

Юрій Григорович Даник (доктор техн. наук, професор)<sup>1</sup>  
Ігор Іванович Балицький (канд. техн. наук, доцент)<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Національний університет оборони України імені Івана Черняхівського, Київ, Україна

<sup>2</sup>Національна академія Державної прикордонної служби України імені Богдана Хмельницького, Хмельницький, Україна

## ХВИЛЬОВИЙ МЕТОД ВИЗНАЧЕННЯ ТРАЕКТОРІЙ БПЛА ДЛЯ ЕФЕКТИВНОГО СПОСТЕРЕЖЕННЯ ЗА ДІЛЯНКОЮ МІСЦЕВОСТІ

У роботі розглянуто застосування хвильового методу пошуку оптимальних щодо спостереження за ділянкою кордону траєкторій польоту БПЛА у тримірному просторі. При побудові тримірної маски модифікованого хвильового алгоритму, що описує точки повітряного простору з точки зору ефективності спостереження з них за ділянкою кордону, використаний відповідний показник ефективності. Даний показник враховує сукупність факторів, що суттєво впливають на результуючу ефективність спостереження: перешкоджаючий вплив рельєфу місцевості та рослинності, роздільна здатність камери БПЛА, вплив умов спостереження. З метою зменшення обчислювальної складності хвильового алгоритму, яка суттєво зростає при збільшенні розмірності простору в якому симулюється поширення хвилі, запропонований спосіб дискретизації досліджуваного простору в якому виконується задача. Використання запропонованого підходу до дискретизації суттєво зменшує потужність множини точок на які поширюється робота хвильового методу.

**Ключові слова:** БПЛА, хвильовий метод, маска хвильового алгоритму, ефективність спостереження, побудова оптимальних маршрутів.

### Вступ

**Постановка проблеми.** Ефективне використання БПЛА з метою охорони кордону, потребує оптимізації маршрутів для забезпечення безпеки їх польоту з уникненням як статичних, так і динамічних небезпек. При визначенні раціональних маршрутів БПЛА важливим елементом є побудова просторових траєкторій їх польотів.

**Аналіз останніх досліджень і публікацій.** Вирішенню прикладних задач оптимальної побудови маршрутів присвячені праці багатьох науковців. В окремих дослідженнях розглядається побудова маршрутів по мережі доріг. Для опису цієї мережі використовується зв'язаний граф з визначенням початкової і кінцевої вершини. З метою розв'язання таких класичних задач, зокрема, застосовується алгоритм Дейкстри, мурашиний алгоритм [5]. Визначення оптимального маршруту на довільній місцевості з урахуванням перешкод і її властивостей є більш складним завданням [6]. Для його вирішення відоме застосування хвильового алгоритму (алгоритм Лі), алгоритм А\* з різними його модифікаціями [7]. В цих алгоритмах надзвичайно важливим є опис місцевості. З цієї метою використовується спеціальний матричний показник – маска місцевості. Елементи даного показника описують дискретні ділянки місцевості з точки зору доцільності прокладання через них маршруту.

Питанням оцінки ефективності спостереження за ділянкою кордону присвячена значна кількість досліджень [1–3]. У цих роботах був визначений підхід щодо такої оцінки як частки ефективного спостереження заданої смуги яка витягнута вздовж державного кордону і має складну геометричну форму. В них автори враховували обмежені можливості засобів спостереження і перешкоджаючий вплив рельєфу місцевості.

У дослідженні [4] цей підхід ([1–3]) було за взято основу при визначенні ефективності спостереження з різних точок повітряного простору з використанням

БПЛА. У роботі [4] був запропонований відповідний показник ефективності, який враховує ймовірнісний характер виявлення цілей, перешкоджаючий спостереженню вплив рельєфу місцевості і рослинності та інших перешкод. Результати дослідження [4] свідчать про те, що область найбільш ефективного спостереження за ділянкою кордону просторово зосереджена вздовж заданої смуги у певному діапазоні висот. Складність форми цієї області не дозволяє безпосередньо визначити оптимальну траєкторію польоту. Проведення пошуку траєкторій польоту у тримірному просторі надає можливість вирішення цієї задачі. Для цього можливо використати хвильовий метод. Однак використання хвильового та інших аналогічних алгоритмів відоме лише на двомірній поверхні (в окремих випадках, в задачах трасування багатоплощинних плат, розглядається декілька таких поверхонь).

