

ДИСТАНЦИОННИ МЕТОДИ ЗА ГАМА-КАРТОГРАФИРАНЕ С ПОМОЩТА НА БЕЗПИЛОТНИ ЛЕТАТЕЛНИ СРЕДСТВА (БЛС)

ИВАН ИЛИЕВ^{1,2}, ПЛАМЕН ДАНКОВ¹

¹ Катедра „Радиофизика и електроника“

² „Тета Консулт“ ООД, София, България

Иван Илиев, Пламен Данков. ДИСТАНЦИОННИ МЕТОДИ ЗА ГАМА-КАРТО-ГРАФИРАНЕ С ПОМОЩТА НА БЕЗПИЛОТНИ ЛЕТАТЕЛНИ СРЕДСТВА (БЛС)

Разгледана е технологията за дистанционно картографиране на терени с предполагаемо гама радиоактивно замърсяване с помощта на безпилотни летателни системи (БЛС). Дискутират се принципите на избор на гама-детектор, подходящ за вграждане в БЛС. Описани са подходите за създаване на летателен план при линеен и точков модел на облитане и техниките на картографиране на гама-радиоактивното замърсяване. Представени са данни от тестово измерване на изкуствено създадено радиоактивно замърсяване и са разгледани техниките за събиране на данни. Накрая е представен конкретен пример за обработване на получените резултати и създаване на карта на предполагаемото радиоактивно замърсяване.

Ivan Iliev, Plamen Dankov. DISTANCE METHODS FOR GAMMA-MAPPING WITH UNMANNED AERIAL VEHICLES (UAV)

The technology for remote mapping of terrains with suspected gamma radioactive contamination using unmanned aerial vehicles (UAV) has been explored. The principles of selection of gamma-detectors suitable for embedding in UAV have been discussed. Described are the approaches to creating a flight plan for a line and point model for data collection from the terrain and the techniques of gamma-radioactive contamination mapping. Test data from artificially generated radioactive contamination are presented and data collection techniques are described. Finally, a concrete example has been given for data processing and mapping of the supposed radioactive contamination.

За контакт: Иван И. Илиев, „Тета Консулт“ ООД, бул. Дж. Баучър 5А, 1164 София, тел.: +359 888 550 089, E-mail: i.iliev@thetaconsult.com

Keywords: airborne remote sensing, radioactive pollution, gamma-background, scintillating detector, CsI, gamma-mapping, UAV

PACS numbers: 89.60.-k, 98.70.Vc, 29.40.-n, 92.60.hx, 89.90.+n

1. ВЪВЕДЕНИЕ

За изследване на обширни територии от земната повърхност и близко прилежащата атмосфера – картографиране, земеделие, природни бедствия и катаклизми, аварии, дива природа, населени територии, автомобилен трафик, качество на водата и въздуха, локални замърсявания и пр., един от най-подходящите методи е наблюдението от въздуха (airborne remote sensing). Към тази широка категория от дейности можем да прибавим и дистанционното изследване на радиоактивни замърсявания от въздуха.

Ако знаем местоположението на дадено радиоактивно замърсяване на земята, можем да се насочим към него с подходящата измервателна апаратура и да го оценим качествено и количествено. За безопасността на персонала, който би извършил подобно измерване с ръчно преносима апаратура или натоварена в движещо се по земната повърхност превозно средство (кола, камион и др.), от съществено значение е информацията за типа на очакваното лъчение. Това може да бъде предвидено чрез познаване на радионуклидният състав на замърсяването. Друга полезна за персонала информация би била една, макар и груба, количествена оценка на активността и нейното разпределение по земната повърхност – дали цялата активност е концентрирана върху по-малка, или разпределена върху по-голяма площ. За да си набавим такава полезна предварителна информация за относително големи територии, най-удобно би било да ги облетим с летателен апарат (пилотируем или безпилотен), носещ на борда спектрометрични детектори за радиоактивност.

Гама-лъчението е дълбоко проникващо йонизиращо лъчение (радиация) от естествени или изкуствени източници и затова гама-спектрометрията е много мощен инструмент за мониторинг и оценка на радиацията в околната среда. Изследванията на гама-лъчението се извършват от въздухоплавателни средства, полеви превозни средства, пеша, в сондажи, на морското дъно и в лаборатории. Наземните и особено въздушните измервания на гама-лъчение обхващат големи участъци от земната повърхност. Много национални и регионални организации са съставили и публикували подробни гама-радиометрични карти. Такива стандартизирани карти на наземните концентрации на радиация и радиоактивни материали могат да бъдат сравнени и регионално обединени, показвайки общи регионални тенденции в радионуклидното разпространение и извършване на радиологичната оценка на околната среда. Този процес се поддържа изключително активно от International Atomic Energy Agency (IAEA) [1–4].

