

Юрій Григорович Даник (д-р техн. наук, професор, начальник інституту)¹

Іван Степанович Катеринчук (д-р техн. наук, професор, професор кафедри)²

Ігор Іванович Балицький (к.т.н., доцент, начальник (декан) факультету)²

¹Національний університет оборони України імені Івана Черняхівського, Київ, Україна

²Національна академія Державної прикордонної служби України імені Богдана Хмельницького, Хмельницький, Україна

МЕТОДИКА ЗАБЕЗПЕЧЕННЯ БЕЗПЕКИ ЗАСТОСУВАННЯ БПЛА ПРИ ВИКОНАННІ СПЕЦІАЛЬНИХ ЗАДАЧ В СКЛАДНИХ УМОВАХ

У статті запропоновано методику забезпечення безпечного застосування БПЛА за рахунок комплексного використання технології одержання даних цифрової моделі рельєфу місцевості; хвильового алгоритму пошуку множини кінцевих точок видимості на місцевості бортовими засобами спостереження та побудови контуру зони видимості; методів дискретної геометрії оцінки зон видимості засобів спостереження на місцевості; моделі програмних модулів ArcGIS та Arcview Spatial Analyst для обробки багатоканальних растрових даних (аерофотознімків, супутникових зображень) та одержання растрових шарів місцевості у цифровому форматі що надаватиме можливість точніше визначати керуючі впливи для безпечного застосування БПЛА. Запропонована методика дозволить вирішити такі завдання: оцінити площу ділянки, яка буде контролюватися БПЛА з кожної окремої точки польоту; визначити необхідну кількість БПЛА, якими забезпечуватиметься контроль визначених районів та ділянок контролю; за визначеними характеристиками застосування БПЛА для кожної конкретної ділянки обрати найкращий варіант.

Ключові слова: безпека польоту; безпілотний літальний апарат; державний кордон; координати; методика; моменти; параметри керування; сили.

Вступ

Постановка проблеми. Повнота, точність та оперативність надання достовірної інформації при використанні БПЛА для виконання спеціальних задач суттєво залежить від умов в яких здійснюється його застосування (рельєфу та забудови місцевості, впливу інших заважаючих факторів). В статті питання застосування БПЛА для виконання спеціальних задач розглядається на прикладі їх використання в інтересах охорони державного кордону для протидії спробам перетину державного кордону диверсійно-розвідувальними групами, незаконного переміщення нелегальних мігрантів, контрабанди тощо. Аналіз результатів оперативно-службової діяльності, збройних зіткнень та виконання оперативно-бойових завдань підрозділами Державної прикордонної служби України у зоні проведення Антитерористичної операції, вимог керівних документів, технічних і експлуатаційних технічних засобів контролю вказує на існування потреби широкого впровадження в систему моніторингу державного кордону безпілотних авіаційних комплексів (БАК). Одним із перспективних напрямків підвищення надійності охорони державного кордону є розвиток та запровадження нових технологій і систем інженерно-технічного забезпечення кордону, складовими елементами якої є засоби радіолокаційного, телевізійного та оптико-

електронного спостереження, у тому числі тих, що базуються на безпілотних літальних апаратах (БПЛА). Застосування БПЛА при виконанні спеціальних задач в інтересах охорони та оборони державного кордону, як правило, здійснюється в умовах складного рельєфу та забудови місцевості, впливу інших заважаючих факторів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Завдання щодо обґрунтування раціональних параметрів, технічних характеристик та інших властивостей БАК для виконання спеціальних задач з моніторингу обстановки на державному кордоні, раціонального та безпечного їх застосування досліджували такі науковці як Гулевич С. П., Альошин Б. С., Суханов В. Л., Шибасєв В. М., Веселов Ю. Г., Моїсєєв В. С. та інші [1; 4-6; 8-10]. Аналіз праць зазначених авторів вказує на відсутність комплексного методологічного підходу до вирішення задач забезпечення безпеки застосування БПЛА в умовах складного рельєфу та забудови місцевості, впливу інших заважаючих факторів при виконанні спеціальних задач з врахуванням можливостей сучасних та перспективних систем, що використовуються для деструктивних впливів на них та відповідно синтезу раціональної структури БАК, визначення вимог до БПЛА, розробки та удосконалення раціональних систем керування БПЛА. Однією з головних задач структурного синтезу побудови конфліктно-стійких систем

керування є розроблення науково-методичного апарату забезпечення безпеки використання БПЛА в умовах складних динамічних змін обстановки.

Метою статті є розробка алгоритму оцінки параметрів керування БПЛА в режимі польоту по заданій траєкторії та методики забезпечення безпеки їх застосування.

Виклад основного матеріалу дослідження

В інтересах виконання спеціальних задач БАК (БПЛА БАК) можуть застосовуватися для ведення пошуку правопорушників, виконання розвідки територій та об'єктів, виявлення та супроводження визначених об'єктів та впливу на них, перехоплення БПЛА-порушників, ретрансляції тощо. Для забезпечення виконання зазначених задач в умовах складного рельєфу та забудови місцевості (включаючи важкодоступні ділянки) можуть застосовуватися, як бортові так і наземні комплекси керування.

Комплекс керування БПЛА є складною, багаторівневою структурою, головним завданням якої є забезпечення виведення БПЛА в заданий район і виконання задач відповідно до польотного завдання, а також забезпечення доставки інформації, отриманої бортовими засобами БПЛА, на пункт управління.

Застосування БПЛА будемо розглядати відповідно до такої моделі управління. Бортовий комплекс дозволяє керувати БПЛА як в ручному режимі зі стандартного пульта дистанційного керування, так і в автоматичному, за командами автопілоту відповідно запланованої та запрограмованої місії. Системи, що здійснюють керуючі впливи, включають органи поздовжнього керування та органи управління бічним рухом. Автоматизацію керування забезпечують такі канали: управління двигуном (тяги); управління по тангажу; управління креном, тощо.

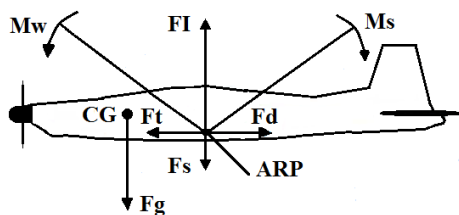


Рис. 1. Сили і моменти, що діють на БПЛА, перераховані і зведені до однієї точки (джерело [8])

На БПЛА в горизонтальному польоті діють кілька аеродинамічних сил, які в певній мірі компенсують одна одну (рис. 1): сила тяжіння F_G ; підйомна сила крила F_L , сила тяги двигуна F_T , сила опору повітря F_D , сила стабілізатора F_S компенсує поздовжній момент якщо точки прикладання сили тяжіння і підйомної сили не збігаються. Коли всі

сили в літаку врівноважені (векторна сума дорівнює нулю), літак рухається прямолінійно з постійною швидкістю. Моменти обертають БПЛА навколо осей, а сили зміщують його вздовж осей. У підсумку у БПЛА з'являється шість ступенів свободи, рух по координатах осей X , Y , Z і обертання навколо осей X , Y , Z .

