

УДК 528.83

DOI <https://doi.org/10.32782/apcmj.2024.4.7>**Крячок Сергій Дмитрович,**

кандидат технічних наук, доцент

ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5633-1501>E-mail: [geodesist2015@gmail.com](mailto:geodesist2015@gmail.com)

Scopus-Author ID: 57204332476

Researcher ID: N-3061-2016

## ЩОДО ЯКОСТІ ЗБОРУ ГАММА-КВАНТІВ НА МАРШРУТІ АЕРОЗНІМАННЯ З БЕЗПЛОТНОГО ЛІТАЛЬНОГО АПАРАТА ТЕРИТОРІЇ РАДІАЦІЙНОГО ЗАБРУДНЕННЯ

**Анотація.** Нині наукові й технічні досягнення значно розширили сферу застосування геодезичної науки в напрямі дистанційного зондування Землі для забезпечення достовірною геопросторовою інформацією різних сфер людської діяльності. Поява роботизованих дистанційних вимірювальних комплексів на базі безпілотних літальних апаратів (БПЛА) дає змогу виключити безпосередню участь людини під час виконання різноманітних небезпечних місій, однією з яких є розвідка й картографування територій радіаційного забруднення. Наразі для виконання цієї місії застосовують в основному БПЛА коптерного типу з рухливими детекторами. Такі детектори мають найменші габарити й вагу порівняно з іншими типами сенсорів. Перед виконанням місії необхідно виконати калібрування детектора для приведення його вимірів до поверхні забруднення. Метою статті є дослідження якості збору гамма-квантів полем зору рухливого детектора гамма-випромінювання на маршруті аерознімання з БПЛА. Для теоретичних досліджень прийнято такі припущення. Територія радіаційного забруднення є рівнинною місцевістю, яка вкрита тонким шаром радіоактивного пилу з рівномірним розподілом інтенсивності гамма-випромінювання. На території знаходяться локальні максимуми у вигляді точкових джерел гамма-випромінювання. У результаті проведених теоретичних досліджень отримано математичний апарат для визначення розмірів і площ зон, які відрізняються за якістю збору гамма-квантів на маршруті аерознімання з БПЛА території радіаційного забруднення з використанням гамма-детектора рухливого типу й поділяються на інформативні та малоінформативні зони. Одним із показників якості збору гамма-квантів може бути збільшення відношення площі сукупної інформативної зони до площі гамма-знімання. Наведено розрахунки розмірів і площ указаних зон на маршруті аерознімання довжиною 1 км, кута поля зору гамма-детектора з 90°, частоти збору гамма-квантів 1 Гц, швидкості БПЛА 10 м/с та висоти 30 м. Результати наведених досліджень можуть бути корисними для планування маршрутів гамма-знімання з БПЛА й аналізу якості виконаного аерознімання.

**Ключові слова:** БПЛА, радіаційне забруднення, аерознімання, гамма-детектор.

## Kryachok Serhiy. TO THE QUALITY OF GAMMA QUANTUM COLLECTION ON THE ROUTE OF AERIAL SURVEYING FROM AN UNMANNED AIRCRAFT IN THE TERRITORY OF RADIATION CONTAMINATION

**Abstract.** Currently, scientific and technical achievements have significantly expanded the scope of geodetic science in the direction of remote sensing of the Earth to provide reliable geospatial information in various spheres of human activity. The appearance of robotic remote measuring complexes based on unmanned aircrafts (UAV) allows to exclude the direct participation of a person during the execution of various dangerous missions, one of which is reconnaissance and mapping of radiation contaminated territories. At present, helicopter-type UAVs with moving detectors are mainly used to perform this mission. Such detectors have the smallest dimensions and weight compared to other types of sensors. Before the mission, it is necessary to calibrate the detector to bring its measurements to the contamination surface. The purpose of the article is to study the quality of gamma quanta collection by the field of view of a mobile gamma radiation detector on the aerial survey route from a UAV. The following assumptions were adopted for theoretical research. The territory of radiation pollution is a flat area covered with a thin layer of radioactive dust with a uniform distribution of the intensity of gamma radiation. There are local maximums in the form of point sources of gamma radiation on the territory. As a result of theoretical studies, a mathematical apparatus was obtained for determining the sizes and areas of zones that differ in the quality of gamma quanta collection on the route of aerial photography from a UAV of the territory of radiation contamination using a mobile gamma detector and are divided into informative and uninformative zones. One of the indicators of the quality of gamma-quanta collection can be an increase in the ratio of the area of the total informative zone to the area of the gamma-shooting. Calculations of the sizes and areas of the specified zones on the aerial survey route

with a length of 1 km, a viewing angle of the gamma detector of 90°, a gamma quanta collection frequency of 1 Hz, a UAV speed of 10 m/s and a height of 30 m are given. The results of the above studies can be useful for planning gamma-shooting routes from UAVs and analyzing the quality of the performed aerial photography.

**Key words:** UAV, radiation pollution, aerial photography, gamma detector.

**Вступ.** За останні десятиліття розвиток цифрових та інформаційних технологій, елементної бази став поштовхом для створення аерокосмічних систем високої роздільної здатності для дистанційного зондування Землі, цифрового аерофотознімання та використання безпілотних літальних апаратів (далі – БПЛА), що значно розширило можливості й горизонти застосування геодезичної науки для забезпечення достовірною геопросторовою інформацією різних галузей економіки, науки, військової сфери та громадян, а також для розв’язання різноманітних інженерних завдань і прийняття управлінських рішень [1].

БПЛА належать до класу безпілотних апаратів і за своєю сутністю є роботизованими системами, які покликані передусім замінити людину під час виконання різноманітних місій, знайшли своє застосування в аеропортах. Відоме застосування БПЛА для діагностики стану аеродромного покриття, у тому числі визначення індексу його стану, інспекції вогнів точного заходу на посадку й системи посадки повітряних суден [2]. У статті [3] наведено розробку наземного роботизованого комплексу, який покликаний визначити відмітки покриття злітно-посадкової смуги аеропорту в режимі дистанційного ГІС/GPS-керування комплексом мобільних нівелірних роботів. Загалом аеропорт – це складний інфраструктурний об’єкт, який займає значні території, містить дороговартісні повітряні судна, обладнання та споруди. На його території переміщуються значні пасажиропотоки. Тому він може стати мішенню для терористичних атак навіть з використанням ядерної зброї малої потужності, оскільки наразі людство перебуває на межі її застосування терористичними режимами й угрупованнями. У такому разі в пригоді можуть стати БПЛА для розвідки та картографування наслідків її застосування.

**Матеріали та методи.** Людство має досвід застосування БПЛА для розвідки наслід-

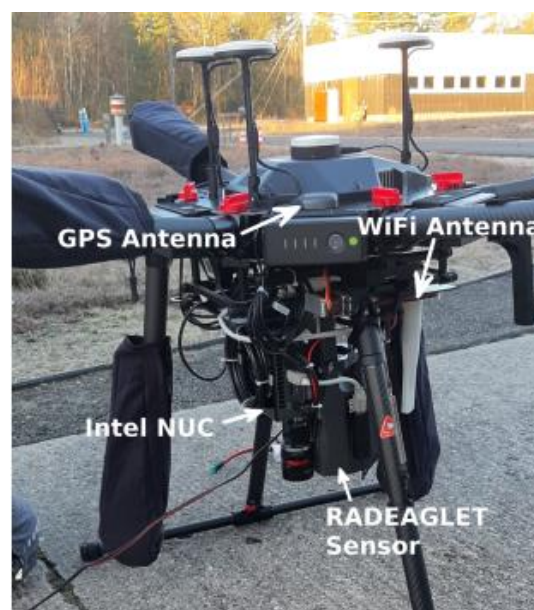
ків витоку радіації через цунамі на атомній станції Фукусімі в Японії [4]. Систему дистанційного радіаційного моніторингу з використанням БПЛА використано на території зони відсудження навколо Чорнобильської АЕС [5].

Базовим літальним апаратом для розвідки й картографування територій радіаційного забруднення є БПЛА коптерного типу [5; 6; 7]. На рис. 1 показано приклад застосування октокоптера DJI Matrice, який здатен нести до 5 кг корисного навантаження [6].

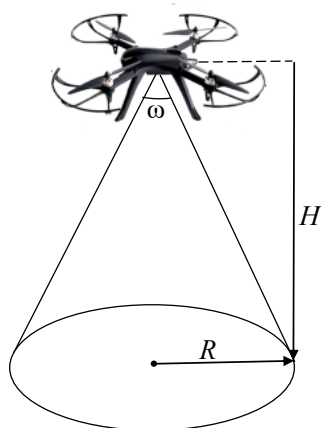
Як сенсор радіаційного випромінювання на БПЛА використовуються в основному детектори рухливого типу, або спрямовані детектори.