Гама-картографията от въздуха с пилотируеми летателни системи датира от десетки години. Най-активни са държавите и организациите, които изследват обширни и труднодостъпни територии (например в Австралия [5]). Тук има натрупан много опит, включително и в България [6–8].

Идеята за използване на безпилотни летателни системи (БЛС) за дистанционна гама-радиометрия и гама-картографиране датира от по-скоро време – от 10–11 години. В обзора [9] е дадена подробна картина на развитието на тази методика. Всъщност по-сериозно развитие идеята претърпява след ядрения инцидент във Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant през март 2011 г., като след тази година започва да се гледа много по-сериозно и на дистанционните измервания при аварии с помощта на управляеми роботи (вж. например [10]), каквито са БЛС (или дроновете). При това БЛС могат да се прилагат както при радиоактивни инциденти (например [11]) с оглед на получаване на спешна информация без риск за живота на специалистите, работещи по случая, така и за регулярни измервания и картография на локални замърсители (например изследване на ураниевата аномалия в Чехия [12]). Гама-радиоактивните измервания с БЛС могат да се разделят условно на две категории: с безпилотни самолети и с квадрокоптери [9]. Първите се използват за бързи и относително по-груби измервания от височина 30–50 m, а вторите – за по-точни и локализирани измервания от височина типично до 10 m, включително и във вътрешността на сгради и помещения.

За да се изгради гама-карта с добра разделителна способност и в същото време методът ни да бъде икономически ефективен, е нужно да се открие балансът между необходимата чувствителност на детекторната система, от една страна, и скоростта и височината на полета, от друга. По-високата скорост и по-голямата височина позволяват по-бързо облитане на дадена територия, което спестява летателно време и по-бързо се получава резултатът от измерването. За да се постигне това, са необходими детектори с по-голяма чувствителност, което от своя страна увеличава техния обем/тегло и цена. Намирането на баланс между двете се постига чрез решаването на редица физични задачи.

С развитието на безпилотните летателни системи (БЛС) се увеличават и възможностите за картографиране на земната повърхност от въздуха. Към БЛС можем да причислим и малките спътници, които биха ни послужили за наблюдение на радиационната обстановка по орбитата им в близкия Космос (Spaceborn remote sensing) (вж. например [13,14]). БЛС позволяват изследването на територии, криещи различни опасности – както радиационни, така и от всякакъв друг характер, без физически да се застрашава наземният екипаж, управляващ летателното средство. Това тяхно предимство разкрива нови перспективи както за развитието на дозиметрията, така и за службите, реагиращи в аварийни ситуации.

В настоящата работа ние сме споделили опита си от последната година, свързан с приложение на БЛС за дистанционно гама- картографиране. Това включва: анализ на подходящите гама-детектори, анализ и дискусия на лабораторни и полеви експерименти с поставено (изкуствено създадено) радиоактивно замърсяване, съставяне на летателни планове за облитане над замърсяването, обработка на данните и принципите на изграждане на картата на обекта – гама-картографирането. Накрая са направени изводи и обсъдени насоки за бъдещата ни работа по дистанционно гама-картографиране с помощта на БЛС.

2. СЪВМЕСТЕН ПРОЕКТ ЗА ДИСТАНЦИОННА ГАМА-КАРТОГРАФИЯ С ПОМОЩТА НА БЛС МЕЖДУ ФИЗИЧЕСКИЯ ФАКУЛТЕТ И ФИРМА „ТИТА КОНСУЛТ“ ООД

В началото на 2017 г. екип от докторанти от Физическия факултет на Софийския университет „Св. Климент Охридски“, ръководени от доц. Пламен Данков от катедра „Радиофизика и електроника“, започна работа по нов проект, фокусиран върху изследване на възможностите за развитие на дистанционните методи за измерване и оценка на радиационната обстановка върху земната повърхност – на открито и закрито. Това е методът на въздушното гама-картографиране, който е относително нова тематика за екипа на проекта. Членове на този екип са взели участие и в първия и засега единствен експеримент по въздушно гама-картографиране, осъществен от българската фирма „Тита Консулт“ ООД, на относително голяма открита площ на българска територия с помощта на пилотируеми летателни средства [6, 15]. Това е един много успешен експеримент, при който са постигнати значими и използвани за практиката резултати и това дава надежда, че споменатият метод може да се развива и в бъдеще.

Новата цел обаче е използването на БЛС с фиксирано или ротиращо крило, което изисква цялостно преосмисляне на измерителната постановка, използваните детектори, електронните схеми за реализация на дистанционните измервания, придобиване на опит при съставяне на ефективни летателни планове и нов подход при реализация на метода за гама-картографиране.

