения, определяемыми во время полетов. Данные об излучении были присвоены каждому участку, участки характеризовала медиана присвоенных им значений излучения.

Левое изображение на рисунке 7 иллюстрирует плоскостное распределение интенсивности гамма-излучения для вышеуказанных измерительных данных. Образец, помещенный в экспериментальную область, четко отделен от остальной территории. Примечателен значимый эффект образца на изображении. Эффект образца на диаграмме в значительной мере менее выражен.

Для проверки правильности географической координаты указанного при обработке источника излучения был выполнен контрольный замер. Во время контрольного измерения дрон с детектирующим аппаратом зависал над образцом таким образом, чтобы детектор находился на расстоянии 50 см от излучающего объекта. В результате мы получили значения, сильно отклоняющиеся от значений фонового излучения. В существенной мере более высокое значение, по сравнению с фоновым излучением, можно было измерить только по координате над образцом. Иных значений, приближенных к значению измеряемого излучения образца, на территории обнаружено не было, поэтому при обработке не возникало мешающих пиков. Записанные значения координат мы

оценивали статистическими методами, при этом были игнорированы показатели всплесков, а медиана оставшихся значений принята за статическую координату образца. Учитывая, что локализация должна в первую очередь способствовать облегчению первых шагов ручного поиска, ошибки измерения были в ожидаемых пределах.

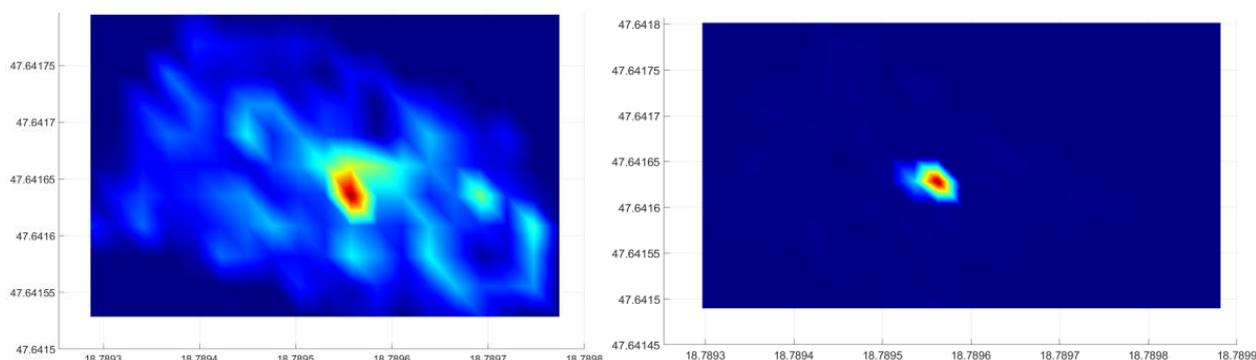


Рисунок 7. Распределение интенсивности гамма-излучения экспериментальной территории с участками обработки 3 x 3 м (слева) и контрольным тестом позиции измерения (справа)

Изображение справа на рисунке 7 иллюстрирует обработку данных контрольных измерений. Здесь можно заметить, что изображение демонстрирует исключительно местонахождение источника излучения. Стрелки на рисунке обозначают географические координаты источника излучения, которые соответствуют представленному на левом снимке рисунка 7 местоположению излучающего источника, фиксированного при обработке данных.