В основу методики забезпечення безпечного польоту БПЛА покладено визначення механізмів вироблення керуючих впливів на сили та моменти, якими забезпечуються необхідні (задані) параметри польоту на кожному із етапів його застосування. Цикл управління польотом БПЛА наведено на рис. 2.

Забезпечення безпеки використання БПЛА в умовах виникнення конфліктних ситуацій можна розглядати як функціонування складної системи. Загальний вигляд рівняння для i -го процесу функціонування такої системи матиме вигляд [4-6; 9]:

$$p_i(t) = f_i \left[t, \{p_k(t)\}, \{J_k(t)\}, u_i(t, \tau_{ui}, Z_i), \left\{ v_j(t, \tau_{vj}, Z_j) \right\} \right], \quad (1)$$

$$i, j, k = \overline{1, N}, i \neq j$$

де: N – кількість процесів у системі; $J_i(t)$ – функція аргументу запізнення; $\tau_{ui(vj)}$ – затримка управління (самокерування); Z_i – цільова функція процесу, $Z_i = Z_i(p_i(t), T_i)$.

Основним питанням першого етапу системного дослідження конфлікту є вибір системи рівнянь, що описують процеси функціонування системи. Функціональні залежності математичної моделі конфлікту $f_i(\cdot)$ формуються на множині змінних функціонального простору системи $\{p_i\}$ з урахуванням параметрів керування u_i та самокерування v_i . Параметри керування і самокерування мають фізичні обмеження U_i та V_i і включаються до складу моделі з відомими затримками τ_i .

Етап планування і постановки завдання починається з формулювання мети дій і побудови на основі моделі цільової функції (функцій) Z_i . Остаточне формулювання оптимізаційної задачі здійснюється після формалізації способів витрат часу T_i і активного ресурсу w_i з відповідними обмеженнями T_i' та W_i , а також самого критерію (системи критеріїв) ефективності.

Третій етап – розв'язання оптимізаційної задачі на основі пошуку екстремуму цільової функції з оцінкою ефективності шляхом варіації управлінськими параметрами за умови оптимального управління з протилежного боку – учасника конфлікту [9].

Безпечний, в заданих умовах, політ БПЛА можна представити у вигляді графу із чотирма станами, рис. 3



Рис. 2. Цикл та система управління БПЛА

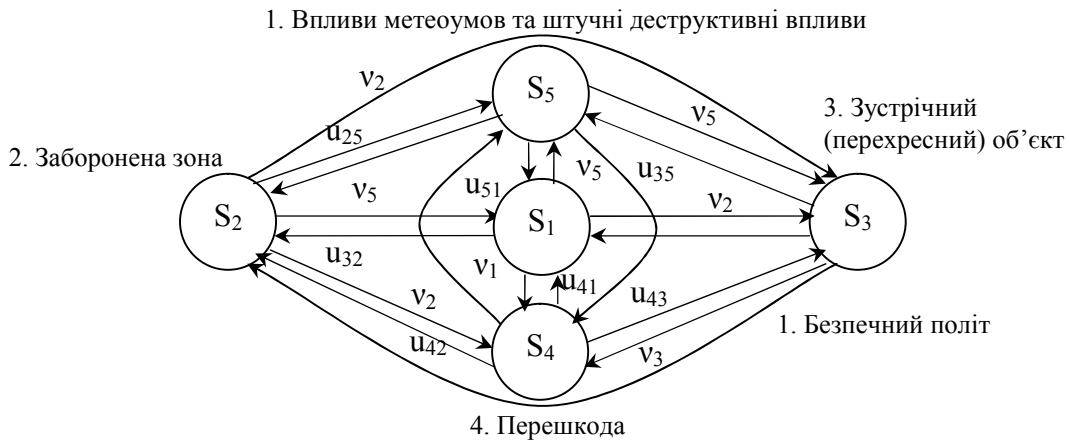


Рис. 3. Граф станів польоту БПЛА у конфліктних ситуаціях

Переходи стану БПЛА описуються системою диференціальних рівнянь:

$$\begin{cases} \frac{dP_1(t)}{dt} = P_2(t)u_{21} + P_3(t)u_{31} + P_4(t)u_{41} + P_5(t)u_{51} - P_1(t)v_{12} - P_1(t)v_{13} - P_1(t)v_{14} - P_1(t)v_{15}; \\ \frac{dP_2(t)}{dt} = P_1(t)v_{12} + P_3(t)u_{32} + P_4(t)u_{42} + P_5(t)u_{52} - P_2(t)u_{21} - P_2(t)v_{23} - P_2(t)v_{24} - P_2(t)v_{25}; \\ \frac{dP_3(t)}{dt} = P_1(t)v_{13} + P_2(t)v_{23} + P_4(t)u_{43} + P_5(t)u_{53} - P_3(t)u_{31} - P_3(t)u_{32} - P_3(t)v_{34} - P_3(t)v_{35}; \\ \frac{dP_4(t)}{dt} = P_1(t)v_{14} + P_2(t)v_{24} + P_3(t)v_{34} + P_5(t)u_{54} - P_4(t)u_{41} - P_4(t)u_{42} - P_4(t)u_{43} - P_4(t)v_{45}; \\ \frac{dP_5(t)}{dt} = P_1(t)v_{15} + P_2(t)v_{25} + P_3(t)u_{35} + P_4(t)u_{45} - P_5(t)u_{51} - P_5(t)u_{52} - P_5(t)v_{53} - P_5(t)v_{54}. \end{cases} \quad (2)$$

$$P_1 + P_2 + P_3 + P_4 + P_5 = 0. \quad (3)$$

Після перетворень, система рівнянь (2) набуває вигляду

$$\begin{cases} P_1 = \frac{P_2 u_{21} + P_3 u_{31} + P_4 u_{41} + P_5 u_{51}}{v_{12} + v_{13} + v_{14} + v_{15}}; \\ P_2 = \frac{P_1 v_{12} + P_3 u_{32} + P_4 u_{42} + P_5 u_{52}}{u_{21} + v_{23} + v_{24} + v_{25}}; \\ P_3 = \frac{P_1 v_{13} + P_2 v_{23} + P_4 u_{43} + P_5 u_{53}}{u_{31} + u_{32} + v_{34} + v_{35}}; \\ P_4 = \frac{P_1 v_{14} + P_2 v_{24} + P_3 v_{34} + P_5 u_{54}}{u_{41} + u_{42} + u_{43} + v_{45}}; \\ P_5 = \frac{P_1 v_{15} + P_2 v_{25} + P_3 v_{35} + P_4 v_{45}}{u_{51} + u_{52} + u_{53} + u_{54}}. \end{cases} \quad (5)$$

Забезпечення безпеки використання БПЛА передбачає здійснення відповідних керуючих впливів v_{ij} .