Като първи проект на екипа в тази област през настоящата година са решени няколко задачи с важно за бъдещото продължаване на работата значение. На първо място това е сравнителен анализ и избор на подходящ гама-детектор и електронна схема за измерване. Това включва проучване, подбор, лабораторни (наземни) експерименти и анализ на налично и ново оборудване с оглед на три важни параметъра – чувствителност на детектора, тегло на цялата измерителна схема и ефективност по отношение на консумацията на енергия от батерията. Следващата важна задача е проучване на приложимостта на метода за дистанционно гама-картографиране с БЛС за различни терени – на открито поле, планинска среда, градска и плътна градска среда и във

вътрешността на сгради. Това е свързано с използването на нов подход и нова технология за създаване на летателния план на използваното БЛС. Много важна задача на проекта е и реализацията на планиран експеримент за гама-картографиране на открита малка площ с оглед на доказване на практическата работоспособност на метода. Това е относително сложен експеримент и допълнително е използвана консултантска помощ на външни за екипа експерти по БЛС. Накрая са обобщени резултатите от проучвателната и експерименталната работа по проекта и е предложен новият метод за относително не много скъпо дистанционно гама-картографиране на малки площи с помощта на БЛС. Получени са и полезни резултати относно чувствителността на метода и експерименталната неопределеност, както и препоръки за бъдещо практическо използване на метода.

С развитието на новите технологии в областта на автоматизацията и по-продължителната автономност на БЛС се откриват и нови възможности за избягване на досег на човека с високи нива на радиоактивност при откриване на такива източници. Подобна радиоактивност би могла да бъде остатъчно замърсяване вследствие на ядрени аварии, замърсяване в близост до уранови мини, в складови помещения, както и повишена естествена радиоактивност в почвата, подпочвените скали и др.

За осигуряване на безопасност на персонала и населението първото необходимо условие е провеждане на дистанционно изследване на радиационната обстановка. Един слабо познат в България метод е въздушното гама-картографиране. Докторант от настоящия екип е имал възможността да участва в първото и вероятно единственото до момента въздушно гама-картографиране, извършено на територията на България от българска фирма със съдействието на Софийския университет „Св. Климент Охридски“. За целта е използвана апаратура, закупена от чуждестранен производител без достатъчно приложен опит в областта. Наблюденията по време на картографирането разкриха много възможности на този дистанционен метод, които не са достатъчно добре развити. Идеите ни за бъдещо развитие на метода и възможността да бъде приложен посредством БЛС ни подтикна към разработването на въпросния проект.

За изследването на познатите методи и развитието на нови ни е необходимо експериментално потвърждение на резултатите. За реализацията на такъв експеримент сме подбрали няколко вида детектори и изчислителна електроника. Тази апаратура се предвижда да работи на борда на БЛС по време на полет. Това предполага високи изисквания към чувствителността и бързодействието от физична гледна точка. От техническа гледна точка за продължителен и ефективен полет е необходимо апаратурата да бъде лека и с понижена консумацията на енергия. Освен груба оценка на радиоактивността на обследваните обекти е добре да познаваме и произхода на тази радиоактивност, за да преценим дали тя представлява интерес за нас. Това става чрез

спектрометрични детектори, които от своя страна имат по-специални изисквания към електрониката, генерират по-големи масиви от данни и материалът, от който са изработени, е по-скъп. Сложността на проблема, пред който заставаме, ни принуждава да го решим на малки стъпки. Първата от тях би била изборът и набавянето на необходимия за експеримента детектор. За целта ни е необходимо сравнение на познатите до момента детектори, подходящи за гама-спектрометрия, проучване на пазара и закупуването на подходящ детектор. Към момента екипът ни сътрудничи тясно с фирма „Тита Консулт“ ООД (с опит във въздушното гама-картографиране), както и с водещи фирми, произвеждащи дозиметрична апаратура: Mirion Technologies, Ortec, Flir и Thermo-Fischer, разработващи също и гама-детектори.

В България все повече се развиват и безпилотните летателни средства, усъвършенстват се комуникациите с тях, позиционирането, увеличаването на продължителността на полета и полезната маса. Засега повечето се използват главно за заснемане на земната повърхност с оптични, инфрачервени или хипер-спектрални камери, но има потенциал да се използват и за дистанционно гама-картографиране. В България има достатъчно специалисти по БЛС, включително и в Софийския университет (преподаватели в магистърска програма «Аеро-космическо инженерство и комуникации» във Физическия факултет), които с готовност ще подпомогнат още в самото начало реализацията на подобен дистанционен метод за гама-картографиране с помощта на БЛС и ще ни осигурят необходимата техника. Това ще е една наистина нова възможност за практическо и изключително полезно използване на БЛС.

Работата по един такъв проект за развитие на нов метод за дистанционно гама-картографиране с помощта на БЛС е свързана с преследването на няколко основни цели.