Измерения при помощи сцинтилляционного детектора, установленного на дроне Mavic DJI

Дроны Mavic от компании DJI — относительно новые разработки. Сам дрон значительно меньше, чем серия Inspire. По стабильности и точности полета он превосходят предыдущие модели. Из-за меньшего размера его легче транспортировать, хранить и эксплуатировать, чем его старые и более крупные аналоги. Тем не менее, компактная конструкция дрона несколько осложняет установку желаемых компонентов на устройство. Меньше и грузоподъемность, чем у дронов Inspire, поэтому монтаж уже собранной детекторной системы Гейгера-Мюллера на Mavic не представляется возможным. Однако на устройство можно разместить малогабаритные, легкие, полупроводниковые сенсорные датчики со сцинтилляционным кристаллом. Таким образом, на мультикоптер Mavic Pro были установлены небольшой сцинтилляционный детектор и обрабатывающий зафиксированные им данные одноплатник Raspberry Pi. В экспериментах мы проверяли, насколько надежны данные сцинтилляционного детектора соответствующей чувствительности, записанные им при статических измерениях в полете. По своей структуре примененный детектор состоит из кристалла йодида цезия, легированного таллием CsJ (Tl) размерами 13x13x47 мм и сенсора МРРС.

При излучении 0,01 мкЗв/ч (фоновое излучение, измеренное в экспериментальной зоне) детектор регистрирует в среднем 30 выбиваний электродов попаданий частиц.

Учитывая, что нашей целью было реализовать небольшую, удобную в транспортировке систему, одной из систем-носителей стал дрон DJI Mavic Pro. В связи с ограниченной грузоподъемностью дрона был определен аппаратный минимум для бортовой установки. Конечно, в случае локализации в RTK определение точек измерения обеспечило бы точность менее сантиметра, но мы не ставили перед собой такой задачи по точности в системе. Согласно концепции исследований и разработок точность измерений стандартным GPS (гражданского пользования) была для нас достаточной.

Поскольку дрон Mavic с установленной на нем детекторной системой способен летать 10-12 минут, измерение территории можно осуществить за два взлета. При первом полете мультикоптер произвел замеры в 36 точках измерения, при втором – в 45, по 10 секунд на каждую точку. Результаты измерения вместе с координатами точек измерения одноплатник Raspberry PI записал на SD-карту.



Рисунок 8. Диаграмма числа на секунду измерения излучения над территорией площадью 650m<sup>4</sup>

Хотя сцинтилляционный детектор пригоден для определения энергии обнаруженной гамма-частицы, в настоящем эксперименте это не учитывалось. Зарегистрированные данные содержат исключительно число детектированных гамма-частиц за единицу времени (рис. 8).

В данных измерений, показанных на рисунке 8, значительных всплесков не наблюдается. Основываясь на наборе данных, нельзя определить, был ли в зоне измерения источник излучения с интенсивностью, отклоняющейся от фонового излучения.

Однако по данным, отображенным на плоскости (рис. 9), источник излучения явствует. На рис. 9 показаны два источника излучения (кроме видимых на изображении шумов, поскольку интенсивность источника в местах измерений едва превышала интенсивность фонового излучения). Диаграмма на рисунке 8, демонстрирует также и точность GPS, зафиксированную во время измерения. Очевидно, что во второй трети времени измерения точность измерения ухудшилась (значение стало выше). Одновременно снизилось с десяти до девяти (это значение не показано) количество задействованных для измерения спутников. Кроме этого, из-за возросшей погрешности прецизионности измерения зафиксированные GPS-координаты продемонстрировали отклонение параметров, по сравнению с таковыми в фазе более точного измерения.

Таким образом, появление двух источников излучения на рис. 10 можно объяснить увеличением погрешности GPS при измерении. Расстояние между двумя точками источника излучения, отмеченными на рисунке черной стрелкой, составляет ~ 4 метра. Это расстояние соответствует погрешности позиции, обусловленной увеличением погрешности измерения.

#### Измерение двух источников излучения при помощи DJI Mavic

В ходе дальнейшего тестирования мы исследовали возможность обнаружения источников излучения, расположенных в тестовой зоне на расстоянии. Образцы находились в 25 метрах друг от друга и имели приблизительно одинаковый уровень активности. Эксперимент проходил на несколько большей территории, чем ранее, чтобы размещаемые образцы не попадали на края измеряемой площадки. Была обозначена экспериментальная зона размером 39 метров в длину и 24 метра в ширину, по сравнению с предыдущими параметрами (27 м x 24 м). Мы наметили 117 точек измерения в разбивке по 13 точек в 9-ти рядах. Над каждой точкой дрон зависал на 10 секунд. Замеры можно было выполнить за четыре взлета. Оценка результатов измерений осуществлялась по описанному выше. Необработанные данные видны на диаграммах на рисунке 10.