Математичну модель керованого польоту БПЛА детально розглянуто у працях [1-2; 4-6; 9; 17; 18], яка у векторній формі записується як:

$$\dot{x} = f(x, u, t), t \in [t_0, t_k]; x(t_0) = x_0. \quad (6)$$

де $x = (x_1, x_2, \dots, x_n)$ – вектор фазових координат БПЛА; $u = (u_1, u_2, \dots, u_m)$ – керуючий вектор; $f = (f_1, f_2, \dots, f_n)$ – вектор-функція власних аргументів; $[t_0, t_k]$ – інтервал часу, впродовж якого виконується політ БПЛА.

На керування БПЛА накладаються обмеження виду:

$$u_{\min} \leq u(t) \leq u_{\max}, t \in [t_0, t_k] \quad (7)$$

Для розрахунку вектора $u(t)$ можна застосувати спрощені моделі руху центру мас БПЛА у такому вигляді:

$$\begin{cases} \dot{V} = f_1(V, \theta, \psi, y, u); t \in [t_0, t_k]; \\ \dot{\theta} = f_2(V, \theta, \psi, y, u); \\ \dot{\psi} = f_3(V, \theta, \psi, y, u); \\ \dot{x} = V \cos \theta \cos \psi; \\ \dot{y} = V \sin \theta; \\ \dot{z} = V \cos \theta \sin \psi. \end{cases} \quad (8)$$

де $V = V(t)$ – швидкість БПЛА в момент часу $t \in [t_0, t_k]$; $\theta = \theta(t)$ та $\psi = \psi(t)$ – кути нахилу і повороту траєкторії БПЛА; $x = x(t)$, $y = y(t)$ і $z = z(t)$ – координати БПЛА у географічній системі координат.

Тоді, програмне керування рухом БПЛА полягатиме у пошуку векторів керування та самокерування $u(t)$ і $v(t)$, відповідно, та фазових координат $V(t)$, $\theta(t)$, $\psi(t)$, $x(t)$, $y(t)$, $z(t)$ з урахуванням конструктивних характеристик БПЛА.

Для побудови моделі конфліктних ситуацій, які можуть виникати на кожному етапі польоту БПЛА

необхідне рішення двох завдань: формування образу необхідної траєкторії польоту БПЛА і формування вектора керування, що забезпечує рух БПЛА по такій траєкторії на заданих інтервалах.

Можливі такі моделі конфліктних ситуацій, що виникають під час польоту БПЛА (див. рис. 3) [11]: 1) модель безпечної (без перешкод і завад) польоту БПЛА; 2) модель урахування заборонених областей при плануванні маршруту БПЛА; 3) модель, що враховує можливості зіткнень зі статичними перешкодами, які можуть виникати під час польоту БПЛА на малих висотах; 4) модель урахування можливості зіткнень з динамічними об'єктами на шляху руху БПЛА (наприклад, з іншими літальними апаратами, БПЛА тощо); 5) модель урахування впливів метеоумов та штучних деструктивних впливів.

Конфліктна ситуація «БПЛА – середовище польоту». Найбільше прямий вплив на динаміку руху БПЛА надає вітер, який формує струменеві і турбулентні переміщення повітряних мас. Загальною кількісною характеристикою впливу вітру є вектор його швидкості (w_x, w_y, w_z) . При відомих значеннях компонент вектора значення швидкості вітру обчислюється як

$$W = \sqrt{w_x^2 + w_y^2 + w_z^2}.$$

Вектор курсової швидкості БПЛА \bar{V}_{Π} , тобто швидкості відносно земної поверхні, визначається як сума векторів

$$\bar{V}_{\Pi} = \bar{V} + \bar{W}, \quad (8)$$

де \bar{V} – вектор швидкості щодо повітря.

Якщо вектори \bar{V} і \bar{W} паралельні, то в залежності від напрямку вектора \bar{W} витрати палива БПЛА оцінюються так:

$$q = \frac{q_{\text{ч}}}{3.6(V \pm W)}, \quad (9)$$

де $q_{\text{ч}}$ – витрата палива за годину польоту БПЛА (кг/год).

Визначення залежностей $w_x(t)$, $w_y(t)$ і $w_z(t)$ компонент вектора швидкості вітру передбачає використання даних метеорологічної служби в районі виконання БПЛА польотних завдань, у тому числі з використанням даних супутникових навігаційних систем типу GPS.

Розглянемо загальний випадок впливу довільних вітрових збурень, описуваних вектором $\bar{W} = (w_x, w_y, w_z)$ на вектор $(V, \theta, \psi, x, y, z)$ фазових координат загальної моделі керованого руху БПЛА [13].

Вплив вітру на зміну координат просторового положення БПЛА описується як:

$$\begin{cases} \dot{x} = V \cos \theta \cos \psi \pm w_x; \\ \dot{y} = V \sin \theta \pm w_y; \\ \dot{z} = V \cos \theta \sin \psi \pm w_z. \end{cases} \quad (10)$$

Інтегрування рівнянь при заданих залежностях $V = V(t)$, $\theta = \theta(t)$, $\psi = \psi(t)$ надає можливості

побудувати траєкторію $x = x(t), y = y(t), z = z(t)$ руху БПЛА.

Урахування впливу метеоданих на вектор параметрів руху БПЛА є першочерговим завданням планування маршруту, а описана модель є основою для побудови моделей інших конфліктів.

Конфліктна ситуація «БПЛА – заборонена область». Така конфліктна ситуація в термінах варіаційного обчислення виникає, якщо на маршрут руху БПЛА в горизонтальній площині може бути накладено обмеження, що забороняє рух через точки деякої ділянки G , що задана кривою $y = \varphi(x)$ (рис. 4)

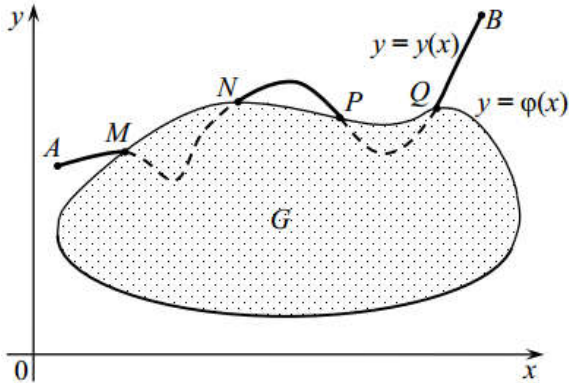


Рис. 4. Схема руху БПЛА через заборонену ділянку (джерело [9])

При такій ситуації маршрут руху може проходити поза ділянкою G або складатися з дуг, що лежать поза межами G і частин рубежу цієї ділянки.