♦ Най-важната цел е да се докаже работоспособността и ефективността на метода на радиационното гама-картографиране от въздуха с помощта на БЛС с фиксирано или ротиращо крило. Това наистина е важна цел в момента, защото досега няма ясни и категорични доказателства за приложимостта на подобна технология на радиационно картографиране с използване на относително евтини и икономични летателни средства, с прилагане на малки по маса, но достатъчно ефективни гама-детектори и накрая – възможността за реализация на такъв летателен план и използване на такъв полезен товар, който да осигурява качествено, с достатъчно висока чувствителност и разделителна способност радиационно гама-картографиране отначало на открити терени, а в последствие и на терени на закрито и сложни градски терени.

♦ Друга цел, която има важно практическо значение и за по-нататъшната работа в това направление, е осъществяването на полезен сравнителен анализ на наличните и на новите съвременни детектори на гама-лъчение не само по главните им характеристики (ефективност, мъртво време, разделителна спо-

собност по енергии и пр.), но в допълнение – по полезната маса и енергийната ефективност. Подобен анализ не е реализиран досега, защото теглото на детектора и консумираната мощност не са от основно значение при стандартните приложения. При използване в БЛС обаче тези характеристики са особено важни и това е необходимо, за да се намери подходящият баланс.

♦ Конкретна цел е придобиването на опит в планирането на подходящи профили за облитане на дадена област (създаване на подходящ летателен план) в зависимост от нейния характер и поставените цели на изследването. Това е важна цел, защото съставянето на този план за облитане зависи от модела на евентуалното радиоактивно замърсяване на дадената област – точков, линеен или непрекъснат.

♦ Експерименталното потвърждение на възможността за постигане на достатъчна точност при въздушното гама-картографиране, сравнено с обикновеното наземно картографиране, също е специално търсен резултат.

♦ Цел е и обучение на млади хора – студенти, докторанти и млади учени, в експериментална работа и опит във въздушното гама-картографиране. За част от екипа тази дейност е пряко свързана с тематиката на дисертационния им труд. Цел е и подпомагане на дейност по усъвършенстване на лабораторни практикуми, защиты на дипломни и курсови работи, дисертационни трудове и др.

♦ Ключова цел е да се набави една достатъчно добра собствена техническа база от измерителни средства (детектори, електронни и комуникационни схеми, методи и софтуерни средства) и достатъчно подготвен екип, който да развива метода на въздушна гама-картография с помощта на БЛС.

3. СРАВНЕНИЕ МЕЖДУ РАЗЛИЧНИ ГАМА-ДЕТЕКТОРИ С ЦЕЛ ВГРАЖДАНЕ В БЛС

Това е първият важен въпрос за решаване: сравнение на различни гама-детектори по три от техните характеристики. В сравнението участва не само материалът, от който е изработена активната част на детектора, а цялостно работещата детектираща система. Това включва самият детектор (сцинтилатор или друг тип), фотоелектронен умножител (ФЕУ) или друг преобразовател на светлинни импулси в електрически, предусилвател, усилвател, електроника, брояща и записваща импулсите, и захранващ блок. Трите параметъра, които са най-важни за прилагането на детектиращата система в безпилотните методи за изследване, са: тегло, чувствителност и ниво на консумация на електрическа енергия. Поради структурата им газоразрядните броячи са относително леки, но тяхната ефективност е ниска. Чувствителността на сцинтилационните детектори зависи от размерите, плътността и ефективния атомен номер Z_{ef} на сцинтилатора (ефективността във фотопика е пропорционална на Z^2).

Класическите ФЕУ са с голямо усилване, но се изработват от стъкло, което ги прави тежки и чупливи. Преди да се проектира цялостна детекторна система, е направено сравнение между готови детекторни системи, използвани в преносима дозиметрична апаратура, където параметрите тегло, ефективност и консумация на ел. енергия също са решаващи. Според каталожната информация, дадена от производителите на детектори, е избран сцинтилационен детектор от CsI. За първоначалните тестови полети е избран детектор № 2 (табл. 1). Поради добрата си чувствителност, малки размери и сравнително ниска цена би било рентабилно детекторът да се използва, когато не е нужна спектрометрия. За спектрометрични измервания по-подходящ би бил детектор № 5, който е от същия материал (CsI), но с по-голям обем, което го прави по-чувствителен. Част от обема на сцинтилатора на детектор № 5 е изработена от кристал, чувствителен към неутрони (Li-6). Цената му е по-висока, но би била оправдана предвид това, че ще позволи създаване на гама-карта на няколко отделни радионуклида и откриване на неутронни източници само с едно облитане на терена.