Вони дають змогу визначати місцезнаходження джерела радіоактивного випромінювання за умови, що система виявлення або джерело рухається. Кут поля зору детектора  $\omega$  відповідає значенню просторової роздільної здатності (рис. 2).

Ці детектори мають порівняно з іншими типами детекторів радіаційного випромі-



**Рис. 1.** Технічне оснащення БПЛА: GPS-приймач, WiFi, комп’ютер і детектор радіації [6]



**Рис. 2.** Кут поля зору  $\omega$  детектора, поле зору радіуса  $R$  на земній поверхні за висоти БПЛА  $H$

нювання найменші габарити й вагу, а тому й застосовуються на БПЛА [8].

Перед застосуванням БПЛА для виконання місій з розвідки та картографування території радіаційного забруднення необхідно виконати калібрування детектора. Для цього або БПЛА зависає на кілька хвилин над джерелом радіаційного випромінювання відомої інтенсивності на малій висоті або використовують наявні на місцевості джерела радіоактивного випромінювання, інтенсивність випромінювання яких визначена наземним способом з використанням еталонованого дозиметра, для чого виконується політ БПЛА над калібрувальним майданчиком на відомій висоті, наприклад, 10 м. В обох випадках дані про інтенсивність випромінювання на основі частоти рахунку (числа відліків за секунду) детектора й обчисленої калібрувальної константи дають змогу перейти до потужності дози опромінення. Визначаються також висотний коефіцієнт для приведення визначених потужностей доз на висоті гамма-знімання з БПЛА до стандартної висоти одного метра над землею поверхнею [5; 9].

Для виконання аерознімання території радіаційного забруднення виконується планування польотів БПЛА над конкретною територією. Аерознімання виконується, як правило, прямолінійними галсами, а отримані дані про інтенсивність випромінювання й координати БПЛА передаються на наземну станцію через WiFi-з'єднання або по каналу радіозв'язку. На

наземній станції отримані дані вимірювань обробляються в режимі реального часу та візуалізуються за допомогою QGIS – Open Street Map, Google Earth або іншого картографічного програмного забезпечення. У підсумку отримують координатну інформацію про розподіл інтенсивності радіаційного випромінювання з лініями маршрутів БПЛА (рис. 3, а) чи карту місцевості з розподілом інтенсивності у вигляді ізоліній (рис. 3, б) [5; 10].

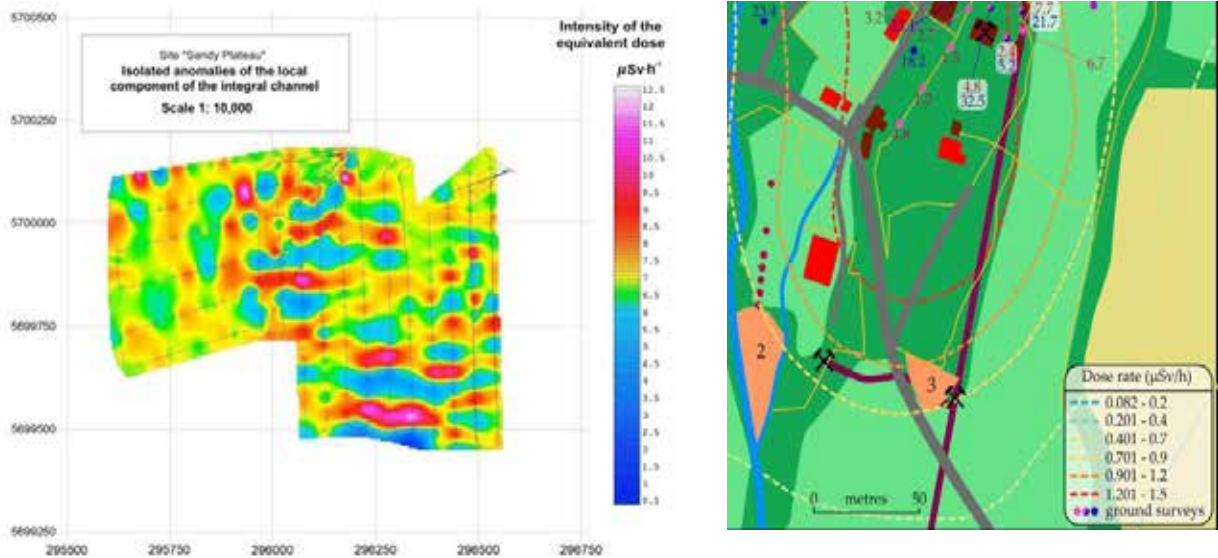
Гамма-випромінювання від природних і техногенних джерел є одним із найбільш проникних серед різновидів радіаційного випромінювання. Так, дальність дії гамма-променів природних радіонуклідів у повітрі становить близько 700 м [11]. Тому, як правило, саме на визначення інтенсивності гамма-випромінювання налаштовані детектори радіаційного випромінювання на БПЛА.

Метою статті є дослідження якості збору гамма-квантів полем зору рухливого детектора гамма-випромінювання на маршруті аерознімання з БПЛА.

**Результати.** Для теоретичного обґрунтування міркувань, наведених далі, прийнято такі припущення: територія гамма-знімання є рівнинною місцевістю, яка вкрита тонким шаром радіоактивного пилу з рівномірним розподілом інтенсивності гамма-випромінювання й містить локальні його максимумами у вигляді точкових джерел випромінювання.

Виконаємо аналіз збору квантів гамма-випромінювання полем зору детектора із земної поверхні впродовж одного циклу гамма-знімання на маршруті польоту БПЛА. Під тривалістю циклу розуміється обернене значення частоти збору даних, заявленої виробником, стосовно інтенсивності гамма-випромінювання для конкретного типу детектора.

Нехай (рис. 4, а) у момент часу  $t_1$  поле зору радіусом  $R$  детектора гамма-випромінювання, розташованого на БПЛА на висоті  $H$ , знаходиться в положенні  $O_1$ , а його крайня точка  $G_1$  – на межі AD території зондування. До моменту часу  $t_2$  поле зору переміщується по земній поверхні вздовж напрямку  $G_1H_2$  маршруту БПЛА. У момент часу  $t_2$  його центр займе положення  $O_2$ . За різницю часу  $\Delta t = t_2 - t_1$ , що відповідає тривалості циклу й швидко-



а – картограма розподілу інтенсивності радіаційного випромінювання [5]

б – карта місцевості з розподілом інтенсивності у вигляді ізоліній [11]

**Рис. 3. Візуалізація результатів гамма-знімання за допомогою БПЛА**

сті польоту БПЛА  $v$ , крайня точка поля зору  $G_1$  переміститься в положення  $G_2$  на відстань  $a = v \cdot \Delta t$ . На цю ж відстань переміститься центр  $O_1$  і займе положення  $O_2$  (за умови, що  $a < R$ ). Під час переміщення поля зору за проміжок часу  $\Delta t$  виконується збір квантів гамма-випромінювання шляхом їх інтегрування [5] уздовж маршруту БПЛА на ділянці  $G_1 - H_2$ , причому за особливості роботи рухливого детектора радіаційного випромінювання збір гамма-квантів виконується сукупно з усього круга поля зору. Упродовж циклу визначаються координати БПЛА за допомогою GPS. Отримана в циклі інформація стосовно кількості зібраних гамма-квантів у вигляді числа відліків за секунду (counts per second) має координатну прив'язку до середини тривалості циклу – точки  $O$  – і передається з борту БПЛА на наземну станцію керування або записується на внутрішню пам'ять на борту БПЛА.

Якщо вважати за межі маршруту зондування прямокутник ABCD, то на кінцях маршруту утворюються «мертві» зони:  $AE_1G_1$ ,  $DG_1F_1$ ,  $BH_2E_2$ ,  $CF_2H_2$ . У цих зонах буде відсутня інформація стосовно характеристик радіаційного випромінювання. Сукупна площа цих зон становитиме таке:

$$S_{MB} = 4 \left( R^2 - \frac{\pi R^2}{360^\circ} 90^\circ \right) = 4R^2 \left( 1 - \frac{\pi}{4} \right). \quad (1)$$

Якщо припустити, що поле зору детектора має розміри  $G_1E_1E_2H_2F_2F_1$  і збір квантів виконується в статистиці (БПЛА зависає над землею поверхнею), то була б отримана достовірна інформація стосовно характеристик радіаційного випромінювання за цикл вимірювання. Однак збір квантів гамма-випромінювання в цій зоні буде виконуватися в динаміці, у процесі польоту БПЛА.