Таким чином важливим є вирішення двох задач: розвитку хвильового методу і алгоритму для їх повноцінного використання у тримірному просторі та розробці методики формування маски повітряного простору на основі показника ефективності спостереження.

**Мета статті** – розробка науково-методичного апарату визначення траєкторій ефективного спостереження БПЛА за ділянкою кордону.

### Виклад основного матеріалу дослідження

Як показано у [4], для оцінки ефективності спостереження за ділянкою кордону з різних точок простору  $(x_0, y_0, h_0)$  можливо використати показник (1).

$$E_s(x_0, y_0, h_0) = \frac{\sum_{\forall(x,y) \in M} p(x, y)}{|S_0|}, \quad (1)$$

де:  $M = S_0 \cap V \cap \bar{T}$ ,  $|S_0|$  – потужність множини  $S_0$ , яка задає смугу перекриття в межах якої

необхідне спостереження;  $V$  – множина точок області можливої видимості камерою БПЛА (точок що проєкціюються на сенсор камери БПЛА);  $T$  – множина що описує області невидимості обумовлені перешкоджаючим впливом рельєфу;  $p(x,y)$  – функція,

що відображає ймовірність виявлення цілі при її знаходженні на місцевості з координатами  $(x,y)$ .

Ймовірність виявлення цілі для різних умов спостереження описується виразом (2) [4].

$$p(x, y) = \begin{cases} \frac{p_1(x, y)}{\sigma_{nc} \sqrt{2\pi}} \int_0^{f^2} \frac{L_x \cdot L_y \cdot f^2}{dp^2 \cdot (h_0 - h(x, y))^2} e^{-\frac{(x - m_{nc})^2}{2\sigma_{nc}^2}} dx, \text{ умови однорідні} \\ p_1(x, y) \cdot \int_0^{f^2} \frac{L_x \cdot L_y \cdot f^2}{dp^2 \cdot (h_0 - h(x, y))^2} \frac{x}{\sigma_{nc}^2} e^{-\frac{x^2}{2\sigma_{nc}^2}} dx, \text{ умови неоднорідні} \end{cases} \quad (2)$$

Значення координат, які відповідають (1) утворюють у повітряному просторі випнуту вздовж смуги перекриття хмару, яка зосереджена в певному діапазоні висот.

Виходячи з цього, можливо припустити, що траєкторія польоту БПЛА при русі по якій буде здійснюватись ефективне спостереження має найкоротшим чином наблизитись до області ефективного спостереження та пролягати в її межах. Однак відкритим залишається питання усунення невизначеності для точної побудови траєкторії у хмарі значень ефективності таким чином, щоб максимізувати загальну ефективність спостереження при польоті від початкової точки до кінцевої.

Для побудови оптимальних маршрутів руху з урахуванням різних факторів, що впливають на ефективність виконання задачі з можливістю огинання перешкод відомим є використання хвильового та інших аналогічних методів. Хвильовий алгоритм або алгоритм Лі представляє собою метод, що дозволяє знайти мінімальний шлях в графі з ребрами одиничної довжини. Даний метод заснований на алгоритмі пошуку в ширину і застосовується для знаходження найкоротшого шляху в графах, у тому числі планарних.

Суть хвильового методу полягає у наступному. При визначенні найкоротшого шляху у планарному графі на двовимірній карті (матриці), що складається з «прохідних» і «непрохідних» комірок, визначаються комірка старту і комірка фінішу.

З метою прокладання найкоротшого шляху від старту в усіх напрямках моделюється поширення хвилі. Кожна пройдена хвилею комірка відповідно позначається. Хвиля не може проходити через комірки помічені як «пройдені» або «непрохідні». Рух хвилі відбувається до досягнення фінішної точки. У цьому випадку існує розв'язок задачі. Якщо хвиля не досягла фінішу і пройшла всі доступні комірки, маршрут від старту до фінішу встановити неможливо (розв'язку задачі не існує). Після досягнення хвилею фінішу, маршрут прокладається в зворотному напрямі за критерієм мінімальності значень сусідніх комірок. У випадку рівності кількох значень у сусідніх комірках для вибору наступної точки маршруту використовуються додаткові умови (наприклад, з урахуванням напрямку до стартової точки).