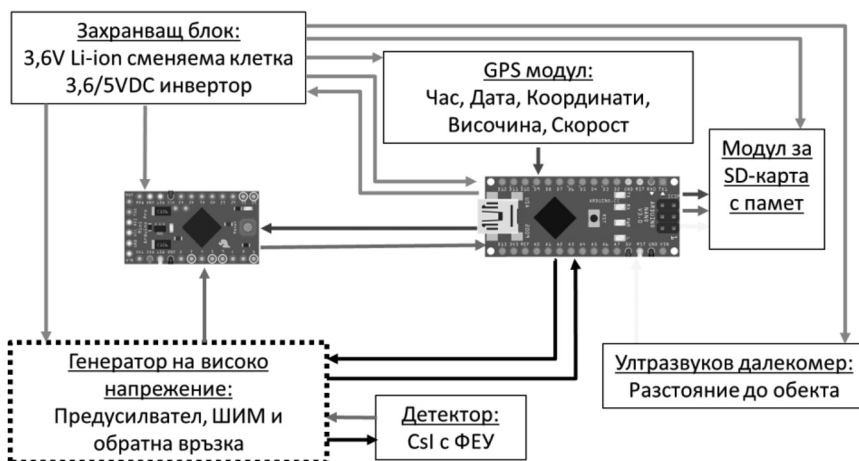
Таблица 1. Сравнителна таблица на изследваните детектори

№	Вид/материал	Размери [mm]	Чувствителност [cps/ μ S/h] (Cs-137)	Тегло [g]
1	ГМ-брояч	80 г	8	8
2	CsI	38 г	210	40
3	CZT	1000 mm ³	1000	60
4	NaI	25 г	290	120
5	CsI+Li	38 г	1500	550
6	NaI	63 г	4600	1400
7	Органичен сцинтилатор	75 г	5800	1400

Към всеки от детекторите като неразделна част е прикрепен фотоелектронен умножител (ФЕУ), който изисква добра защита от механично счупване на стъкления му корпус и стабилизирано високо захранващо напрежение (до около 1000 V DC). За първоначалните експерименти достатъчна ще бъде система само с възможност да определя общата активност на замърсяването, без спектрометрия (както е представена на фиг. 1). При нея импулсите от ФЕУ се подават към операционен усилвател, формираща верига и брояч. Броячът е реализиран с два контролера на базата на ATmega328p [16]. Единият контролер служи само за отброяване на импулсите в режим на прекъсване, а вторият ги записва на карта с памет. Към записа се добавят и данните от GPS приемник и ултразвуков далекомер, необходим за определяне на относителната височина на полета, а спрямо нея и замърсяването, отнесено към земната повърхност.

Преди да се осъществи полет, детекторната система е тествана в условия, максимално близки до реалните, с помощта на контролни източници. Използваните източници са от два различни радионуклида: Cs-137 и Co-60. Подбраните радионуклиди са едни от най-често срещаните в радиоактивни замърсявания, причинени от човешка дейност. В този експеримент са постигнати очакваните резултати от предварителните теоретични пресмятания, което доказва, че системата работи и може да се пристъпи към реалните полеви тестове. Важен резултат, получен от експеримента, е откриването на височината, от която облитането би било оптимално по отношение на скорост, безопасност и минимална детектируема активност (МДА).

Следващата стъпка е извършване на софтуерна симулация на поглъщане на гама-лъчението в различни материали. Симулацията е извършена с два софтуерни продукта [17]: MicroShield и RadPro за потвърждаване на резултатите. Въведените параметри са за три различни дебелини на слоя въздух при влажност 50%, температура 20 °C и налягане 950 hPa (дебелината на слоя въздух отговаря на относителната височината на полета). Освен въздух са въведени и четири вида поглъщители от очакваните материали, покриващи радиоактивното замърсяване. За да се въведат коректни данни, експериментално е определена плътността на почва, пясък, тревиста и храстовидна растителност. Резултатите показват, че отслабването на гама-лъчението във всеки от въведените поглъщители е значително и прилагането на поглъстител в полевите експерименти ще изисква източници с по-голяма активност от тези, с които разполагаме към момента. Това определи и бъдещия ни подход към полевия експеримент (вж. следващия раздел) – да се реализира открито изкуствено замърсяване с цел ефективно приложение на технологията за гама-картографиране с помощта на БЛС.



Фиг. 1. Блок схема на детекторната система за запис на данните

4. ПРОВЕЖДАНЕ НА ТЕСТОВ ПОЛЕВИ ЕКСПЕРИМЕНТ С ИЗБРАНАТА ГАМА-ДЕТЕКТОРНА СИСТЕМА

В тази част е описано провеждането на първите полеви експерименти с БЛС, носещо на борда си детекторна система за гама-лъчение. За полета е избрано БЛС, тип ротиращо крило, използвано за учебни цели в Геолого-географския факултет на Софийския университет [18] – вж. и илюстрацията на фиг. 2. То представлява електрически квадрокоптер с обща подемна сила на четирите ротора около 100 N. Наличната батерия е литиево-полимерна с напрежение 22.2 V и капацитет 10 Ah, което на практика осигурява полет с продължителност около 10 min с подбраната детекторна система на борда.