Зону  $G_1E_1L_1K_2G_2K_3J_1F_1$  позначимо літерами ЗЗ (задня зона), а зону  $L_1E_2H_2F_2J_1T_2H_1$  – літерами ПЗ (передня зона). У зоні ЗЗ, чим далі точка зони від дуги  $L_1K_2G_2K_3J_1$  у напрямку, протилежному переміщенню БПЛА, тим менше часу окремі частини зони перебуватимуть у полі зору гамма-детектора за проміжок часу  $\Delta t$ . Те саме стосується й точок зони ПЗ, але в напрямку переміщення детектора стосовно дуги  $L_1T_1H_1T_2J_1$ . Інерційність роботи детектора призводить до запізнення реагування системи детектування на зміну інтенсивності випромінювання із земної поверхні (унаслідок наявності локального максимуму) під час переміщення поля зору детектора. Лише в зоні  $G_2K_2L_1T_1H_1T_2J_1K_3$ , яку позначимо



літерами ВЦ (велика центральна), усі точки місцевості, що входить до території радіаційного забруднення, за час  $\Delta t$  циклу будуть знаходитися в полі зору гамма-детектора, який зможе адекватно відреагувати на наявність локального максимуму в цій зоні.

Отже, більш якісно буде виконано збір квантів гамма-випромінювання саме в зоні ВЦ, що дає змогу отримати більш достовірну інформацію стосовно характеристик радіаційного випромінювання забрудненої території під час аерознімання з БПЛА порівняно із зонами ЗЗ та ПЗ. До останніх можна зарахувати дві менші за розмірами зони:  $E_1E_2L_1$ ,  $F_1J_1F_2$ , які позначимо МБ (мала бічна). Отже, зону ВЦ можна вважати інформативною, а зони ЗЗ, ПЗ та МБ можна назвати малоінформативними у відносному розумінні. Площа всієї зони гамма-знімання  $G_1E_1E_2H_2F_2F_1$  за один цикл складається з площі двох півкругів  $G_1E_1K_2O_1K_3F_1$  та  $E_2H_2F_2T_2O_2$  й прямокутника  $E_1E_2T_1O_2T_2F_2F_1K_3O_1K_2$ , дорівнює:

$$S_{Z_1} = R(\pi R + 2a). \quad (2)$$

Площа інформативної зони ВЦ складається з площ двох рівновеликих сегментів:  $G_2K_2L_1O_1K_3$  та  $L_1T_1H_1T_2J_1O$ . Для її визначення необхідно обчислити кут  $\beta$ . З прямокутного трикутника  $L_1O_2O$  зрозуміло таке:

$$\beta = 2 \arccos \frac{a}{2R}. \quad (3)$$

Отже, площа інформативної зони ВЦ за один цикл гамма-знімання визначається за формулою:

$$S_{I_1} = S_{ВЦ} = R^2 \left( \frac{\pi\beta^\circ}{180^\circ} - \sin\beta \right). \quad (4)$$

Площі задньої ЗЗ та передньої ПЗ малоінформативних зон визначається як різниця площі круга радіуса  $R$  і зони ВЦ, а площа дорівнює таке:

$$S_{ЗЗ} = S_{ПЗ} = R^2 \left[ \pi \left( 1 - \frac{\beta^\circ}{180^\circ} \right) + \sin\beta \right] \quad (5)$$

Площу (рис. 4, б) малоінформативної підзони  $E_1K_1E_2L_1$  (МБ) можна визначити з таких міркувань. Із формули (3) та рис. 4, б зрозуміло таке:

$$\frac{\beta}{2} = \arccos \left( \frac{a}{2R} \right), \quad (6)$$

$$b = \sqrt{R^2 - \frac{a^2}{4}}. \quad (7)$$

Площа сектора  $O_1E_1L_1$  дорівнює  $\frac{\pi R^2}{360^\circ} (90^\circ - \beta/2)$ . Площу фігури  $E_1K_1L_1$ , що становить половину зони  $E_1K_1E_2L_1$  (МБ), можна отримати, якщо від площі прямокутника  $O_1E_1K_1O$  відняти площі сектора  $O_1E_1L_1$  і трикутника  $O_1L_1O$ . Тоді сукупна площа двох бічних малоінформативних зон  $E_1K_2L_1$  та  $F_1J_1F_2$  (2МБ) (див. рис. 4, а) визначається за формулою:

$$S_{2МБ} = a(2R - b) - \frac{\pi R^2}{90^\circ} \left( 90^\circ - \frac{\beta}{2} \right) = R \left[ 2a - \frac{\pi R}{90^\circ} \left( 90^\circ - \frac{\beta}{2} \right) \right] - ab. \quad (8)$$

Довжина зони гамма-знімання за один цикл становитиме (див. рис. 4, а)

$$L_1 = 2R + a, \quad (9)$$

а відстань від до середини тривалості циклу – точки  $O$  до межі інформативної зони вздовж маршруту аерознімання (напрямку  $G_1H_2$ ) дорівнює:

$$d = R - \frac{a}{2}. \quad (10)$$

Надалі для розрахунків буде корисним визначити площі двох частин інформативної зони ВЦ. Так, площа сегмента  $G_2K_2O_1K_3$  (див. рис. 4, а), який позначимо як ВЦ1, для параметрів

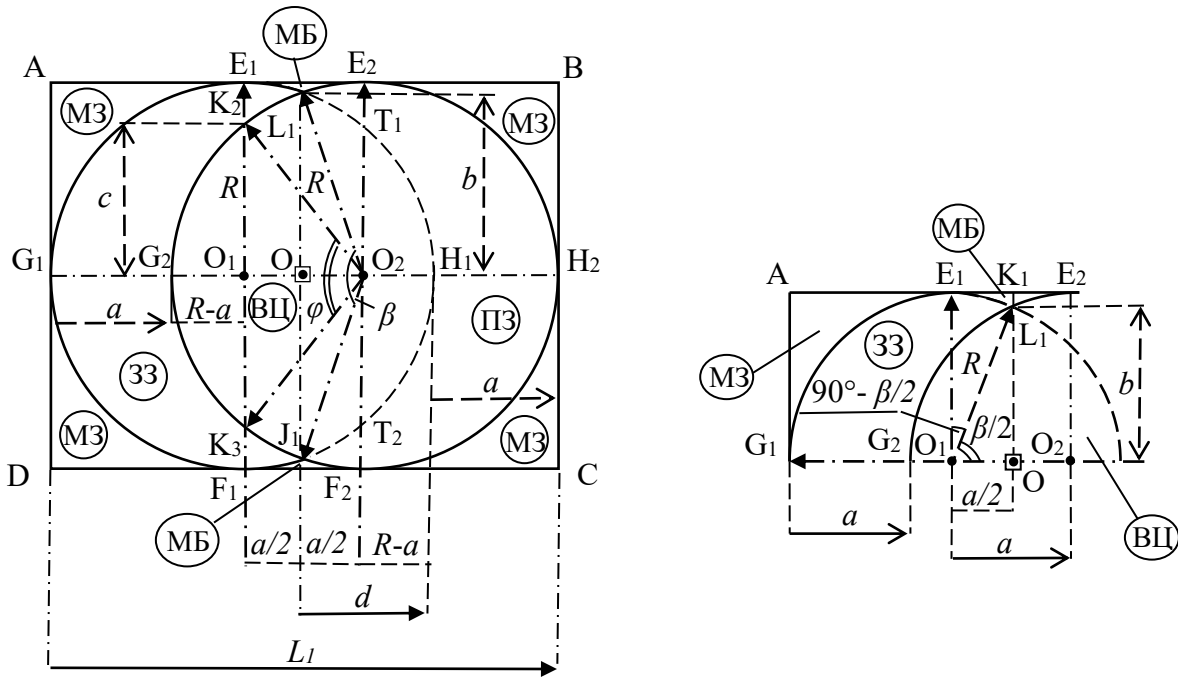
$$c = \sqrt{R^2 - a^2}, \quad (11)$$

$$\phi = 2 \arccos \frac{a}{R}, \quad (12)$$

буде визначатися за формулою

$$S_{ВЦ1} = \frac{R^2}{2} \left( \frac{\pi\phi^\circ}{180^\circ} - \sin\phi \right). \quad (13)$$

Згідно з формулою (11), значення  $c$  матиме дійсні значення в інтервалі  $0 \leq a \leq R$ . Тому для значень  $a_1 = 0$  та  $a_2 = R$ , що, згідно з (12), відповідає  $\phi_1 = 180^\circ$  та  $\phi_2 = 0^\circ$ , то, згідно



а – зсув поля зору детектора стосовно місцевості впродовж одного циклу вимірювань

б – до визначення площі зони E1K1E2L1

**Рис. 4.** До збору квантів гамма-випромінювання полем зору детектора із земної поверхні впродовж одного циклу на маршруті польоту БПЛА за умови  $0 < a < R$

з (13),  $S_{BC1_1} = \pi R^2 / 2$  та  $S_{BC1_2} = 0$ . Отже, сегмент інформативної зони ВЦ1, обмежений діаметром  $E_1F_1$ , у циклі гамма-знімання існує в інтервалі значень  $0 < a < R$  у вигляді, наведеному на рис. 4, а.