Слід відмітити, що у більш простих різновидах хвильового методу, які орієнтовані лише на пошук найкоротшого маршруту з огинанням перепон, на етапі поширення хвилі використовується сталі прирости. При заповненні матриці в 4-х напрямках (окіл фон Неймана) використовується одиничний приріст. При використанні околу Мура, вертикальні прирости

дорівнюють 2, діагональні 3.

У випадку необхідності урахування при побудові маршруту додаткових факторів, що визначають його ефективність, природи, що описують планарний граф, зберігаються в окремій матриці. Ця матриця у хвильовому алгоритмі отримала назву «маска місцевості». При цьому, більші значення її елементів відповідають гіршим з точки зору прокладання маршруту ділянкам місцевості. Кращим для прокладання маршруту ділянкам відповідають менші значення, починаючи з 1. Нульовим значення, звичайно, кодуються непроходимі ділянки (через які неможливе прокладання маршруту).

В багатьох прикладних застосуваннях хвильового методу надзвичайно важливим є коректне визначення елементів маски місцевості. Як показано в дослідженні [8] її коректне визначення суттєво впливає на ефективність кінцевих рішень. Загальним правилом для розрахунку маски місцевості є монотонність залежності, при якому гіршим для прокладання маршруту вершинам планарного графу ставляться у відповідність більші значення і кращим вершинам графу який описує місцевість ставляться у відповідність менші значення.

Слід відмітити, що значні вимоги до ресурсів обчислювальної системи обмежували використання хвильового методу при значній кількості вершин планарного графу. Однак, зростання обсягів оперативної пам'яті та обчислювальних ресурсів сучасних комп'ютерів дозволяє вирішувати такі складні задачі [9 – 11].

При порівняно невеликій кількості вершин, відомим є застосування хвильового методу у задачах трасування багатоплощадних плат. При цьому, окрім руху у двох вимірах допустимими є переходи між шарами.

При пошуку оптимальних маршрутів польоту БПЛА необхідний розвиток описаного вище підходу для трасування маршрутів у тримірному просторі. З цією метою необхідно від двовимірної матриці або декількох матриць перейти до використання тримірного масиву. При цьому на етапі поширення хвилі аналогічно до застосувань у планарних графах, необхідно моделювати поширення хвилі. Однак таке моделювання необхідно проводити у 3-мірному просторі. Це вимагає внесення певних корегувань до хвильового методу на етапі поширення хвилі при визначенні сусідніх комірок. Аналогічні коригування необхідні і на другому етапі формування маршруту для вибору сусідніх у тримірному просторі комірок.

Таке коригування хвильового методу для побудови оптимальних маршрутів у тримірному просторі потребує відповідного збільшення розмірності при

моделюванні поширення хвилі. Також, необхідно збільшити розмірність маски місцевості. При цьому, для її представлення необхідно перейти від двомірної матриці  $M_{i,j}$  до тримірного масиву  $M_{i,j,k}$ . В цьому масиві перші два індекси відповідають дискретизації простору по двом просторовим координатам (широті і довготі). Третій індекс використовується для дискретизації простору по висоті.

Збільшення розмірності задачі моделювання поширення хвилі потребує відповідного коригування хвильового алгоритму.

Аналогічне коригування класичного хвильового алгоритму для адаптації його використання у тримірному просторі проведено і на другому етапі (відновлення шляху) від фінішної до стартової точки. При аналізі околу кожної точки траєкторії польоту з метою визначення наступної точки в напрямі до стартової, обирається точка з найменшим значенням  $X_{i,j,k}$  відповідно до околу фон Неймана у 3D просторі.

Значна можлива кількість відліків у тримірному масиві  $M_{i,j,k}$ , які описують простір в межах якого здійснюється пошук оптимального маршруту значно ускладнює обчислювальну складність задачі. Необхідність її зменшення обумовлює потребу у виборі раціонального підходу до дискретизації простору по висоті.