Конфліктна ситуація «БПЛА – перешкода». Виникнення такої ситуації пов'язане в першу чергу з використанням БПЛА на малих висотах і описується необхідним видом плоских траєкторій. Відомо, що БПЛА як тверде тіло, яке має шість ступенів свободи, при яких реалізується три види поступальних дій його центру мас і три види обертальних рухів відносно центру мас.

Динамічні рівняння руху БПЛА мають вигляд

$$\begin{cases} m\dot{V} = \sum F_x; \\ m\dot{V}\varpi_{\text{ц}} = \sum F_y; \\ m\dot{V} \cos \theta \varpi_{\text{ц}} = \sum F_z, \end{cases} \quad (11)$$

де: m – маса БПЛА; $\dot{V} = \dot{V}(t)$ – похідна швидкості БПЛА (прискорення в момент часу t); $\theta = \theta(t)$ – кут нахилу траєкторії; $\sum F_x, \sum F_y, \sum F_z$ – суми проекцій всіх сил, що діють на вісі БПЛА;

Динамічні рівняння обертання БПЛА, в загальному випадку, описуються як:

$$\begin{cases} J_x \dot{\omega}_x + (J_z - J_y) \varpi_z \varpi_y = M_x; \\ J_y \dot{\omega}_y + (J_x - J_z) \varpi_z \varpi_x = M_y; \\ J_z \dot{\omega}_z + (J_y - J_x) \varpi_x \varpi_y = M_z, \end{cases} \quad (12)$$

де $\omega_x, \omega_y, \omega_z$ – кутові швидкості обертання БЛА щодо відповідних осей власної системи координат;

M_x, M_y, M_z – суми проекцій моментів на ці осі всіх діючих на БПЛА сил щодо його центру мас; J_x, J_y, J_z – головні центральні моменти інерції БПЛА [9].

Припущення про ідеальність системи керування БПЛА (час перехідних процесів по каналах тангажу, ристання і крену дуже малий) дозволяє вважати його безінерційним обертальним об'єктом, для якого $J_x = J_y = J_z = 0$ і $M_x = M_y = M_z = 0$. Таке припущення дозволяє представити систему (11) у вигляді:

$$\begin{cases} m\dot{V} = \sum F_x; \\ mV\dot{\theta} = \sum F_y; \\ mV \cos \theta \dot{\psi} = \sum F_z. \end{cases} \quad (13)$$

З огляду на те, що на БПЛА під час польоту діють сила тяжіння $G = mg$; сила тяги двигунів P ; сила лобового опору X , модель конфлікту «БПЛА-перешкода» передбачає опис моделі руху у вертикальній площині (набору висоти польоту) на інтервалі (L_1, L_2) за який БПЛА повинен набрати висоту, що дозволяє облетіти перешкоду висотою $(h_2 - h_1)$ (рис. 5). Тоді рівняння руху набудуть виду:

$$\begin{cases} \dot{V} = \frac{P - X(V, \alpha, y)}{m} - g \sin \theta; t_1 < t < t_2; \\ \dot{\theta} = \frac{P(\alpha + \varphi_{\text{дв}}) + Y(V, \alpha, y)}{m} - \frac{g}{V} \cos \theta; \\ \dot{x} = V \cos \theta; \dot{y} = V \sin \theta. \end{cases} \quad (14)$$

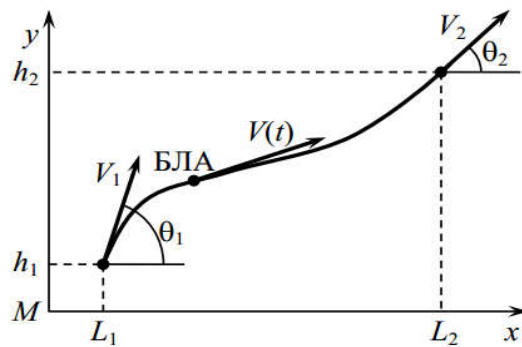


Рис. 5. Набір висоти БПЛА, що дозволяє облетіти перешкоду в точці L_2 висотою $(h_2 - h_1)$

Оптимізація процесу набору висоти БПЛА може вирішуватися за двома критеріями: набір висоти з мінімальними витратами ресурсів та забезпечення максимального значення швидкості в кінцевій точці набору висоти. Для визначення оптимальних траєкторій у вертикальній площині, використовують варіаційні задачі, функціонали яких є наближені інтегральні оцінки зміни значень перевантаження на інтервалі $[L_1, L_2]$ [11].

Конфліктна ситуація «БПЛА – ЛА (БПЛА)» виникає в разі потрапляння повітряних об'єктів в

зону безпечного пілотування БПЛА. Така зона, переріз якої залежить від маневрених характеристик БПЛА та типу апаратури контролю, яка використовується, може мати вигляд, який приведений на рис. 6.

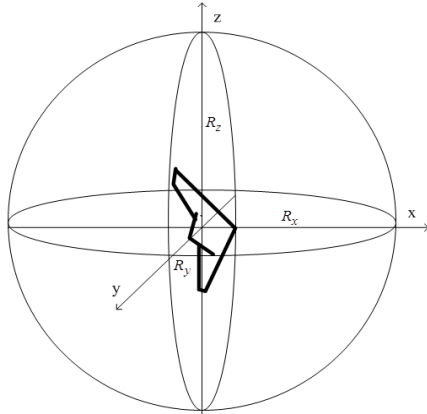


Рис. 6. Зона безпечного пілотування БПЛА

Радіус області небезпечного зближення з сферою буде визначатися як: $R = \min \{R_x, R_y, R_z\}$. Тоді при здійсненні польоту БПЛА в інтервалі часу $t \in [t_0, t_k]$, де t_0 та t_k час початку та завершення виконання задачі БПЛА відповідно, отримуємо сферу, яку опишемо нерівністю:

$$(x_1(t) - x_2(t))^2 + (y_1(t) - y_2(t))^2 + (z_1(t) - z_2(t))^2 < R^2 \quad (12)$$

де $x_i(t), y_i(t), z_i(t)$ - координати об'єктів, що наближаються.

У разі зближення БПЛА з іншими повітряними об'єктами на відстань менше, необхідної видача керуючого впливу може бути представлено рівняннями руху, що описують рух при виникненні конфліктної ситуації «БПЛА - Перешкода» у вертикальній та горизонтальній площині.

Отже, розглянуті моделі конфліктів при керуванням рухом БПЛА дозволяють врахувати вплив середовища польоту, наявність на шляху руху БПЛА заборонених ділянок, та перешкод, що виникають при польоті на малих висотах.