Площа фігури  $O_1K_2L_1T_1O_2T_2J_1$  (див. рис. 4, а), яку позначимо ВЦ2, дорівнює площі зони ВЦ без площ двох сегментів ВЦ1:

$$S_{BC2} = R^2 \left[ \frac{\pi}{180^\circ} (\beta - \phi) - (\sin \beta - \sin \phi) \right]. \quad (14)$$

Оскільки фігура ВЦ2 отримана з урахуванням площ двох сегментів ВЦ1, то для значень  $a_1 = 0$  та  $a_2 = R$ , що, згідно з (3) та (12), відповідає  $\beta_1 = 180^\circ$ ,  $\beta_2 = 120^\circ$ ,  $\phi_1 = 180^\circ$ ,  $\phi_2 = 0^\circ$ , а згідно з (14),  $S_{BC2_1} = 0$ ,  $S_{BC2_2} = R^2 \left( \frac{4\pi - 3\sqrt{3}}{6} \right)$ .

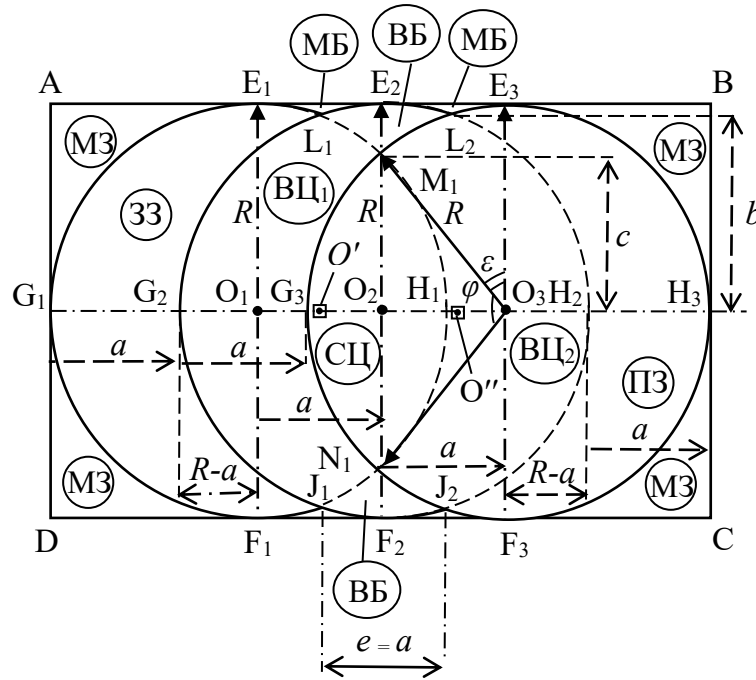
Отже, інформативна зони ВЦ2 в циклі гамма-знімання існує в інтервалі значень  $0 < a < R$  у вигляді, наведеному на рис. 4, а.

Площа сукупної мертвої зони МЗ за один цикл гамма-знімання обчислюється, згідно з (1), за формулою:

$$S_{M3} = R^2 (4 - \pi). \quad (15)$$

На рис. 5 показано схему збору квантів гамма-випромінювання полем зору детектора із земної поверхні впродовж двох циклів на маршруті польоту БПЛА, за якого кінець першого циклу є водночас початком другого циклу гамма-знімання. Система попередньої обробки сигналів від гамма-детектора миттєво передає сигнал, зібраний за попередній цикл, для подальшої обробки та знову виконує збір гамма-квантів під час другого циклу [12].

Відстань  $e$  між центрами першого та другого циклів дорівнює  $a$ . Це зрозуміло з рис. 4, а, оскільки точка  $O$  – центр першого циклу знаходиться на лінії  $L_1J_1$ , яка є лінією симетрії стосовно ліній  $E_1F_1$  та  $E_2F_2$  і розташована стосовно них на відстані  $a/2$ . Так само (див. рис. 5) центр другого циклу знаходиться на лінії  $L_2J_2$ , яка є лінією симетрії стосовно ліній  $E_2F_2$  та  $E_3F_3$  і розташована стосовно кожної з них на відстані  $a/2$ . Отже, відстань між



**Рис. 5.** До збору квантів гамма-випромінювання полем зору детектора із земної поверхні впродовж двох циклів на маршруті польоту БПЛА за умови  $0 < a < R$

лініями  $L_1J_1$  та  $L_2J_2$ , на яких знаходяться центри двох циклів  $O'$  та  $O''$ , дорівнює  $a$ .

З рис. 5 зрозуміло, що загальна площа знімання впродовж двох циклів складається із суми площ двох півкругів радіуса  $R$  і площі прямокутника  $E_1E_2E_3O_3F_3F_2F_1O_1$ . Тож площа двох циклів гамма-знімання визначається за формулою:

$$S_{z_2} = R(\pi R + 2 \cdot 2a). \quad (16)$$

З попередніх міркувань зрозуміло, що інформативними зонами в цьому випадку будуть такі:  $G_2L_1M_1H_1N_1J_1$  – у першому циклі, яку позначимо як  $BЦ_1$ , і  $G_3M_1L_2H_2J_2N_1$  – у другому циклі, яку позначимо як  $BЦ_2$ , що перетинаються по лінії  $G_3M_1H_1N_1$  та утворюють середню інформативну зону, яку позначимо як  $CЦ$ . Тож малоінформативними зонами впродовж двох циклів можна вважати зони: дві крайні –  $G_1E_1L_1G_2J_1F_1$  (ЗЗ) та  $H_3F_3J_2H_2L_2E_3$  (ПЗ); дві бічні –  $E_1E_2E_3L_2M_1L_1$  та  $F_1J_1N_1J_2F_3F_2$ , які позначимо  $BБ$ .

Площі двох останніх зон можна визначити так. Площа половини зони  $E_1E_2E_3L_2M_1L_1$  належить зоні  $E_2E_3L_2M_1$ , площу якої можна визначити як площу чотирикутника  $E_2E_3O_3O_2$

без площі прямокутного трикутника  $O_2M_1O_3$  і площі сектора  $O_3M_1E_3$ . Тоді сукупна площа двох бічних малоінформативних зон  $BБ$  визначається за формулою:

$$S_{2BБ} = 2a(2R - c) - \pi R^2 \left(1 - \frac{\phi^\circ}{180^\circ}\right) = R \left[4a - \pi R \left(1 - \frac{\phi^\circ}{180^\circ}\right)\right] - 2ac. \quad (17)$$

Площа зони  $CЦ$  складається з площ двох сегментів  $G_3M_1O_2N_1$  та  $O_2M_1H_1N_1$ , а саме:

$$S_{CЦ} = R^2 \left(\frac{\pi \phi^\circ}{180^\circ} - \sin \phi\right). \quad (18)$$

Сукупна площа інформативної зони за два цикли буде складатися із суми площ інформативних зон  $BЦ_1$  та  $BЦ_2$ , площа кожної з них визначається за формулою (4), без площі двох сегментів  $G_3M_1O_2N_1$  та  $O_2M_1H_1N_1$ , які утворюють зону  $CЦ$ , а саме:

$$S_{I_2} = R^2 \left[\frac{\pi}{180^\circ} (2\beta^\circ - \phi^\circ) - (2 \sin \beta - \sin \phi)\right]. \quad (19)$$

Довжина зони гамма-знімання за два цикли становитиме таке(див. рис. 5):

$$L_2 = 2R + 2a. \quad (20)$$

На рис. 6 наведено схему збору квантів гамма-випромінювання полем зору детектора із земної поверхні впродовж п'яти циклів на маршруті польоту БПЛА. Для спрощення на рис. 5 велика центральна інформативна зона першого циклу виду  $G_2L_1M_1H_1N_1J_1$  на рис. 6 дістала позначення  $L_1$  (Long), велика інформативна зона другого циклу має позначення  $L_2$ , п'ятого циклу –  $L_5$ . Перша в маршруті середня центральна інформативна зона виду  $G_3M_1H_1N_1$  (СЦ – див. рис. 5) дістала позначення  $M_1$  (Middle), друга середня центральна інформативна зона маршруту СЦ<sub>2</sub> має позначення  $M_2$ , четверта –  $M_4$ .