Фиг. 2. Квадрокоптер с обща подемна сила на четирите ротора около 100 N [18], притежание на Университетския център за въздушно наблюдение към СУ



Фиг. 3. Летателен план, изготвен със софтуера MissionPlanner

Като полеви терен за тестовия полет е избрана част от паркинга пред Физическия факултет с общи размери около 10 г.

Точка №	Северна ширина [deg]	Източна дължина [deg]	Скорост на броене [cps]
1	42.6736268	23.3302206	16
2	42.6736268	23.3302206	17
3	42.6736589	23.3301986	17
4	42.6736911	23.3301765	29
5	42.6737014	23.3301694	18
6	42.6737053	23.3301804	17
7	42.6737053	23.3301804	18
8	42.6736731	23.3302025	16
9	42.6736410	23.3302245	17
10	42.6736311	23.3302314	17
11	42.6736353	23.3302421	17
12	42.6736353	23.3302421	18
13	42.6736674	23.3302201	18
14	42.6736995	23.3301980	16
15	42.6737092	23.3301914	16
16	42.6737131	23.3302024	19
17	42.6737131	23.3302024	17
18	42.6736809	23.3302245	18
19	42.6736488	23.3302465	31
20	42.6736395	23.3302529	16
21	42.6736438	23.3302637	17
22	42.6736438	23.3302637	17
23	42.6736759	23.3302416	18
24	42.6737080	23.3302196	19
25	42.6737170	23.3302134	18

При него профилите на облитане представляват успоредни прави линии на разстояние, равно на височината на полета (2 m). Скоростта на полета е съобразена както с неговата височина, така и с чувствителността на детектора, скоростта на броене (табл. 2) и желаната МДА.

Измереният естествен фон на площадката, предвидена за експеримента, е средно $0.08 \mu\text{Sv/h}$. При такъв фон откликът на избрания детектор № 2 е около $0.08 \times 210 = 16.8 \approx 17$ cps. Статистическата неопределеност би била $17^{1/2} = 4.12$ cps. Теоретично няма как при тези условия на измерване (детектор, време на интегриране, геометрия и гама-фон) да постигнем МДА, по-малко от 4.12 cps нетна стойност, равняваща се на мощност на дозата $\sim 0.02 \mu\text{Sv/h}$

(закръглена нетна стойност). Тоест, за да открием използваните източници с нашата детекторна система, всеки един от тях трябва да създава поле с мощност на дозата минимум $0.02 \mu\text{Sv/h}$ на разстояние 2 m от него (колкото е очакваната височина на полета).

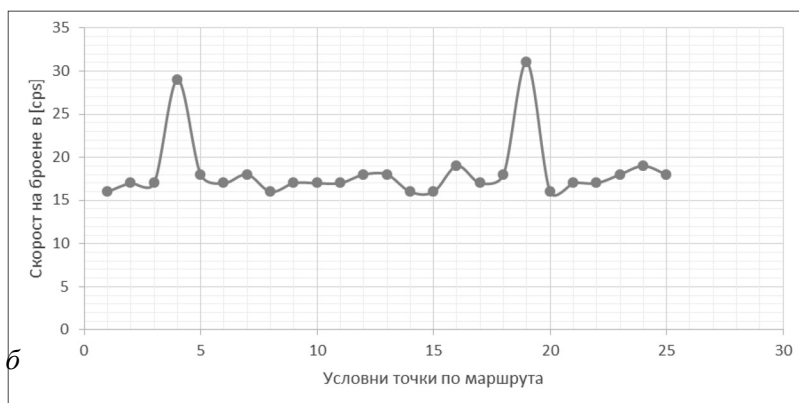
От табл. 2 (т. 4 и т. 19) и фиг. 4 се вижда, че откликът в детектора в точките над източниците е около 30 cps, или при фон 17 cps нетната стойност е около 13 cps. Това показва, че източниците, избрани за експеримента, създават поле, което е достатъчно силно, или по-конкретно $\sim 0.06 \mu\text{Sv/h}$.

При повторното облитане с цел по-точно определяне на активността на източниците времето за интегриране може да се увеличи чрез зависване на БЛС само над точките, в които е забелязано завишаване на фона.

За така създаденото изкуствено замърсяване и установени условия за измерване за реализацията на предварителните тестови изследвания не беше използвана реална БЛС и експериментът се проведе с помощта на дистанционна шанга, носена на ръце и поддържаща детекторната система на височината на полета на БЛС. Впоследствие бе проведен и редовен експеримент с БЛС, но резултатите ще бъдат описани на по-късен етап и по-подробно, като ще се разгледат и други технически въпроси за тази технология. Един от тези въпроси е свързан със съвсем конкретното откриване на източниците чрез наслагване на гама-картата върху детайлно изображение, създадено от фотозаснемане на терена. Това заснемане лесно би могло да се осъществи по време на полет с помощта на миниатюрна камера с висока разделителна способност, монтирана на БЛС.