При моделюванні безпечного використання БПЛА у розглянутих конфліктних ситуаціях також необхідно динамічно оцінювати висоти польоту з урахуванням рельєфу місцевості та визначення ділянок, на яких забезпечуватиметься максимальна ефективність дії БПЛА з моніторингу заданих зон (областей, районів, ділянок, наприклад державного кордону). Для цього застосуємо методику вибору варіанту застосування БПЛА на ділянці охорони державного кордону [7]. В основу методики покладено реалізацію таких завдань: 1) визначення області контролю окремим БПЛА на місцевості; 2) визначення ділянок розташування стаціонарних елементів БАК та місць застосування БПЛА; 3) за результатами порівняння областей контролю окремим БПЛА на визначених ділянках їхнього

застосування визначення конкретних ділянок, типів та кількості БПЛА, якими забезпечуватиметься «покриття» всієї ділянки ОДК мінімальною кількістю БПЛА. У методиці застосовано такі технології, моделі та методи: технологію SRTM (Shuttle radar topographic mission) [16] – для одержання даних цифрової моделі рельєфу місцевості; хвильовий алгоритм – для пошуку множини кінцевих точок видимості на місцевості бортовими засобами спостереження та побудови контуру зони видимості; методи дискретної геометрії [3] – для обчислення площі неправильних багатокутників, що відповідають зонам видимості бортових засобів на місцевості; моделі програмних модулів ArcGIS [13] та Arcview Spatial Analyst [16] – для обробки багатоканальних растрових даних, таких як аерофотознімків, супутникових зображень, та одержання растрових шарів місцевості у цифровому форматі.

Одержання даних цифрової моделі рельєфу місцевості за допомогою технології SRTM, які поширюються у вільному доступі та реалізовані у двох варіантах – сітка з розміром осередку 1×1 кутових секунд (30 м.) і 3×3 кутових секунд (90 м.).

За оцінками А. К. Корвеула та І. Евіака [15] матриця SRTM має похибку, яка в середньому становить для рівнинної території 2,9 м і 5,4 м для горбистої місцевості. Матриця SRTM підходить для створення контурних ліній горизонталей на топографічних картах масштабів $1 : 100\,000$, $1 : 50\,000$ і дрібніших. На місцевостях з різким перепадом висот, особливо в гірських районах, можливі пропуски, що призводить до зниження точності матриці SRTM. Для підвищення точності даних необхідно проводити додаткові операції по інтерполяції (для усунення, згладжування пропусків). Значення похибок на практиці виявилися значно кращими [15]: абсолютна похибка по висоті менше 8,7 метра; відносна похибка по висоті менше 6,2 метра; абсолютна похибка в плані менше ніж 8,8 метра; відносна похибка по висоті для даних X-band SRTM менше 2,6 метра. Усі похибки в довірчому інтервалі 90 %. Імпорт даних SRTM та генерація sml-файлів здійснюється за допомогою програмного модуля Arcview spatial analyst. Матриця висот SRTM може бути використана при створенні ортофотопланів масштабу $1 : 25\,000$ і дрібніше на райони з рівнинним і горбистим рельєфом (рис. 6). У районах з гірським рельєфом необхідно проводити попередній розрахунок точності з урахуванням конкретних умов зйомки.

Стандартними при космічній зйомці вважаються кути відхилення від надіра до 30 градусів. У цьому випадку, щоб зміщення за рельєф не перевищували 0,5 мм у масштабі ортофотоплану, точність висот не повинна бути гіршою, ніж 1 мм, перемножений на «знаменник масштабу». Наприклад, для карти масштабу $1 : 25\,000$ вона становитиме: $1 \text{ мм} \times 25\,000 = 25 \text{ м}$.

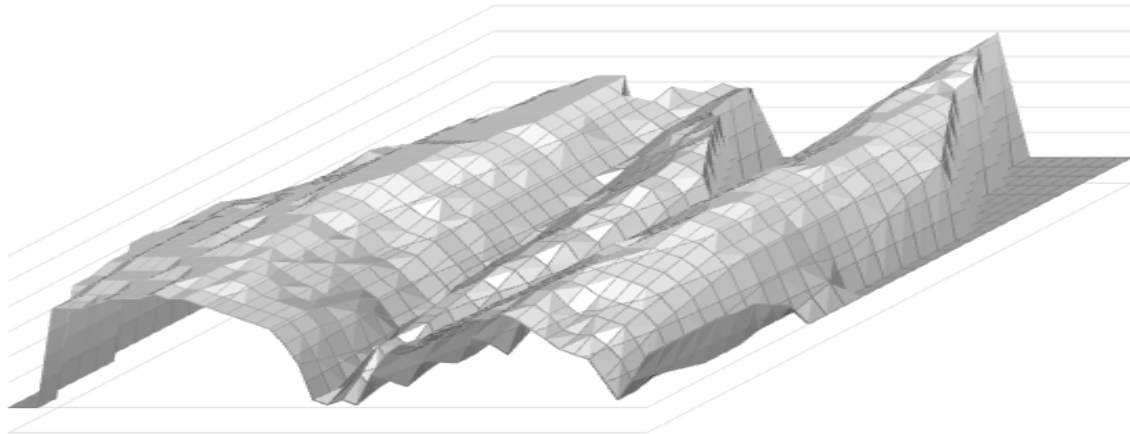


Рис. 7. Рельєф місцевості відділу прикордонної служби за даними SRTM (Миропілля, Сумська обл.)

Площу неправильного багатокутника можна обчислити за формулою Піка [3]:

$$S = n - \frac{m}{2} - 1,$$

де n – кількість цілочислових точок всередині багатокутника (рис. 7); m – кількість цілочислових точок на межі багатокутника (див. рис. 8).

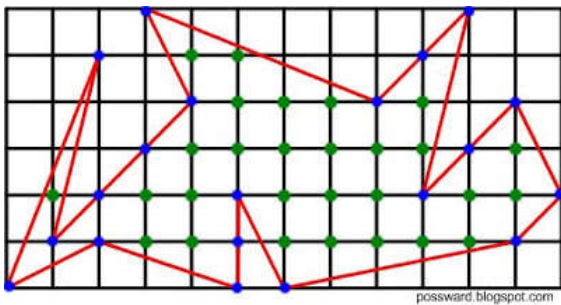


Рис. 8. До пояснення застосування формули Піка

Припустимо, що сторона однієї клітини дорівнює 1 (відповідно, площа клітини буде дорівнювати 1 кв. од.). При застосуванні цифрової моделі рельєфу місцевості SRTM із сіткою 1×1 кутової секунди сторони одного елемента дорівнюватимуть 30 м і з сіткою 3×3 кутові – 90 м.

Алгоритм методики вибору варіанту застосування БПЛА включає декілька етапів [7]:

1. Підготовка вихідних даних: оцінка тактико-технічних характеристик БПЛА, їх кількості і визначення місць можливого застосування стаціонарних та переносних БПЛА, k_{ij} .