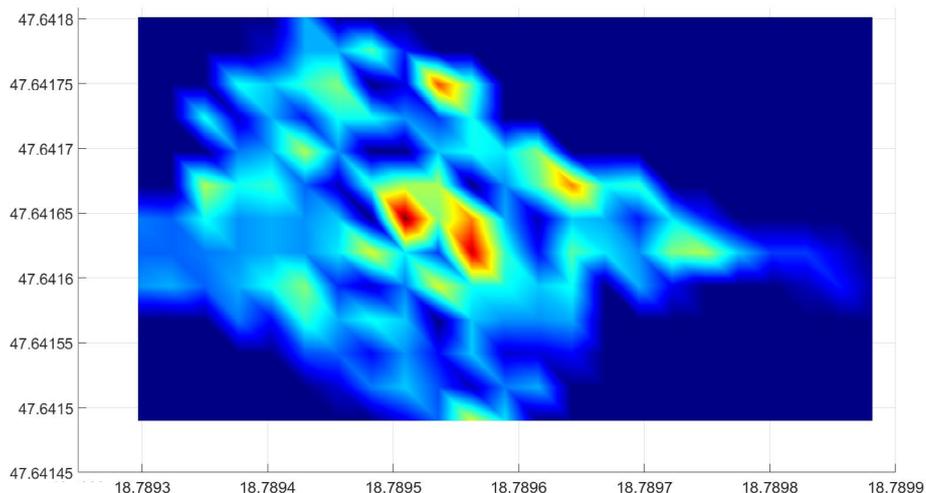


Рисунок 9. Распределение интенсивности гамма-излучения на экспериментальном участке с параметрами предыдущей обработки данных



Рисунок 10. Отображение необработанных данных измерения двух источников излучения

На рисунке 10 показано, что фоновое излучение обусловило значение CPS в диапазоне 20-40. Вблизи образца это значение в значительной мере увеличилось. Во время второго полета замечены 2 пика. Оба пика относятся к одному и тому же источнику. Два пика возникли потому, что в двух случаях устройство находилось на расстоянии обнаружения источника излучения в двух точках измерения. Во время третьего полета очерчивается относительно большой пик, образовавшийся при измерении вблизи второго источника излучения.

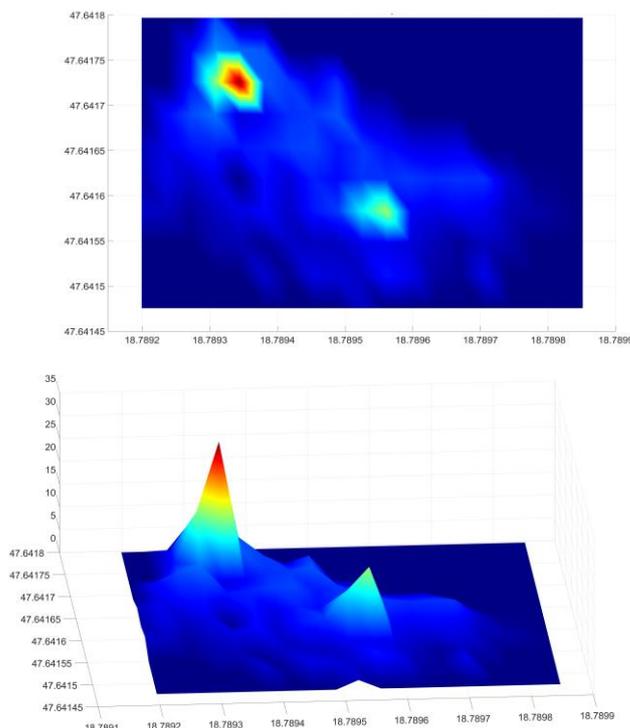


Рисунок 11. Визуальное отображение данных измерения двух источников излучения (слева – плоская проекция территориального распределения, справа – трехмерное изображение)