Допълнително затруднение предизвика използването на програмите MissionPlanner и 3D Maps (към пакета на Microsoft Excel) поради факта, че те са адаптирани към по-едромашабни карти. В настоящия експеримент се използваха техните пределни възможности. За по-дребномащабни обследвания е необходимо квадрокоптерът да е снабден с различна навигационна система, по-точна от GPS (споменатият лидер или друго).

След приключване на тестовите измервания на симулационен полет данните са свалени от картата с памет на детекторната система и обработени на преносим компютър на място в близост до обследваната територия. Целта на експресния анализ на данните е да се открият местата със замърсяване, за да се планира втори полет, използващ линеен или точков модел на разпределение на замърсяването.



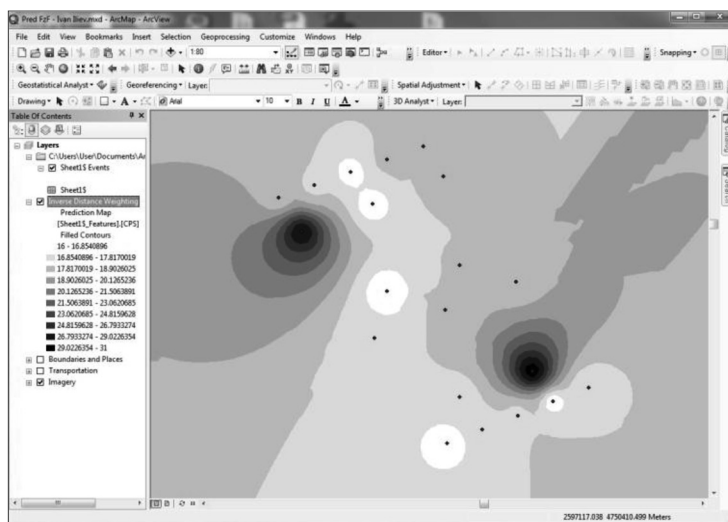
Фиг. 4. Графично определяне на разпределението на замърсяването (а) и установената скорост на броене (б)

Докато непрекъснатият модел е необходим за локализиране на замърсяването, то точковият и линейният модел могат да ни дадат по-точна представа за активността. В нашия случай за втория полет е избран точков модел, приложен в две точки над две открити замърсявания. На фиг. 4 са демонстрирани два метода, използвани за експресен анализ на замърсяването посредством Microsoft Excel.

При втория полет е необходимо зависване над центъра на откритото замърсяване с цел по-продължително измерване. При такова зависване има риск БЛС да отвее замърсяването, с което може дори самото БЛС да се замърси, затова се предпочита по-продължително зависване пред по-малката височина.

Накрая се извършва окончателна обработка на данните от измерването. След лабораторните експерименти детекторната система е програмирана да записва данните от измерването във файлов формат, подходящ за директно прехвърляне в програмата ArcGis, предоставена за целите на експеримента от фирма „Тита Консулт“. На фиг. 5 е представена картата, генерирана с ArcGis и съдържаща измерените скорости на броене. Картата позволява множество манипулации и интерпретации на резултатите с цел по-лесен достъп до информацията.

След първоначалния полет се наблюдават две петна със завишено ниво на радиоактивност (фиг. 4б). При втория полет координатите на тези петна се задават като точки на зависване на БЛС за определено време. Предвид първоначалната груба оценка, на база на непрекъснатия модел при първото облитане, е определено времето на зависване при второто облитане – 100 s. Това е 10 пъти по-дълго време на интегриране от времето при непрекъснатия модел, което намалява неопределеността 3 пъти. В конкретния случай активността на източниците бе определена точно благодарение на предварителната калибровка на системата в същата геометрия и със същите източници. При реални замърсявания би следвало да се спазва геометрията на калибрирането, доколкото е възможно, а точното определяне на активността на замърсеното петно ще зависи и от това, дали замърсяването е от същите радионуклиди, които са използвани при калибрирането.



Фиг. 5. Резултати от тестовото измерване под форма на карта, генерирана с помощта на софтуера ArcGis

5. ИЗВОДИ И БЪДЕЩА РАБОТА

Първоначалните сравнителни анализи, симулации и първи експериментални резултати от изпълнението на настоящия нов проект показаха, че има сериозни основания да се счита, че дистанционната гама-картография с помощта на безпилотни летателни системи (самолети и квадрокоптери) осигурява необходимата точност и ефективност на подобен род измервания и може да замени в някакъв смисъл скъпо струващи пилотируеми измервания, когато се търсят бързи, евтини и относително по-груби първоначални резултати, особено на места, където подобни експерименти, изпълнени с участие на хора, са трудно-осъществими (тук не се визират само опасни места на аварии и бедствия с радиоактивно замърсяване, а по-скоро трудно достъпни терени във и във вътрешността на сгради и на далечни разстояния от измервателни лаборатории).