2. Підготовка карти місцевості: визначення вихідних величин для розрахунків: розміру елемента матриці місцевості, x_{ij} ; розміру кроку сканування по азимуту $\Delta\varphi_i$ (обирається таким чином, щоб за один крок на найбільшій відстані зони видимості бортовим засобом спостереження (БЗС) не було пропусків елемента матриці місцевості); побудова цифрової моделі рельєфу місцевості (матриця h_{ij}); визначення місць можливого застосування БПЛА.

3. Визначення значень характеристик застосування БПЛА на визначених ділянках (точках): зони контролю (здійснюється за алгоритмом, який наведено на рис. 8); площі контролю; протяжності ділянки державного кордону, що контролюється бортовим засобом спостереження; середньої дальності контролю.

4. Вибір раціонального варіанту за значеннями характеристик застосування БПЛА на визначених ділянках (точках).

Розглянемо приклад застосування методики вибору варіанту застосування БПЛА [7]. У якості корисного навантаження БПЛА (бортової цільової апаратури) використано засіб оптико-електронного спостереження. Відповідно до розглянутого вище алгоритму на карті (ділянка кордону відділу прикордонної служби «Хмільник») нанесемо: район можливого застосування БПЛА на визначених ділянках (обрано зону ефективного виявлення людини на фоні місцевості на віддаленні від ліній державного кордону 6–8 км, рисунок 7). Оцінку характеристик БПЛА проведено для двох точок: н.п. Олександрія та висоти 211. Розраховано площі контролю (за формулою Піка); протяжності ділянки державного кордону, що контролюється БПЛА; середні дальності контролю. Результати розрахунків наведено у таблиці 1.

Таблиця 1

Характеристики застосування БПЛА (варіант)

Ділянка застосування БПЛА		Точка 1	Точка 2
Характеристики	Протяжність ділянки кордону, км	16,5	12,2
	Площа контролю, км ²	22	34
	Середня дальність контролю, км	6,5	7,6

Така оцінка може бути здійснена для всіх можливих місць застосування БПЛА.

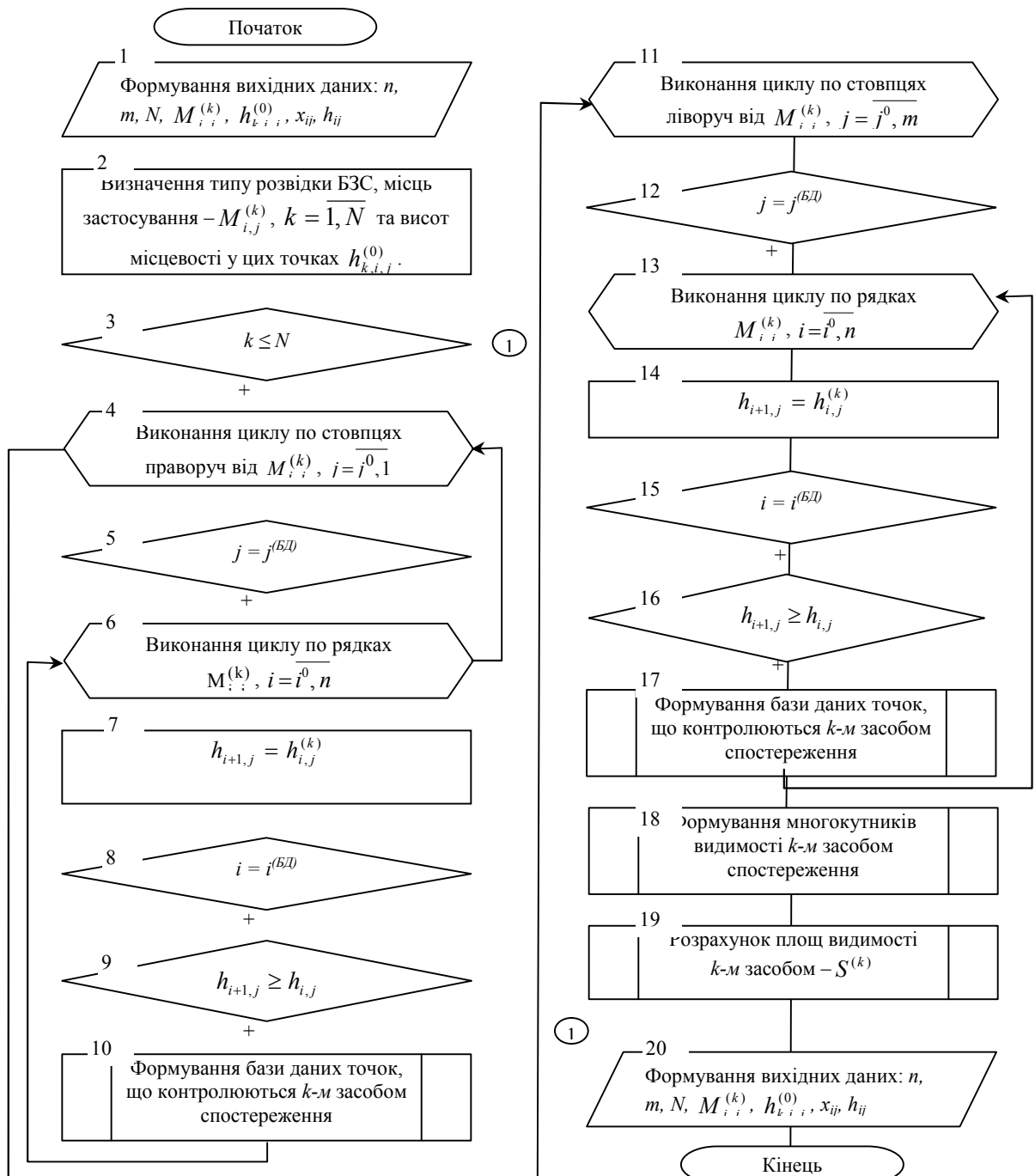


Рис. 8. Алгоритм визначення зони контролю бортовим засобом спостереження БПЛА (джерело [7])

Висновки й перспективи подальших досліджень

Методика забезпечення безпечного застосування БПЛА за рахунок комплексного використання технології одержання даних цифрової моделі рельєфу місцевості (SRTM); хвильового алгоритму пошуку множини кінцевих точок видимості на місцевості бортовими засобами спостереження та побудови контуру зони видимості; методів дискретної геометрії оцінки зон видимості засобів спостереження на місцевості; моделі програмних модулів ArcGIS та ArcviewSA для обробки багатоканальних растрових даних (аерофотознімків, супутникових

зображень) та одержання растрових шарів місцевості у цифровому форматі надаватиме можливості точніше визначати керуючі впливи на безпечне використання БПЛА.

Окрім того, запропонована методика надаватиме можливості вирішити такі завдання: 1) оцінити: яка площа та ділянка державного кордону буде контролюватися БПЛА з кожної окремої точки польоту; 2) визначити необхідну кількість БПЛА, якими забезпечуватиметься контроль визначених районів контролю та ділянок кордону; 3) за визначеними характеристиками застосування БПЛА у кожній конкретній ділянці обрати найкращий варіант. Напрямок подальших

досліджень є розробка імітаційної моделі управління польотом БПЛА по заданій траєкторії польоту.