Площа  $n$  циклів гамма-знімання в маршруті визначається за формулою:

$$S_n = R(\pi R + 2na), \quad (21)$$

що для  $n = 1$  та  $n = 2$  дає змогу отримати формули (2) та (16).

Сукупна інформативна зона на рис. 6 починається й закінчується сегментами виду  $G_2K_2O_1K_3$ , що відповідають зоні ВЦ<sub>1</sub>, площа якої обчислюється за формулою (13). Між сегментами знаходяться п'ять фігур виду

$O_1K_2L_1M_1O_2N_1J_1K_3$ , кожна з яких відповідає зоні ВЦ<sub>2</sub>, площа якої обчислюється за формулою (14). Це дає можливість отримати формулу обчислення сукупної площі інформативної зони для  $n$  циклів гамма-знімання в маршруті ( $0 < a < R$ ):

$$S_n = R^2 \left\{ (\pi/180^\circ) [n\beta^\circ - (n-1)\phi^\circ] + (n-1)\sin\phi^\circ - n \cdot \sin\beta^\circ \right\}. \quad (22)$$

Для  $n=2$  із (22) випливає формула (19), а для  $n=1$  – формула (4).

Бічні малоінформативні зони мають таку особливість. Кожні два цикли гамма-знімання утворюють великі бічні малоінформативні зони виду  $E_1E_2E_3L_2M_1L_1$  (ВБ<sub>1</sub>), які на рис. 6 позначені як ВБ<sub>1</sub>. Ці зони поєднуються між собою за допомогою малих бічних малоінформативних зон виду  $E_2E_3L_2$  (МБ<sub>1</sub>), які на рис. 6 позначені МБ<sub>1</sub>. З огляду на наведену закономірність, можна вивести формулу для визначення площі сукупної бічної малоінформативної зони в маршруті для  $n$  циклів гамма-знімання ( $0 < a < R$ ):

$$S_{2E_n} = R \left\{ 2an - \pi R \left[ 1 - \frac{\phi^\circ}{180^\circ} (n-1) + \frac{\beta^\circ}{180^\circ} (n-2) \right] \right\} - 2ac(n-1) + ab(n-2). \quad (23)$$

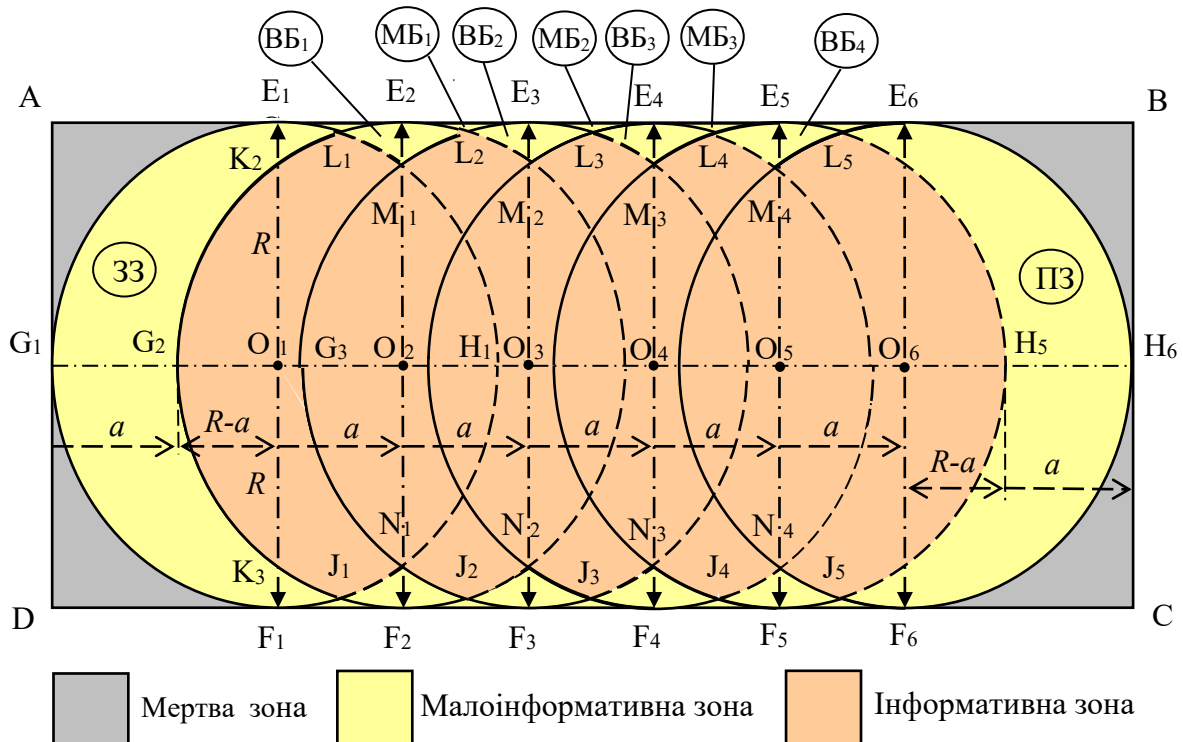


Рис. 6. До збору гамма-квантів полем зору детектора із земної поверхні впродовж п'яти циклів на маршруті польоту БПЛА за умови  $0 < a < R$



Для  $n=1$  із формули (23) випливає формула (8)  $S_{2E_1} = S_{2MB}$ , для  $n=2$  з формули (23) випливає формула (17)  $S_{2E_2} = S_{2BB}$ .

Сукупна площа малоінформативної зони для  $n$  циклів гамма-знімання у маршруті  $S_{M_n}$  складатиметься із суми площ задньої (ПЗ) та передньої (ПЗ) малоінформативних зон, площі яких визначаються за формулою (5), і площі сукупної бічної малоінформативної зони, яка визначається за формулою (23). Отже, для  $0 < a < R$

$$S_{M_n} = R \left\{ 2na + \pi R \left[ 1 + (n-1) \frac{\phi^\circ}{180^\circ} - n \frac{\beta^\circ}{180^\circ} \right] + 2R \sin \beta \right\} - 2(n-1)ac + (n-2)ab. \quad (24)$$

Довжина маршруту для п'яти циклів гамма-знімання, згідно з рис. 6, обчислюється за формулою  $L_5 = 2R + 5a$ . Порівняння формул (9) для  $L_1$  та (20) для  $L_2$  дає змогу написати формулу довжини маршруту для  $n$  циклів гамма-знімання на маршруті

$$L_n = 2R + na. \quad (25)$$

На рис. 7 наведено розташування полів зору детектора під час збору квантів гамма-випромінювання із земної поверхні впродовж

двох циклів на маршруті польоту БПЛА, коли  $R \leq a < 2R$ .

З рис. 7 зрозуміло, що для одного циклу збору квантів гамма-випромінювання полем зору детектора в маршруті площа зони збору складається з двох половин круга  $G_1E_1O_1F_1$  та  $O_2E_2H_2F_2$  і прямокутника  $E_1E_2O_2F_2F_1O_1$ , дорівнює  $S_{Z_1} = R(\pi R + 2a)$ , для двох циклів збору, відповідно,  $S_{Z_2} = R(\pi R + 4a)$ .

Це в підсумку дає змогу отримати формулу визначення сукупної площі гамма-знімання для  $n$  циклів у маршруті у вигляді (21).