Бъдещата работа на екипа включва провеждане на серия от полеви експерименти с различни БЛС, усъвършенстване на управлението на БЛС с основна мисия гама-картографиране, усъвършенстване на летателния план и обогатяване на мисията чрез включване на допълнително оптично заснемане на терена, точно определяне на относителната височина на полета и други подобни аерокосмически технологии. Екипът има намерение да продължи работата по този обещаващ проект.

Благодарности. Изследванията са проведени с частичната финансова поддръжка по Договор 80-10-82/2017 с Фонд НИ на СУ

REFERENCES

- [1] ICRU, *Report 53*, U.S.A., 01.12.1994.
- [2] International Atomic Energy Agency, IAEA, *IAEA-TECDOC-1092*, June 1999.
- [3] International Atomic Energy Agency, IAEA, *IAEA-TECDOC-1363*, July 2003.
- [4] Mabit, L. and C. Bernard. *Journal of Environmental Radioactivity*, October 2007, **97**, 2-3, 206-219, <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0265931X07001336>
- [5] Horsfall, K.R. *AGSO Journal of Australian Geology & Geophysics*, 1997, **17**(2), 23-30.
- [6] Iliev, I., I. Pastuhov, V. Gourev. Airborn gamma-mapping, *RAD Conference 2016*, Nish, Serbia, 23-27.05.2016, online available.
- [7] V. Terziev, M. Ivanova, D. Sharaliev, A. Pipev, Methodology for realization of measurements on the base of "In situ" method by mobile Gamma-spectrometric equipment for determination of the activity on the objects with different geometric shape and stationary location in the enveloped environment, Manual, Eco Programma Ltd., 2017 (in Bulgarian)
- [8] V. Terziev, M. Ivanova, D. Sharaliev, A. Pipev, Methodology for calibration of mobile Gamma-spectrometric equipment, Guidance, Eco Programma Ltd., 2017 (in Bulgarian)
- [9] Connor, D. T., P. G. Martin, and T. B. Scott. *International Journal of Remote Sensing*, 2016, **37**(24), 5953-5987. DOI:10.1080/01431161.2016.1252474.
- [10] Zavala, M. *PhD Thesis*, Georgia Institute of Technology, May 2016, online available.

- [11] Martin, P., J. Moore, J. Fardoulis, O. Payton, and T. Scott, *Remote Sensing*, 2016, **8**(11), [913]. DOI: 10.3390/rs8110913
- [12] Šálek, O., M. Matolín, and L. Gryc, *Journal of Environmental Radioactivity*, 2017, **182**, 06 Dec, 101-108.
- [13], I. Iliev, P. Dankov, I. Pastuhov, „Analysis of the possibility for utilization of unmanned vehicles and small satellite for remote control of the radiation situation, *Third National Congress on Physical Science*, 29.09-02.10.2016, Sofia, InterExpo Center (in Bulgarian)
- [14] Karanth, S. P., V. Shobha, M. A. Sumesh, T. V. Sridevi, K. T. Manjunath, B. Thomas, L. V. Prasad, and M. Viswanathan, *Journal of Small Satellites*, vol. 6, No. 2, 2017, pp. 581–589
- [15] Iliev, I., V. Vasilev, M. Mladenova, *Int. Conf. Comprehensive Nuclear-Test-Ban Treaty (CTBT)*, Vienna, Austria, 26–28.06.2017 (to be published in *Journal of Physical Science and Application*, ISSN 2159-5348)
- [16] University Center for air monitoring of Sofia University “St. Kliment Ohridski”: https://www.uni-sofia.bg/index.php/bul/universitet_t/centrove/universitetski_cent_r_za_v_zdushno_nablyudenie
- [17] Manual of the software for Arduino controllers: <https://www.arduino.cc/en/Guide/HomePage>
- [18] Manual of the software Gamma Vision: <http://www.ortec-online.com/-/media/ametekortec/manuals/a66-mnl.pdf>;
- [19] Manual of the software MAESTRO: <http://www.ortec-online.com/-/media/ametekortec/manuals/a65-mnl.pdf>;
- [20] Manual of the software MicroShield: <http://radiationsoftware.com/microshield/>;
- [21] Manual of the software Mission Planner: <http://ardupilot.org/planner/docs/common-mission-planning.html>;
- [22] Manual of the software Geosoft (package): <http://www.geosoft.com/products/target/target-arcgis/>; [23] Manual of the software Gamma Design: <https://www.gammadesign.com/Features.aspx>;
- [24] Manual of the software ArcGis (package): <http://www.esri.com/arcgis/about-arcgis>