Література

1. **Алешин Б. С.**, Суханов В. Л., Шибаев В. М. Обеспечение безопасности полетов беспилотных авиационных систем в едином воздушном пространстве / Алешин Б. С., Суханов В. Л., Шибаев В. М. // Ученые записки ЦАГИ. Том XLII, 2011. – С. 73-83.
 2. **Белоглазов Д. А.**, Гузик В. Ф., Косенко Е. Ю., и др. Интеллектуальное планирование траекторий подвижных объектов в средах с препятствиями / Под ред. проф. В. Х. Пшихопова. – М. : ФИЗМАТЛИТ, 2014. – 450 с.
 3. **Васильев Н. Б.** Вокруг формулы Пика // Квант. 1974. № 12. – С. 39-43.
 4. **Гулевич С. П.** Анализ факторов, влияющих на безопасность полета беспилотных летательных аппаратов. Причины авиационных происшествий беспилотных летательных аппаратов и способы их предотвращения / С. П. Гулевич, Ю. Г. Веселов, С. П. Прядкин, С. Д. Тырнов // Наука и образование. – М. : Научное издание МГУ им. Н. Э. Баумана, 2012. – С. 165-182.
 5. **Гулевич С. П.** Обеспечение безаварийного применения беспилотных летательных аппаратов в условиях горного рельефа местности // Проблемы безопасности полетов. 2003. – № 9. – С. 20-26.
 6. **Канатников А. Н.**, Крищенко А. П., Ткачев С. Б. Допустимые пространственные траектории беспилотного летательного аппарата в вертикальной плоскости // Наука и образование. МГТУ им. Н. Э. Баумана. Электрон. журн. 2012. № 3. – С. 1-15.
 7. **Катеринчук І. С.** Методика вибору варіанта застосування тепловізійних комплексів на ділянці охорони державного кордону / І. С. Катеринчук, Б. В. Євдохович // Збірник наукових праць НАДПСУ. Серія : військові та технічні науки. – Хмельницький : Видавництво НАДПСУ, 2015. – № 2(64). – С. 184–195.
 8. **Кусайнов А. А.** Разработка системы управления беспилотным летательным аппаратом по заданной траектории / Магистерская диссертация. Новосибирск : НГУ, 2012. [Электронный ресурс], Режим доступа:

http://www.nsu.ru/xmlui/bitstream/handle/nsu/395/Text_KusainovAA.pdf. 9. **Моисеев В. С.** Прикладная теория управления беспилотными летательными аппаратами: монография / В. С. Моисеев // – Казань: ГБУ «Республиканский центр мониторинга качества образования» (Серия «Современная прикладная математика и информатика»). – 768 с.
 10. **Даник Ю. Г.** Безпілотна авіація в сучасній збройній боротьбі : монографія / Ю. Г. Даник, В. Г. Радецький, І. С. Руснак. – К. : НАОУ, 2008. – 224 с.
 11. **Саати Т. Л.** Математические модели конфликтных ситуаций. Пер. с англ. Под ред. Ушакова И. А. – М. : Сов. Радио, 1977. – 170 с.
 12. Семейство продуктов ArcGIS <http://www.esri.com/software/arcgis>.
 13. Arcview Resources. <http://resources.arcgis.com/ru/>.
 14. **Bezdek, András; Kuperberg, W.** Discrete geometry: in honor of W. Kuperberg's 60th birthday. — New York, N.Y.: Marcel Dekker, 2003. — 461 p.
 15. **Karwel A. K., Ewiak I.** Estimation of the accuracy of the SRTM terrain model on the area of Poland, The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. Vol. XXXVII. Part B7. Beijing 2008, pp. 169-172.
 16. Shuttle radar topographic mission [електронний ресурс] <http://mapgroup.com.ua/articles/dzz/109-dannye-srtm-sposoby-polucheniya-dannykh>.
 17. Coordination and Cooperation Mechanisms of the Distributed Robotic Systems Igor Korobiichuk, Yuriy Danyk, Pavlo Pozdniakov, Dorota Jackiewicz Advances in Intelligent Systems and Computing Volume 543 p.p.20-27.
 18. The Selection Methods for Multisensor System Elements of Drone Detection Igor Korobiichuk, Michał Nowicki, Yuriy G. Danyk, Sergey Dupelich, Samchyshyn Oleksyj Advances in Intelligent Systems and Computing Volume 543 p.p. 263-273.

МЕТОДИКА ОБЕСПЕЧЕНИЯ БЕЗОПАСНОСТИ ПРИМЕНЕНИЯ БПЛА ПРИ ВЫПОЛНЕНИИ СПЕЦИАЛЬНЫХ ЗАДАЧ В СЛОЖНЫХ УСЛОВИЯХ

Юрий Григорьевич Даник (д-р техн. наук, профессор, начальник института)¹
Иван Степанович Катеринчук (д-р техн. наук, профессор, профессор кафедры)²
Игорь Иванович Балицкий (к.т.н., доцент, начальник (декан) факультета)²

¹Национальный университет обороны Украины имени Ивана Черняховского, Киев, Украина

²Национальна академия Государственной пограничной службы Украины имени Богдана Хмельницкого, Хмельницкий, Украина

В статье предложена методика обеспечения безопасного применения БПЛА за счет комплексного использования технологии получения данных цифровой модели рельефа местности; волнового алгоритма поиска множества конечных точек видимости на местности бортовыми средствами наблюдения и построения контура зоны видимости; методов дискретной геометрии оценки зон видимости средств наблюдения на местности; модели программных модулей ArcGIS и Arcview Spatial Analyst для обработки многоканальных растровых данных (аэрофотоснимков, спутниковых изображений) и получения растровых слоев местности в цифровом формате который будет предоставлять возможность точно определять управляющие воздействия на безопасное использование БПЛА. Предложенная методика позволит: оценить площадь участка государственной границы, которая будет контролироваться БПЛА; определить необходимое количество и выбрать лучший вариант применения БПЛА.

Ключевые слова: безопасность полета; беспилотный летательный аппарат; государственная граница; координаты; методика; моменты; параметры управления; силы.