## **Результаты и Обсуждение**

Результаты измерений показаны описанным методом на левом изображении рисунка 11 в виде карты территориального распределения точек. На изображении места расположения двух источников четко обособлены, их координаты соответствуют реальному положению. Таким образом, данный метод может быть надежно использован для обнаружения нескольких независимых источников излучения на исследуемой местности. В то же время следует отметить, что экспериментальная система не использует позиционирующее устройство RTK, поэтому минимальное обособление двух независимых источников излучения составляет 4-5 метров в зависимости от погрешности GPS, которая может возникнуть в процессе измерения (см. рисунок 9 и пояснение к нему).

Правое изображение на рисунке 11 – это репрезентация уже описанного трехмерного измерения двух источников излучения. Высота от поверхности пропорциональна измеренному гамма-излучению, точнее количеству случаев, зарегистрированных детектором (Count per Secopound, CPS). В ходе отображения для бóльшей ясности мы исключили случаи в диапазоне фонового излучения, так что пики на поверхности говорят о высоком излучении. Следовательно, по оси «Z» правого изображения на рисунке 11 можно определить значения CPS для означенной территории. Хотя цветовая гамма соизмерима со значением. CPS, она не подразумевает абсолютного значения. Для наилучшего визуального восприятия цветовая гамма на каждой диаграмме была подкорректирована.

## **Заключение**

Для объективного сравнения детекторов в один и тот же день были проведены два сравнительных теста при неизменном положении образца и с одинаковыми параметрами измерения. Очевидно, что идентификация образца была достигнута в обоих случаях, однако по результатам измерения имелись качественные различия. При осуществлении замеров с дрона Mavic, оснащенного сцинтилляционным детектором, сигналы зашумлялись в бóльшей мере, чем ожидалось, что скорее всего обусловила мёньшая чувствительность системы детектора. Одна из причин заключается в том, что площадь поверхности детекторной системы счетчика Гейгера-Мюллера с 4 трубками больше, чем площадь сцинтилляционного кристалла объемом 8 см<sup>3</sup>. Хотя сцинтилляционный кристалл по причине более высокой плотности материала взаимодействует с бóльшим количеством гамма-частиц при том же объеме, что и трубки Гейгера-Мюллера, из-за его небольшого размера вероятность обнаружения излучения несколько ниже.

Что же касается аппарата-носителя, то дрон Mavic мог гораздо точнее настроиться на обозначенные точки измерения и удержать свое положение на протяжении всего процесса измерения. Портативность и малогабаритность дрона облегчают работу с ним, делают его компактнее громоздкого дрона Inspire.

Измерение в дискретных точках давало результат точнее, чем измерение в непрерывном полете, поскольку не требовалось корректировать координаты положения

в движении. Еще одним преимуществом измерения в дискретных точках является увеличение времени обнаружения, что позволяет строже отделять сигналы образца от фонового шума.

Исследование нескольких источников излучения убедительно показало, что с помощью изложенного метода измерения можно легко обнаружить и локализовать группы разбросанных по местности радиоактивных обломков или более крупные изолированные обломки