У растровій моделі RSG просторовий крок дискретизації по широті та довготі є однаковим ( $\Delta i = \Delta j$ ). Позначимо в межах досліджуваної ділянки: мінімальну висоту рельєфу  $h_{\min}$ , максимальну висоту рельєфу  $h_{\max}$ , максимальну висоту польоту БПЛА  $h_{\text{pmax}}$ . Розглянемо на рисунку 6 вертикальний переріз простору, що проходить через лінію паралельну одному з меридіанів. З однаковим кроком  $\Delta i = \Delta j$  на рисунку відображені вертикальні прями, що відповідають просторовим відлікам по довготі (аналогічний підхід і для відліків по широті). Якщо відліки по висоті розпочинати з мінімальної висоти рельєфу досліджуваної ділянки  $h_{\min}$ ,

$$M_{i,j,k} = \begin{cases} 0, (x_0 + \Delta x \cdot i, y_0 + \Delta x \cdot j, h(x_0 + \Delta x \cdot i, y_0 + \Delta x \cdot j) + \Delta h \cdot k) \in Z \\ 1 + 254 \cdot (1 - p(x_0 + \Delta x \cdot i, y_0 + \Delta x \cdot j)), (x_0 + \Delta x \cdot i, y_0 + \Delta x \cdot j, h(x_0 + \Delta x \cdot i, y_0 + \Delta x \cdot j) + \Delta h \cdot k) \notin Z \end{cases} \quad (3)$$

де:  $(x_0, y_0)$  – координати кута досліджуваної ділянки;

$\Delta x, \Delta y, \Delta h$  – кроки дискретизації (прирости) по відповідних просторових координатах;

$Z$  – множина заборонених для польотів областей;  
 $p(x, y)$  – показник ефективності спостереження (2).

При визначенні маски місцевості за (3) використане лінійне відображення показника ефективності спостереження з діапазону  $[0, 1]$  у відповідний діапазон маски  $[255, 1]$ . При зростанні ефективності спостереження, значення маски спадають. Найвищому значенню показника ефективності відповідає значення маски 1 що застосовується для найбільш доцільних для прокладання маршруту елементів.

Повноцінне відображення значень маски місцевості (3) потребує 4-мірного простору. Однак, для його представлення у проекції на площині можливо урахувати особливості концентрації значень, що відповідають високій ефективності спостереження в локальних областях у тримірному просторі. Тому для візуалізації (3) можливо проєктувати на площину тримірне зображення області, що утворюється множиною точок простору, значення показника (3) для яких не перевищують певного граничного значення  $M_{\text{гр}}$ .

значна частина точок опиниться під рельєфом місцевості. Ці точки, відповідно до системи обмежень при побудові маршруту, завідомо не можна використовувати для планування польоту БПЛА і їх застосування приведе до зайвих витрат пам'яті. Тому використання такого підходу є нераціональним.

Інший можливий підхід передбачає початок відліків по висоті розпочинати з відповідної висоти рельєфу. Однак якщо кількість відліків є фіксованою, окремі з них відповідатимуть висотам більшими за максимальну висоту польоту БПЛА  $h_{\text{pmax}}$ . Їх використання в маршруті, відповідно до прийнятої системи обмежень, також є неможливим.

Тому, з метою мінімізації витрат пам'яті і зменшення обчислювальної складності завдання, для представлення просторових даних у хвильовому алгоритмі у 3-мірному просторі, пропонується використання динамічних масивів зі змінною кількістю відліків по висоті.

Крок дискретизації  $\Delta h$  по висоті пропонується вибирати з урахуванням: відповідної точності вихідних даних рельєфу місцевості, потреб у точності здійснення відповідних маневрів БПЛА по висоті.

Іншим важливим питанням, щодо вибору маски місцевості є коректне визначення відображення показника ефективності спостереження (1) з урахуванням обмежень щодо забезпечення безпеки польоту в значення маски місцевості. При побудові такого відображення слід врахувати наступні типові особливості при реалізації хвильового методу: нульове значення маски відповідає непрохідним елементам, через які неможливе прокладання маршруту; менші значення маски відповідають кращим елементам для прокладання маршруту; при однобайтному кодуванні маски її значення знаходяться у діапазоні  $[0, 255]$ . З урахуванням викладеного вище, пропонується наступне визначення маски місцевості:

Звичайно, величина області відображення маски місцевості і, певною мірою, її топологія при такому підході буде залежати від вибору порогового рівня  $M_{\text{гр}}$ . При його зменшенні область буде звужуватись, і в окремих випадках, розпадатись на окремі ізольовані в просторі фрагменти.

Оскільки хвильовий метод при прокладанні маршруту «намагається» використовувати точки простору з мінімальними значеннями  $M_{i,j,k}$ , відбуватиметься максимальне заглиблення шуканого маршруту в області яким відповідають максимальні значення ефективності спостереження (1).