Із рис. 7 зрозуміло, що інформативна зона  $G_2L_1H_1T_1$  складається з двох рівновеликих сегментів  $G_2L_1N_1T_1$  та  $N_1L_1H_1T_1$ . Отже, площа інформативної зони для одного циклу збору квантів гамма-випромінювання полем зору детектора визначається за формулою  $S_{I_1} = R^2 \left[ \left( \frac{\pi \beta^\circ}{180^\circ} \right) - \sin \beta \right]$ , для двох циклів збору квантів гамма-випромінювання – за формулою  $S_{I_2} = 2R^2 \left[ \left( \frac{\pi \beta^\circ}{180^\circ} \right) - \sin \beta \right]$ . Зрозуміло, що для  $n$  циклів збору квантів гамма-випромінювання полем зору детектора в маршруті площа сукупної інформативної зони визначається за формулою:

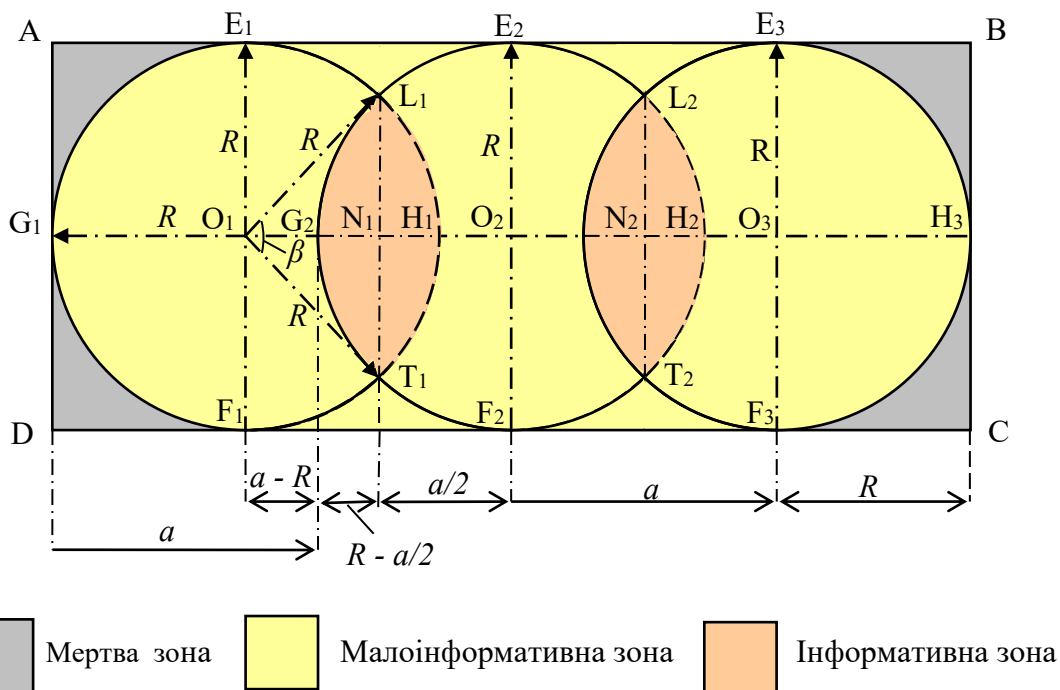


Рис. 7. До збору квантів гамма-випромінювання полем зору детектора із земної поверхні впродовж двох циклів на маршруті польоту БПЛА за умови  $R \leq a < 2R$

$$S_{I_n} = nR^2 \left( \frac{\pi\beta^\circ}{180^\circ} - \sin\beta \right), \quad (26)$$

де  $\beta$  визначається за формулою (3).

З рис. 7 видно, що довжина інформативної зони становить  $2R - a$ . Ця зона зникає, коли  $a = 2R$ . Тоді, згідно з формулою (3),  $\beta = 0$ , а згідно з формулою (26),  $S_{I_n} = 0$ . Отже, інформативні зони в циклі гамма-знімання існують в інтервалі значень  $R \leq a < 2R$  у вигляді, наведеному на рис. 7.

З рис. 7 зрозуміло, що площа малоінформативної зони в кожному з циклів буде складатися із сукупної площі зони гамма-знімання без площі інформативної зони. Тому сукупна площа малоінформативної зони для  $n$  циклів збору квантів гамма-випромінювання полем зору детектора в маршруті буде визначатися як різниця сукупної площі зони гамма-знімання  $S_{Z_n}$  і сукупної площі інформативної зони  $S_{I_n}$  у вигляді:

$$S_{M_n} = R \left\{ R \left[ \pi \left( 1 - n \frac{\beta^\circ}{180^\circ} \right) + n \sin\beta \right] + 2na \right\}. \quad (27)$$

Довжина маршруту гамма-знімання для одного циклу, згідно з рис. 7, становитиме  $L_1 = 2R + a$ , для двох циклів  $L_2 = 2R + 2a$ , що дає змогу для  $n$  циклів гамма-знімання в маршруті використати формулу (25). Площа «мертвої» зони обчислюється за формулою (15).

Згідно з рис. 4,  $a$  середина циклу – точка  $O$  є також центром інформативної зони ВЦ. Ця точка рівновіддалена від меж інформативна зони ВЦ: по осі маршруту, на відстань  $d$  від точок  $G_2$  та  $H_1$ , поперек маршруту, на відстань  $b$  від точок  $L_1$  і  $J_1$ . Якщо точці  $O$  завдяки GPS надаються координати, межі інформативної зони ВЦ вздовж і поперек маршруту гамма-знімання стосовно точки  $O$  дорівнюють з урахуванням (10), відповідно,

$$x = \pm d = \pm \left( R - \frac{a}{2} \right), \quad (28)$$

$$y = \pm b. \quad (29)$$

Згідно з рис. 4,  $a$  та з урахуванням формули (9), межі зони гамма-знімання стосовно точки  $O$  вздовж і поперек маршруту визначаються за формулами, відповідно,

$$x_{\max} = \left| \frac{L_1}{2} \right| = \pm \left( R + \frac{a}{2} \right), \quad (30)$$

$$y_{\max} = \pm R. \quad (31)$$

Якщо на лінії  $G_1 - G_2$  (див. рис. 4,  $a$ ) під час гамма-знімання поблизу точки  $G_1$  з'явиться локальний максимум значеної інтенсивності радіаційного випромінювання, то частина гамма-квантів від нього все ж надійде в поле зору гамма-детектора й може бути більшою від гамма-квантів, зібраних від фонового випромінювання в середині інформативної зони ВЦ. Це ж стосується й точок у зонах бічних малоінформативних зонах МБ, розташованих поблизу ліній  $E_1 - E_2$  та  $F_1 - F_2$ . Отже, можна констатувати, що для випадку одного циклу гамма-знімання фіксація підвищеної інтенсивності гамма-випромінювання свідчить про те, що його локальний максимум має ймовірне розташування стосовно середини циклу  $O$  вздовж і поперек маршруту в межах  $x, y$ , але не далі, ніж  $x_{\max}, y_{\max}$ . З рис. 3,  $a$  видно, що локальні максимуми радіаційного випромінювання знаходяться на осях ліній маршрутів. Насправді вони можуть знаходитися поза лініями маршрутів на ймовірній відстані  $\pm b$ , але не далі відстані  $\pm R$ , згідно з формулами (29) і (31).

Якщо інформативні зони перекриваються, то ситуація з визначенням місцеположення локального максимуму дещо змінюється. Наприклад (див. рис. 5), якщо локальний максимум знаходиться в середині зони  $G_2L_1M_1G_3N_1J_1$ , то гамма-кванти від нього надійдуть до інформативної зони ВЦ<sub>1</sub>. Тоді збільшення інтенсивності гамма-випромінювання буде прив'язано до середини першого циклу – точки  $O'$ . Якщо ж локальний максимум знаходиться в зоні  $L_2H_2J_2N_1H_1M_1$ , то збільшення інтенсивності гамма-випромінювання буде відмічено в другому циклі та прив'язано лише до точки  $O''$ . Якщо ж локальний максимум знаходиться в середині зони перекриття СЦ, яка належить обом інформативним зонам ВЦ<sub>1</sub> і ВЦ<sub>2</sub>, то збільшення інтенсивності гамма-випромінювання буде відмічено в обох циклах із прив'язкою до середин першого та другого циклів – до точок  $O'$  та

$O''$ , які знаходяться на відстані  $e = a$  одна від одної. Розміри зони СЦ складають уздовж і поперек маршруту  $a/2$  та  $c$ . Однак, якщо в середині зон  $G_2L_1M_1G_3N_1J_1$  та  $L_2H_2J_2N_1H_1M_1$  знаходиться по одному локальному максимуму близької інтенсивності гамма-випромінювання, то ця подія буде прив'язано знову до точок  $O'$  та  $O''$ , що говорить про неоднозначність визначення ймовірного положення локальних максимумів. Це питання потребує подальшого вивчення.