### Список литературы

1. Molnár, András: Gammadózis teljesítmény-eloszlási térkép készítése kis méretű drón alkalmazásával, HADITECHNIKA 53 : 2 pp. 8-13. , 3 p. (2019)
2. András, Molnár; Daniel, Stojcsics; Zsolt, Domozi; István, Lovas: Gamma radiation distribution map creation using a small-sized drone In: IEEE 18th International Symposium on Computational Intelligence and Informatics (CINTI 2018) Budapest, Magyarország; pp. 161-166. , 6 p.
3. Parshin, A.; Morozov, V.; Snegirev, N.; Valkova, E.; Shikalenko, F. Advantages of Gamma-Radiometric and Spectrometric Low-Altitude Geophysical Surveys by Unmanned Aerial Systems with Small Scintillation Detectors. Appl. Sci. 2021, 11, 2247. <https://doi.org/10.3390/app1105224>
4. 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
5. 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
6. 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 Xponential 2017
7. Šálek, O.; Matolín, M.; Gryc, L. Mapping of radiation anomalies using UAV mini-airborne gamma-ray spectrometry. J. Environ. Radioact. 2018, 182, 101–107.
8. Martin, P.; Connor, D.; Estrada, N.; El-Turke, A.; Megson-Smith, D.; Jones, C.; Kreamer, D.; Scott, T. Radiological Identification of Near-Surface Mineralogical Deposits Using Low-Altitude Unmanned Aerial Vehicle. Remote Sens. 2020, 12, 3562
9. BecqMoni2011 is an amateur freeware Japanese MCA software, <https://ln.sync.com/dl/cbafeba20/87sjrujv-r9tziicq-pz9ncmsy-nphcjsk5/view/default/1092926230010>
10. LND, Inc. Oceanside, New York, USA product datasheet: <https://www.lndinc.com/products/geiger-mueller-tubes/7808/>
11. Edorovsky, V.; Mazukabzov, A.; Sklyarov, E.; Gladkochub, D.; Donskaya, T.; Lavrenchuk, A.; Kotov, A. Aerospace Geological Map of the North-Eastern Part of zones Chernorud & Tomota; Geological Institute of RAS & Institute of Earth's Crust: Irkutsk, Russia, 2013.
12. Parshin, A.V.; Budyak, A.E.; Babyak, V.N. Interpretation of Integrated Aerial Geophysical Surveys by Unmanned Aerial Vehicles in Mining: A Case of Additional Flank Exploration. IOP Conf. Ser. Earth Environ. Sci. 2020, 459, 052079.
13. Parshin, A.; Budyak, A.; Chebokchinov, I.; Sapunov, V.; Bulnayev, A.; Morozov, V. Complex UAS-Geophysical Surveys at the First Stages of Geological Prospecting: Case in the Western Sayan (Russia). In

Proceedings of the First EAGE Workshop on Unmanned Aerial Vehicles, Toulouse, France, 2–4 December 2019; pp. 1–5.

**А. Молнар**

*Университет Обуда (Óbudai Egyetem),  
H-1034, Bécsi út 96/b, г. Будапешт, Венгрия*