## Висновки й перспективи подальших досліджень

Запропонований у роботі підхід дозволяє здійснювати визначення траєкторій безпечних польотів БПЛА при русі по яким забезпечується висока ефективність спостереження. З цією метою запропоноване використання модифікованих хвильових методу і алгоритму. Модифікація алгоритму стосувалась збільшення розмірності (кількості індексів даних маски та даних поширення хвилі) для роботи алгоритму в тримірному просторі та урахування цього при його роботі (визначенні сусідніх елементів та процесі моделювання поширення хвилі та пошуку

маршруту). З метою зменшення витрат ресурсів обчислювальної системи, які суттєво залежать від загальної кількості відліків досліджуваного простору в якому будеться траєкторія польоту, запропонований підхід до дискретизації просторових даних. Використання динамічного поділу по висоті від рельєфу місцевості також потребувало відповідної

модифікації хвильового алгоритму при визначенні сусідніх відліків.

Напрямом подальших досліджень є обґрунтування вимог до БПЛА щодо можливості їх польоту по оптимальним з точки зору ефективності спостереження траєкторіям.

### Література

**1. Боровик, О. В.** Методика оцінки ефективності функціонування однієї вежі системи оптико-електронного спостереження / О. В. Боровик, Р. В. Рачок, М. М. Дармороз // Збірник наукових праць Національної академії Державної прикордонної служби України. Серія : військові та технічні науки / голов. ред. Олексієнко Б. М. – Хмельницький : Вид-во НАДПСУ, 2016. – № 4(70). – С. 208–226. **2. Боровик, О. В.** Оцінка ефективності функціонування системи оптико-електронного спостереження / О. В. Боровик, Р. В. Рачок, М. М. Дармороз // Радіоелектроніка, інформатика, управління. – 2017. – № 2 (41). – С. 93–99. **3. Рачок, Р. В.** Структурна оптимізація системи оптико-електронного спостереження / Р. В. Рачок, О. В. Боровик, Л. В. Боровик, // Радіоелектроніка, інформатика, управління. – 2017. – № 4 (43). – С. 151–161. **4. Балицький, І. І.** Забезпечення безпеки польоту безпілотних літальних апаратів при вирішенні завдань з охорони кордону / І. І. Балицький // Збірник наукових праць Національної академії Державної прикордонної служби України. Серія: Військові та технічні науки – 2018 - № 2(76) – С. 55-65. **5. Zhang, H., J. Q. Sun, Q. J. Hui, and J. Guo.** “Vehicle Route Optimization of Centrally Dynamic Route Guidance Systems.” Urban Transport XIV (August 15, 2008). doi:10.2495/ut080651. (eng). **6. Шаповалова, С. І.** Оптимізація пошуку маршруту на топографічних картах / С. І. Шаповалова, Д. К. Радченко // Адаптивні системи автоматичного управління : міжвідомчий науково-технічний збірник. – 2013. – № 1(22). – С. 60–65. – Бібліогр.: 4 назви. **7. Online Graph Pruning for**

Pathfinding on Grid Maps [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://users.cecs.anu.edu.au/~dharabor/data/papers/harabor-grastien-aaai11.pdf>. (eng). **8. Рачок, Р. В.** Методика визначення маски місцевості на основі швидкісних характеристик транспортних засобів з використанням аналогії із заломленням світла / Р. В. Рачок // Збірник наукових праць Національної академії Державної прикордонної служби України. Серія : військові та технічні науки / голов. ред. Олексієнко Б. М. – Хмельницький : Вид-во НАДПСУ, 2017. – № 3(73). – С. 350–361. **9. Катеринчук, І. С.** Використання хвильового алгоритму для визначення раціонального маршруту руху в геоінформаційних системах / І. С. Катеринчук, Р. В. Рачок, Д. А. Мул // Збірник наукових праць Національної академії Державної прикордонної служби України. Серія : військові та технічні науки / голов. ред. Олексієнко Б. М. – Хмельницький : Вид-во НАДПСУ, 2007. – № 40. – С. 29–30. **10. Катеринчук, І. С.** Алгоритм для визначення раціонального маршруту руху в геоінформаційних системах / І. С. Катеринчук, Р. В. Рачок, Д. А. Мул // Збірник наукових праць Військового інституту Київського національного університету ім. Т. Шевченка. – К. : Вид-во ВІКНУ, 2010. – № 28. – С. 320–322. **11. Рачок, Р. В.** Методика визначення раціональних маршрутів підрозділів швидкого реагування прикордонного відомства / Р. В. Рачок // Наукоємні технології. – 2017. – № 3(35). – С. 266–271.