METHODOLOGY OF PROVIDING SAFETY OF UAV USE WHILE PERFORMING SPECIAL TASKS UNDER COMPLICATED CONDITIONS

Yurii Hryhorovych Danyk (Doctor of Technical Science, Professor, Head of the Institute)¹

Ivan Stepanovych Katerynychuk (Doctor of Technical Science, Professor, Professor of the Department)²

Ihor Ivanovych Balytskyi (Candidate of Technical Science, Associate Professor, Head (Dean) of the Faculty)²

¹**Ivan Cherniakhovskyi National Defense University of Ukraine, Kyiv, Ukraine**

²**Bohdan Khmelnytskyi National Academy of the State Border Guard Service of Ukraine, Khmelnytskyi, Ukraine**

The article proposes a methodology to ensure the safe use of UAVs due to the complex application of the technology of data acquisition of the terrain digital model; wave algorithm for finding the set of visibility endpoints in the land environment by on-board observation means and construction of the visibility zone profile; methods of discrete geometry for assessing the visibility zones of observation in the land environment; models of ArcGIS and ArcView Spatial Analyst software modules for multichannel raster data processing (aerial survey, satellite imagery) and obtaining the terrain raster layers in a digital format will provide an opportunity to state the control impacts upon the UAVs safe use more accurately. The proposed methodology will provide the opportunity to solve the following tasks: to estimate the area of the state border, which will be monitored by the UAV at each separate point of the flight; to determine the required number of UAVs that will control the designated areas and border sectors; to choose the best options according to the determined characteristics of the UAV use in each particular sector.

Keywords: safety of flight; unmanned aerial vehicle; state border; coordinates; methodology; moments; control parameters; forces.

References

- 1. Aleshin B. S., Sukhanov V. L., Shibaev V. M.** Ensuring unmanned aerial systems flight safety in a single airspace [Obespechenie bezopasnosti poletov bespilotnykh aviatsionnykh sistem v edinomvozdushnomprostranstve] / Aleshin B. S., Sukhanov V. L., Shibaev V. M. // *UchenyiezapiskiTsAHI. Vol. XLII, 2011. – P. 73-83.*
- 2. Beloglazov D. A., Guzik V. F., Kosenko E. Yu., et al.** Intellectual planning of trajectories of mobile objects within environments with obstacles [Intellektualnoe planirovanie traektorii podvizhnykh ob'ektov v sredakh s prepriatstiyami] / Pod red. prof. V. Kh. Pshikhopova. – M. : FIZMATLIT, 2014. – 450 p.
- 3. Vasilev N. B.** Around the Peak formula [VokrugformulyPika] // *Kvant. 1974. No 12. – P. 39-43.*
- 4. Gulevich S. P.** Analysis of factors affecting the safety of unmanned aerial vehicles flight. The causes of aviation accidents of unmanned aerial vehicles and ways to prevent them [Analizfaktorov, vliayushchikh na bezopasnost poleta bespilotnykh letatelnykh apparatov. Prichiny aviatsionnykh proisshchestvii bespilotnykh letatelnykh apparatov i sposoby ikh predotvrashchenia] / S. P. Gulevich, Yu. G. Veselov, S. P. Priadkin, S. D. Tyrnov // *Naukai obrazovanie. – M. : Nauchnoeizdanie MGU im. N. E. Baumana, 2012. – P. 165-182.*
- 5. Gulevich S. P.** Providing accident-free use of unmanned aerial vehicles in mountain terrain conditions // *Problems of flights safety [Obespechenie bezavarinogo primeneniya bespilotnykh letatelnykh apparatov v usloviakh gornogo relefa mestnosti // Problemybezopasnostipoletov.] 2003. – No 9. – P. 20-26.*
- 6. Kanatnikov A. N., Krishchenko A. P., Tkachev S. B.** The permissible spatial trajectories of an unmanned aerial vehicle in the vertical plane [Dopustimye prostranstvennye traektorii bespilotnogo letatel'nogo apparata v vertikalnoi ploskosti] // *Naukaibrazovanie. MGTU im. N. E. Baumana. Elektron. zhurn. 2012. No 3. – P. 1-15.*
- 7. Katerynychuk I. S.** Methodology of choosing the option for thermal imaging systems use at the state border sector [Metodyka vyboru varianta zastosuvannia teploviziinykh kompleksiv na diliansi okhorony derzhavnogo kordonu] / I. S. Katerynychuk, B. V. Yevdokhovych // *Zbirnyk naukovykh prats NADPSU. Seriya : viiskovi ta tekhnichninauky. – Khmelnytskyi : Vydavnytstvo NADPSU, 2015. – No 2(64). – P. 184–195.*
- 8. Kusainov A. A.** Development of an unmanned aerial vehicle control system along a specified trajectory [Razrabotka systemy upravleniya bespilotnym letatelnykh apparatom pozadannoi traektorii] / *Magisterskaia dySSERTatsia. Novosibirsk : NGU, 2012. [Elektronnyiresurs], available at: http://www.nsu.ru/xmlui/bitstream/handle/nsu/395/Text_KusainovAA.pdf.*
- 9. Moiseev V. S.** Applied theory of an unmanned aerial vehicles control : monograph [Prikladnaia teoriia upravleniya bespilotnykh letatelnykh apparatami: monografiia] / V. S. Moiseev // – Kazan: GBU «Respublikanskii tsentr monitoring kachestva obrazovaniia» (Seriya «Sovremennai aplikadnaia matematika i informatika»). – 768 p.
- 10. Danyk Yu. G.** Unmanned aviation in modern militant actions : monograph [Bezpilotaaviatsiia v suchasni zbroini borotbi : monografiia] / Yu. H. Danyk, V. H. Radetskyi, I. S. Rusnak. – K. : NAOU, 2008. – 224 p.
- 11. Saati T. L.** Mathematical models of conflict situations [Matematicheskie modeli konfliktnykh situatsii.] Per. sanhl. Pod red. Ushakova I. A. – M. : Sov. Radio, 1977. – 170 p.
- 12. Product family [Semeistvoproduktov] ArcGIS <http://www.esri.com/software/arcgis>.**
- 13. Arcview Resources. <http://resources.arcgis.com/ru/>.**
- 14. Bezdek, Andrés; Kuperberg, W.** Discrete geometry: in honor of W. Kuperberg's 60th birthday. - New York, N.Y: Marcel Dekker, 2003. – 461 p.
- 15. Karwel A. K., Ewiak I.** Estimation of the accuracy of the SRTM terrain model on the area of Poland, *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences. Vol. XXXVII. Part B7. Beijing 2008, pp. 169-172.*
- 16. Shuttle radar topographic mission [elektronnyiresurs] <http://mapgroup.com.ua/articles/dzz/109-dannye-srtm-sposoby-polucheniya-dannykh..>**
- 17. Coordination and Cooperation Mechanisms of the Distributed Robotic Systems Igor Korobiichuk, Yuriy Danyk, Pavlo Pozdniakov, Dorota Jackiewicz Advances in Intelligent Systems and Computing Volume 543 p.p.20-27.**
- 18. The Selection Methods for Multisensor System Elements of Drone Detection Igor Korobiichuk, Michal Nowicki, Yuriy G. Danyk, Sergey Dupelich, Samchyshyn Oleksyj Advances in Intelligent Systems and Computing Volume 543 p.p. 263-273.**