### **Дискретті өлшеу әдісімен дрон арқылы гамма-сәулелену дозасының таралуын өлшеу**

**Андатпа.** Дрондарға орнатылған гамма-сәулелік детектордың көмегімен дозаларды бөлудің бірнеше карталары жасалды. Эксперименттерде алынған нәтижелер мен тәжірибелерге сүйене отырып, жүйенің кемшіліктері, сондай-ақ одан әрі даму мүмкіндігі анықталды. Әзірлеудің негізгі мақсаты неғұрлым ықшам, оңай тасымалданатын және орналастырылатын, бірақ алдыңғы жүйелерден айырмашылығы барынша сезімтал жүйені құру болды. Фондық сәулеленуге қарамастан (әдетте сынақ аймақтарында  $0,01 \text{ } ^\circ \text{ с/сағ}$ ), осы уақытқа дейін жүргізілген эксперименттерде  $+0,009 \text{ } ^\circ \text{ с/сағ}$  айырмашылық сенімді түрде анықталды. Осы қазіргі дамуда бұл мән сәтті төмендетілді  $+0.005 - +0.007$  сезімталдықтың жақсаруына, ең алдымен, ұшуды басқарудың арнайы бағдарламалық жасақтамасының көмегімен жүзеге асырылатын бір нүктеге өлшеу уақытын ұлғайту арқылы қол жеткізілді. Бұл сезімталдықтың жоғарылауы сканерлеу биіктігінің жоғарылауына (шамамен  $+1-2\text{м}$ ) немесе бірдей биіктікте бірдей ұшу құрылғысы болған жағдайда, бір ұшу кезінде үлкенірек зерттеу аймағын қамтуға мүмкіндік береді. Әрине, іздеу көзінің белсенділігі жоғары болса, сканерлеу биіктігі немесе сканерлеу жылдамдығы айтарлықтай артуы мүмкін. Тәжірибелерімізде біз белсенділігі жасанды түрде өндірілген изотоптардан әлдеқайда төмен табиғи уран минералын (Автонит) қолдандық. Осы эксперименттер сериясында біз сондай-ақ ықтимал апат болған жерге шашыраңқы белсенді көздерді картаға түсіру мүмкіндігін модельдейтін бірнеше көздерді анықтауды қарастырдық.

Біз әзірлеген және енгізген жүйенің тәжірибеде қолданылатын зерттеу процедураларынан басты артықшылығы-жұмылдыру оңай, үлкен аумақты операторға қауіп төндірмей, арзан бағамен далада зерттеуге болады. Жүйенің мақсаты-көздің бар-жоғын анықтау және оны кейіннен локализациялау арқылы немесе басқа жердегі процедуралармен оңай анықтауға болатындай дәрежеде оқшаулау. Біз сантиметрлік орналасу дәлдігіне ұмтылмайтындықтан, өлшеу үшін СТАНДАРТТЫ GPS локализациясы жеткілікті. Өлшеу кезінде географиялық координаттар WGS'84 жүйесінде түсіндіріледі. Ендік пен бойлық координаттарының шеңберлері де осы жүйеде ұсынылған суреттерде көрсетілген.

**Түйін сөздер:** Дрон, детектор, гамма-сәулелену, Гейгер-Мюллер есептегіші, сенсор, отенит

**Andras Molnar**  
(University Of Obuda),  
H-1034, Vienna Road 96 / b, Minnesotan. Budapest, Hungary

### **Measurement of gamma radiation dose distribution by drone using discrete measurement method**

**Abstract.** Several dose distribution maps have been created using a drone-mounted gamma radiation detector. Based on the results and the experiences gained in the experiments, the shortcomings of the system as well as the possibility for further development have also emerged. The primary objective of the development was to create a more compact, easily portable, and deployable system, but one which, in contrast with the previous ones, is more sensitive. Despite background radiation (typically 0.01  $\mu$ Sv/h in the testing areas), a difference of +0.009  $\mu$ Sv/h has reliably been detected in the experiments made so far. In this present development, this value was successfully reduced to +0.005 - +0.007  $\mu$ S/h. The improvement in sensitivity was achieved primarily by increasing the measurement time per point, which was realized using special flight control software. This sensitivity increase either allows higher scanning altitude (approximately +1-2m) or, in case of an identical flight device at an identical altitude, a larger survey area with one take-off. Naturally, scanning height or scanning speed can increase significantly if the activity of the searched source is high. In our experiments, we used a natural uranium mineral (Autunit) with activity far below that of artificially produced isotopes. In this series of experiments, we also covered the identification of several sources, which models the possibility of mapping active sources scattered around the site of a possible accident.

The main advantage of the system developed and introduced by us over the survey procedures used in practice is that it is easy to mobilize, a large area can be surveyed at low cost without putting an operator at risk in the field. The purpose of the system is to detect the presence of the source and to localize it to such an extent that the localization can subsequently be easily specified by manual or other ground procedures. Since we do not strive for centimeter positioning accuracy, standard GPS localization is sufficient for measurements. During the measurements, the geographical coordinates are interpreted in accordance with the WGS'84 system. Additionally, the system displays the circles of latitude and longitude coordinates in the figures presented.