Застосування наведеного математичного апарату можна розглянути на конкретному прикладі. Нехай потрібно виконати гамма-знімання за допомогою БПЛА на маршруті довжиною  $L=1$  км. Висота польоту БПЛА становить  $H=30$  м, поле зору детектора гамма-випромінювання дорівнює  $\omega=90^\circ$  [13], частота збору гамма-квантів детектором дорівнює  $f=1$  Гц, швидкість польоту БПЛА на трасі знімання становить  $v=10$  м/с [5]. Тоді тривалість циклу  $\Delta t = 1/1c^{-1} = 1$  с. Радіус поля зору детектора на земній поверхні дорівнює  $R = 30m \times \text{tg}(90^\circ/2) = 30m$ . Зсув поля зору детектора за тривалість циклу 1 с становитиме  $a = 10m \cdot c^{-1} \times 1c = 10m$ . Оскільки  $a < R$ , то для розрахунків потрібно використати схему збору квантів гамма-випромінювання полем зору детектора із земної поверхні, наведену на рис. 6, і відповідні їй формули. Так, згідно з (25), число циклів гамма-знімання на маршруті довжиною 1 км можна визначити за формулою:

$$n = \frac{L - 2R}{a} \quad (32)$$

Необхідні проміжні параметри  $\beta, \varphi, b, c, d$  обчислюються за формулами (3), (12) (7), (11), (10) (лінійні й кутові елементи розраховано до 7 чи 8 значущих цифр, щоб забезпечити точність подальшого обчислення площ до  $0,1$  м<sup>2</sup>). Значення проміжних параметрів наведено в таблиці 1. Відстань  $e$  між центрами суміжних циклів гамма-знімання, згідно з рис. 5, дорівнює  $e = a = 10$  м.

Згідно з формулами (9), (21), (22), (24), обчислено таке: довжину одного циклу гамма-знімання  $L_1$ ; загальну площу гамма-знімання в маршруті  $S_z$ ; сукупну площу

інформативної зони в маршруті  $S_I$ ; сукупну площу малоінформативних зон у маршруті  $S_M$  (таблиця 2). Контролем розрахунків указаних площ є таке:  $S_z = S_I + S_M = 102094,9$  м<sup>2</sup>. Відношення площі сукупної інформативної зони до площі гамма-знімання в маршруті становить  $(S_I/S_z)=94,9\%$ . За формулами (4) і (18) обчислено таке: площу інформативної зони ВЦ в одному циклі гамма-знімання  $S_{ВЦ}$ ; або площу середньої центральної зони СЦ, яка є площею перекриття зон гамма-знімання за два цикли  $S_{СЦ}$ . Поздовжнє перекриття між циклами гамма-знімання становить  $(S_{СЦ}/S_{ВЦ})=74,0\%$ . Сукупна площа мертвої зони визначена за формулою (1) і становить  $772,6$  м<sup>2</sup>.

Оскільки відношення площі сукупної інформативної зони до площі гамма-знімання в маршруті становить  $(S_I/S_z)=94,9\%$ , то відносна площа сукупної малоінформативної зони –  $5,1\%$  від всієї площі гамма-знімання в маршруті довжиною 1 км, або у абсолютному вимірі  $3040$  м<sup>2</sup>. Щоб краще уявити розмір цієї площі, з якої якісно не зібрано гамма-кванти, а отже, достовірно не визначено параметри гамма-випромінювання, можна порівняти її з площею футбольного поля, яка дорівнює наприклад,  $4050$  м<sup>2</sup> [14]. Отже, площа сукупної малоінформативної зони становить три чверті від його площі на один кілометр маршруту. Площа сукупної малоінформативної зони утворена в основному за рахунок бічних великих і меншою мірою малих малоінформативних зон і частково за рахунок наявності задньої та передньої малоінформативних зон на початку й у кінці маршруту (див. рис. 5). Про це свідчить розмір зони СЦ поперек маршруту  $c=28,28$  м (див. таблицю 1, рис. 5), який менший від радіуса поля зору детектора на земній поверхні  $R=30$  м на  $1,72$  м і відповідає поперечному розміру  $E_2M_1$  малоінформативної зони ВБ, тоді як розмір зони ВЦ поперек маршруту  $b=29,58$  м менший за радіус усього на  $0,48$  м й відповідає поперечному розміру малоінформативної зони МБ. Отже, необхідно ліквідувати бічні малоінформативні зони шляхом забезпечення поперечного перекриття між маршрутами гамма-знімання щонайменше на  $2$  м. Це необхідно врахувати під час пла-

Таблиця 1

## Значення проміжних параметрів

Позначення	$\Delta t, c$	$R, m$	$a = e, m$	$n$	$b, m$	$c, m$	$d, m$	$\beta^\circ$	$\varphi^\circ$
Значення	1	30	10	94	29,58040	28,28427	25	160,81186	141,05756

Таблиця 2

## Значення кінцевих параметрів

Позначення	$L_p, m$	$S_z, m^2$	$S_p, m^2$	$S_{SP}, m^2$	$(S_I/S_Z), \%$	$S_{LC}, m^2$	$S_{MC}, m^2$	$(S_{MC}/S_{LC}), \%$
Значення	70	59227,4	56187,1	3040,3	94,9	2230	1650	74,0

нування польотів БПЛА над територією радіаційного забруднення. Крім того, необхідно врахувати й наявність мертвих зона на кінцях маршрутів. Для цього потрібно щонайменше, щоб діаметр першого кола циклу гамма-знімання на маршруті (див. рис. 6 – лінія  $E_1F_1$ ) був суміщений із початком території аерознімання (лінією AD) і знаходився на відстані  $R$  перед нею, а діаметр кола останнього циклу  $E_6F_6$  аерознімання виходив на цю ж відстань за межі ВС території аерознімання. У цьому випадку будуть ліквідовані й малоінформативні зони ЗЗ та ПЗ. Це теж потрібно врахувати під час планування польотів БПЛА.

Виявлені в циклах гамма-знімання локальні максимуми радіаційного випромінювання можуть знаходитися поза лініями маршрутів на ймовірній відстані  $\pm 29,58$  м, але не далі відстані  $\pm 30$  м, згідно з формулами (29) і (31).

**Висновки.** У результат теоретичних досліджень отримано математичний апарат для визначення розмірів і площ зон на маршруті аерознімання з БПЛА території радіаційного

забруднення з використанням гамма-детектора рухливого типу, які відрізняються за якістю збору гамма-квантів полем зору детектора й, відповідно, поділяють площу гамма-знімання на інформативні зони, у яких поле зору детектора перебуває впродовж часу, протягом якого детектор здатен повною мірою здатен реагувати на зміну інтенсивності радіоактивного випромінювання від земної поверхні згідно із заявленою виробником частотою роботи детектора, і малоінформативні зони, де поле зору детектора перебуває менше вказаного часу.

Одним із показників якості виконання аерознімання з БПЛА може бути збільшення відношення площі сукупної інформативної зони до площі гамма-знімання в маршруті. Наведено приклад розрахунків розмірів і площ вказаних зон на маршруті аерознімання.

Результати наведених досліджень можуть бути корисними для планування маршрутів гамма-знімання з БПЛА й аналізу якості виконаного аерознімання.

## Список використаних джерел:

1. Паспорт спеціальності 05.24.01 – геодезія, фотограмметрія і картографія / Офіційний вебпортал парламенту України. URL: <https://zakon.rada.gov.ua/rada/show/v0047330-07#top> (дата звернення: 14.06.2024).
2. Гера О.В. Перспективи використання БПЛА для спостережень за станом об'єктів інфраструктури аеропортів. *Airport Planning, Construction and Maintenance Journal*. 2024. Вип. 1 (3). С. 30–35. DOI: <https://doi.org/10.32782/apcmj.2024.3.4>.
3. Tereshchuk O.I., Kryachok S.D., Belenok V.Iu., Malik T.M., Hebryn-Baidy L.V. Robotic complex for the runway leveling. Device for automated leveling. *News of the Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan / Kazakh national research technical university named after K. I. Satpayev. Series of geology and technical sciences*. 2021. Vol. 2. P. 180–188. <https://doi.org/10.32014/2021.2518-170X.51>.
4. Sato Yuki, Ozawa Shingo, Terasaka Yuta, Kaburagi Masaaki, Tanifuji Yuta, Kawabata Kuniaki, Nakamura Miyamura Hiroko, Izumi Ryo, Suzuki Toshikazu, Torii Tatsuo. Remote radiation imaging system using a compact gamma-ray imager mounted on a multicopter drone. *Journal of Nuclear Science and Technology*. 2018. № 55:1, P. 90–96. DOI: 10.1080/00223131.2017.1383211.
5. Burtniak V., Zabulonov Yu., Stokolos Ma., Bulavin Le., Krasnoholovet V. Application of a territorial remote radiation monitoring system at the Chernobyl nuclear accident site. *J. Appl. Remote Sens.* 2018. Vol. 12 (4). P. 1–13. DOI: 10.1117/1.JRS.12.046007.