## ВОЛНОВОЙ МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ ТРАЕКТОРИЙ БПЛА ДЛЯ ЭФФЕКТИВНОГО НАБЛЮДЕНИЯ ЗА УЧАСТКОМ МЕСТНОСТИ

*Юрий Григорьевич Даник (доктор технич. наук, профессор)<sup>1</sup>  
Игор Иванович Балицкий (канд.технич. наук, доцент)<sup>2</sup>*

<sup>1</sup>Национальный университет обороны Украины имени Ивана Черняховского, Киев, Украина

<sup>2</sup>Национальна академия Государственной пограничной службы Украины имени Богдана Хмельницкого, Хмельницкий, Украина

*В работе рассмотрено применение волнового метода поиска оптимальных по наблюдению за участком границы траекторий полета БПЛА в трехмерном пространстве. При построении трехмерной маски модифицированного волнового алгоритма, описывающего точки воздушного пространства с точки зрения эффективности наблюдения из них за участком границы, использованный соответствующий показатель эффективности. Данный показатель учитывает совокупность факторов, которые существенно влияют на результирующую эффективность наблюдения: препятствующее влияние рельефа местности и растительности, разрешение камеры БПЛА, влияние условий наблюдения. С целью уменьшения вычислительной сложности волнового алгоритма, которая существенно возрастает при увеличении размерности пространства в котором симулируется распространения волны, предложенный метод дискретизации исследуемого пространства в котором выполняется задача. Использование предложенного подхода к дискретизации существенно уменьшает мощность множества точек на которые распространяется работа волнового метода.*

**Ключевые слова:** БПЛА, волновой метод, маска волнового алгоритма, эффективность наблюдения, построение оптимальных маршрутов.

## WAVE METHOD FOR DETERMINING THE UAV TRAJECTORIES FOR EFFECTIVE OBSERVATION OVER THE SECTOR OF THE TERRAIN

*Yurii H. Danyk (Doctor of Technical Science, Professor)<sup>1</sup>  
Ihor I. Balytskyi (Candidate of Technical Science, Associate Professor)<sup>2</sup>*

<sup>1</sup>National Defence University of Ukraine named after Ivan Cherniakhovsky, Kyiv, Ukraine

<sup>2</sup>National Academy of the State Border Guard Service of Ukraine named after Bohdan Khmelnytskyi, Khmelnytskyi, Ukraine

The paper considers the application of the wave method to search for the optimal UAV flight trajectories in a three-dimensional space concerning observation over the border sector. An appropriate efficiency indicator has been used in the process of constructing a three-dimensional mask of a modified wave algorithm that describes the airspace points in view of their effectiveness for the border sector observation. This indicator takes into account a set of factors that significantly affect the resulting observation effectiveness: the impedance of terrain and vegetation, the resolution of the UAV camera, the influence of observation conditions. A method of discretization of the investigated space in which the task is performed has been proposed in order to reduce the computational complexity of a wave algorithm, which significantly increases with enlarging the dimension of space in which wave propagation is simulated. Usage of the proposed approach to discretization significantly reduces the power of the plurality of points the wave method influences at.