**Keywords:** Drone, detector, gamma radiation, Geiger-Muller counter, sensor, otenit

#### **References**

1. Molnár, András: Gammadózisteljesítmény-eloszlási térkép készítése kis méretű drón alkalmazásával, HADITECHNIKA 53: 2 pp. 8-13. , 3 p. (2019)
2. András, Molnár; Daniel, Stojcsics; Zsolt, Domozi; István, Lovas: Gamma radiation distribution map creation using a small-sized drone In: IEEE 18th International Symposium on Computational Intelligence and Informatics (CINTI 2018) Budapest, Magyarország., pp. 161-166. , 6 p.
3. Parshin, A.; Morozov, V.; Snegirev, N.; Valkova, E.; Shikalenko, F. Advantages of Gamma-Radiometric and Spectrometric Low-Altitude Geophysical Surveys by Unmanned Aerial Systems with Small Scintillation Detectors. Appl. Sci. 2021, 11, 2247. <https://doi.org/10.3390/app1105224>
4. 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

5. 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
6. 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 Xponential 2017*
7. Šálek, O.; Matolín, M.; Gryc, L. Mapping of radiation anomalies using UAV mini-airborne gamma-ray spectrometry. *J. Environ. Radioact.* 2018, 182, 101–107.
8. Martin, P.; Connor, D.; Estrada, N.; El-Turke, A.; Megson-Smith, D.; Jones, C.; Kreamer, D.; Scott, T. Radiological Identification of Near-Surface Mineralogical Deposits Using Low-Altitude Unmanned Aerial Vehicle. *Remote Sens.* 2020, 12, 3562
9. BecqMoni2011 is an amateur freeware Japanese MCA software, <https://ln.sync.com/dl/cbafeba20/87sjrujv-r9tziicq-pz9ncmsy-nphcjsk5/view/default/1092926230010>
10. LND, Inc. Oceanside, New York, USA product datasheet: <https://www.lndinc.com/products/geiger-mueller-tubes/7808/>
11. Egorovskiy, V.; Mazukabzov, A.; Sklyarov, E.; Gladkochub, D.; Donskaya, T.; Lavrenchuk, A.; Kotov, A. *Aerospace Geological Map of the North-Eastern Part of zones Chernorud & Tomota; Geological Institute of RAS & Institute of Earth's Crust: Irkutsk, Russia, 2013.*
12. Parshin, A.V.; Budyak, A.E.; Babyak, V.N. Interpretation of Integrated Aerial Geophysical Surveys by Unmanned Aerial Vehicles in Mining: A Case of Additional Flank Exploration. *IOP Conf. Ser. Earth Environ. Sci.* 2020, 459, 052079.
13. Parshin, A.; Budyak, A.; Chebokchinov, I.; Sapunov, V.; Bulnayev, A.; Morozov, V. Complex UAS-Geophysical Surveys at the First Stages of Geological Prospecting: Case in the Western Sayan (Russia). In *Proceedings of the First EAGE Workshop on Unmanned Aerial Vehicles, Toulouse, France, 2–4 December 2019*; pp. 1–5.

#### **Сведения об авторах:**

**Андраш Молнар** – автор для корреспонденции, профессор Обуда университета Н-1034, Vienna Road 96 / b, Minnesotan. Будапешт, Венгрия.

**Андраш Молнар** – хат-хабар авторы, Н-1034 университетінің Обуд профессоры, Vienna Road 96 / b, Миннесотан. Будапешт, Венгрия

**Andras Molnar** – corresponding author, Professor University of Obuda, H-1034, Vienna Road 96 / b, Minnesotan. Budapest, Hungary



Copyright: © 2024 by the authors. Submitted for possible open access publication under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY NC) license (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc/4.0/>).