6. Rudolph C., Knoedler B., Heinskill J. Comparable data evaluation method for a radio-nuclear sensor when used onan UAV. *Paper presented at the Proceedings of IEEE Sensors*. 2020. <https://doi.org/10.1109/SENSORS47125.2020.9278612>.
7. Lüleý J., Vrban B., Cerba S., Osuský F., Necas, V. Unmanned Radiation Monitoring System. EPJ Web of Conferences 225, 08008 (2020). <https://doi.org/10.1051/epjconf/202022508008>.
8. Махньов О.І. Розробка оптимальної конструкції системи візуалізації гамма-випромінювання. *Електронні системи та сигнали*. 2019. Вип. 2. №. 3. С. 6–10.
9. Lüleý J., Vrban B., Cerba S., Osuský F., Necas, V. Unmanned Radiation Monitoring System. EPJ Web of Conferences 225, 08008 (2020). <https://doi.org/10.1051/epjconf/202022508008>.
10. Pavlovsky R., Haefner A., Joshi T.H., Negut V., McManus K., Suzuki E., Barnowski R., Vetter K. 3-D Radiation Mapping in Real-Time with the Localization and Mapping Platform LAMP from Unmanned Aerial Systems and Man-Portable Configurations. URL: <https://www.semanticscholar.org/reader/751a68f57b684c6cf3a1e6de3f6c42a5a321e144> (дата звернення: 22.06. 2024).
11. Guidelines for Radioelement Mapping Using Gamma Ray Spectrometry Data; TECDOC 1363; International Atomic Energy Agency: Vienna, Austria, 2003. URL: [https://www-pub.iaea.org/mtcd/publications/pdf/te\\_1363\\_web.pdf](https://www-pub.iaea.org/mtcd/publications/pdf/te_1363_web.pdf) (дата звернення 22.06. 2024).
12. Chierici A., Malizia, A., Di Giovanni D., Ciolini R., d’Errico F. A. High-Performance Gamma Spectrometer for Unmanned Systems Based on Off-the-Shelf Components. *Sensors*.2022. № 22. P.1 -18. DOI: <https://doi.org/10.3390/s22031078>.
13. Brewer E.T. Autonomous localization of  $1/r^2$  sources using an aerial platform. Master’s thesis, Faculty of the Virginia Polytechnic Institute and State University, Blacksburg, Virginia, 2009. URL: [https://www.researchgate.net/publication/279467052\\_Autonomous\\_Localization\\_of\\_1R2\\_Sources\\_Using\\_an\\_Aerial\\_Platform](https://www.researchgate.net/publication/279467052_Autonomous_Localization_of_1R2_Sources_Using_an_Aerial_Platform) (дата звернення 22.06.2024).
14. Футбольне поле: розмір та розмітка. URL: <https://jutagrass.com.ua/pravila/trebovaniya-k-razmetke-i-razmeram-futbolnogo-polya/> (дата звернення 22.06.2024).

#### References:

1. Pasport spetsialnosti 05.24.01 – heodeziya, fotogrammetriya ta kartografiya [Specialty passport 05.24.01 – geodesy, photogrammetry and cartography]. *Ofitsiynyy sayt Verkhovnoyi Rady Ukrayiny – Official website of the Parliament of Ukraine*. (June 14th, 2024). Retrieved from: <https://zakon.rada.gov.ua/rada/show/v0047330-07#top> [in Ukrainian].
2. Hera, O. (2024). Perspektivy vykorystannya BPLA dlya monitorynhu stanu obyektiv infrastruktury aeroportu [Prospects for the use of UAVs for monitoring the condition of airport infrastructure facilities]. *Airport Planning, Construction and Maintenance Journal*, 1 (3), 30–35. <https://doi.org/10.32782/apcmj.2024.3.4> [in Ukrainian].
3. Tereshchuk, O., Kryachok, S., Belenok, V., Malik, T., & Hebryn-Baidy, L. (2018). Device for automated leveling. *News of the Academy of Sciences of the Republic of Kazakhstan, Series of geology and technical sciences*, 2, 180–188. DOI: <https://doi.org/10.32014/2021.2518-170X.51> [in English].
4. Yuki, S., Shingo, O., Yuta, T., Masaaki, K., Yuta, T., Kuniaki, K., Hiroko, N., Ryo, I., Toshikazu, S., & Tatsuo, T. (2018). Remote radiation imaging system using a compact gamma-ray imager mounted on a multicopter drone. *Journal of Nuclear Science and Technology*, 55:1, 90–96. DOI: <https://doi.org/10.1080/00223131.2017.1383211> [in English].
5. Burtniak, V., Zabulonov, Y., Stokolos, M., Bulavin, L., & Krasnoholovets, V. (2018). Application of a territorial remote radiation monitoring system at the Chernobyl nuclear accident site. *Remote Sens*, 12(04), 1–13. DOI: <https://doi.org/10.1117/1.jrs.12.046007> [in English].
6. Rudolph, C., Knoedler, B., & Heinskill, J. (2020). Comparable data evaluation method for a radio-nuclear sensor when used onan UAV. *Paper presented at the Proceedings of IEEE Sensor*. DOI: <https://doi.org/10.1109/SENSORS47125.2020.9278612>.
7. Lüleý J., Vrban, B., Cerba S., Osuský, F., & Necas, V. (2020). *Unmanned Radiation Monitoring System*. EPJ Web of Conferences 225, 08008 (2020). DOI: <https://doi.org/10.1051/epjconf/202022508008> [in English].
8. Makhnyev, O. (2019). Rozrobka optymalnoyi konstruktsiyi systemy vizualizatsiyi hamma-vyprominyuvannya [Development of the optimal design of the gamma radiation imaging system]. *Elektronni systemy ta syhnaly – Electronic systems and signals*, 2(3), 6–10 [in Ukrainian].
9. Lüleý, J., Vrban, B., Cerba, S., Osuský, F., & Necas, V. *Unmanned Radiation Monitoring System*. EPJ Web of Conferences 225, 08008 (2020). DOI: <https://doi.org/10.1051/epjconf/202022508008> [in English].
10. Pavlovsky, R., Haefner, A., Joshi, T., Negut, V., McManus, K., Suzuki, E., Barnowski, & R., Vetter, K. 3-D Radiation Mapping in Real-Time with the Localization and Mapping Platform LAMP from Unmanned Aerial



Systems and Man-Portable Configurations. (June 22th, 2024). Retrieved from: <https://www.semanticscholar.org/reader/751a68f57b684c6cf3a1e6de3f6c42a5a321e144> [in English].

11. Guidelines for Radioelement Mapping Using Gamma Ray Spectrometry Data. (2003). *TECDOC 1363; International Atomic Energy Agency: Vienna, Austria*. (June 22th, 2024). Retrieved from [https://www-pub.iaea.org/mtcd/publications/pdf/te\\_1363\\_web.pdf](https://www-pub.iaea.org/mtcd/publications/pdf/te_1363_web.pdf) [in English].

12. Chierici, A., Malizia, A., Di Giovanni, D., Ciolini, R., & d'Errico, F. A. (2022). High-Performance Gamma Spectrometer for Unmanned Systems Based on Off-the-Shelf Components. *Sensors* 22, 1–18. DOI: <https://doi.org/10.3390/s22031078> [in English].

13. Brewer, E.T. (2009). Autonomous localization of  $1/r^2$  sources using an aerial platform. *Master's thesis, Faculty of the Virginia Polytechnic Institute and State University, Blacksburg, Virginia*. (June 22th, 2024) Retrieved from: [https://www.researchgate.net/publication/279467052\\_Autonomous\\_Localization\\_of\\_1R2\\_Sources\\_Using\\_an\\_Aerial\\_Platform](https://www.researchgate.net/publication/279467052_Autonomous_Localization_of_1R2_Sources_Using_an_Aerial_Platform) [in English].

14. Futbolne pole: rozmiry ta rozmitka [Football field: size and marking]. (June 22th, 2024). Retrieved from <https://jutagrass.com.ua/pravila/trebovaniya-k-razmetke-i-razmeram-futbolnogo-polya/> [in Ukrainian].