**Key words:** UAV, wave method, wave algorithm mask, observation efficiency, construction of optimal routes.

### References

- 1. Borovyk O. V.**, Method of estimation of the efficiency of functioning of one tower of the system of optoelectronic observation [Metodyka otsinky efektyvnosti funktsionuvannia odniiiei vezhi systemy optyko-elektronnoho sposterezhennia] / O. V. Borovyk, R. V. Rachok, M. M. Darmoroz // Zbirnyk naukovykh prats Natsionalnoi akademii Derzhavnoi prykordonnoi sluzhby Ukrainy. Serii : viiskovi ta tekhnichni nauky / holov. red. Oleksiienko B. M. – Khmelnytskyi : Vyd-vo NADPSU, 2016. – No. 4(70). – P. 208–226. **2. Borovyk O. V.**, Estimation of the efficiency of optoelectronic observation system operation [Otsinka efektyvnosti funktsionuvannia systemy optyko-elektronnoho sposterezhennia] / O. V. Borovyk, R. V. Rachok, M. M. Darmoroz // Radioelektronika, informatyka, upravlinnia. – 2017. – No. 2 (41). – P. 93–99. **3. Rachok R. V.**, Structural optimization of the system of optoelectronic observation [Strukturna optymizatsiia systemy optyko-elektronnoho sposterezhennia] / R. V. Rachok, O. V. Borovyk, L. V. Borovyk, // Radioelektronika, informatyka, upravlinnia. – 2017. – No. (43). – P. 151–161. **4. Balytskyi I. I.**, Providing safety of unmanned aerial vehicles flight in solving border guarding tasks [Zabezpechennia bezpeky polotu bezpilotnykh litalnykh aparativ pry vyrishenni zavdan z okhorony kordonu] / I. I. Balytskyi // Zbirnyk naukovykh prats Natsionalnoi akademii Derzhavnoi prykordonnoi sluzhby Ukrainy. Serii: Viiskovi ta tekhnichni nauky – 2018 – No. 2(76) – P. 55-65. **5. Zhang H.**, J. Q. Sun, Q. J. Hui, and J. Guo. “Vehicle Route Optimization of Centrally Dynamic Route Guidance Systems.” Urban Transport XIV (August 15, 2008). doi:10.2495/ut080651. (eng). **6. Shapovalova S. I.**, Optimization of route search on topographic maps [Optymizatsiia poshuku marshrutu na topografichnykh kartakh] / S. I. Shapovalova, D. K. Radchenko // Adaptivni systemy avtomatichnoho upravlinnia : mizhvidomchyi naukovotekhnichniy zbirnyk. – 2013. – No. 1(22). – P. 60–65. – Bibliogr.: 4 nazvy. 7. Online Graph Pruning for Pathfinding on Grid Maps [Elektronnyiresurs]. – Available at: <http://users.cecs.anu.edu.au/~dharabor/data/papers/harabor-grastien-aaai11.pdf>. (eng). **8. Rachok R. V.**, Methodology for determining the land environment mask on the basis of the speed characteristics of vehicles using analogy with light refraction [Metodyka vyznachennia masky mistsevosti na osnovi shvydkisnykh kharakterystyk transportnykh zasobiv z vykorystanniam analohii iz zalomlenniam svitla] / R. V. Rachok // Zbirnyk naukovykh prats Natsionalnoi akademii Derzhavnoi prykordonnoi sluzhby Ukrainy. Serii : viiskovi ta tekhnichni nauky / holov. red. Oleksiienko B. M. – Khmelnytskyi : Vyd-vo NADPSU, 2017. – No. 3(73). – P. 350–361. **9. Katerynchuk I. S.**, Using wave algorithm to determine the rational route of movement in geoinformation systems [Vykorystannia khvylovoho alhorytmu dlia vyznachennia ratsionalnoho marshrutu rukhu v heoinformatsiinykh systemakh] / I. S. Katerynchuk, R. V. Rachok, D. A. Mul // Zbirnyk naukovykh prats Natsionalnoi akademii Derzhavnoi prykordonnoi sluzhby Ukrainy. Serii : viiskovi ta tekhnichni nauky / holov. red. Oleksiienko B. M. – Khmelnytskyi : Vyd-vo NADPSU, 2007. – No. 40. – P. 29–30. **10. Katerynchuk I. S.**, Algorithm to determine the rational route of movement in geoinformation systems [Alhorytm dlia vyznachennia ratsionalnoho marshrutu rukhu v heoinformatsiinykh systemakh] / I. S. Katerynchuk, R. V. Rachok, D. A. Mul // Zbirnyk naukovykh prats Viiskovoho instytutu Kyivskoho natsionalnoho universytetu im. T. Shevchenka. – K. : Vyd-vo VIKNU, 2010. – No. 28. – P. 320–322. **11. Rachok R. V.**, Method to determine rational routs of the border agency rapid reaction units movement [Metodyka vyznachennia ratsionalnykh marshrutiv pidrozdiliv shvydkoho reahuvannia prykordonnoho vidomstva] / R. V. Rachok // Naukoiemni tekhnologii. – 2017. – No. 3(35). – S. 266–271.