

**Полоневич О.В.** Державний університет телекомунікацій, Київ

**Худов Г.В.** Харківський національний університет Повітряних Сил імені Івана Кожедуба, Харків

**Бутко І.М.** Державне підприємство «Центр державного земельного кадастру», Київ

**Маковейчук О.М.** Харківський національний університет радіоелектроніки, Харків

**Хижняк І.А.** Харківський національний університет Повітряних Сил імені Івана Кожедуба, Харків

## УДОСКОНАЛЕНА МОДЕЛЬ ФОРМУВАННЯ ВИДОВИХ ЗОБРАЖЕНЬ В СИСТЕМАХ ОБРОБКИ ГЕОПРОСТОРОВОЇ ІНФОРМАЦІЇ

**Анотація:** Предметом дослідження в роботі є модель формування видових зображень в системах обробки геопросторової інформації. Метою статті є удосконалення моделі формування видових зображень в системах обробки геопросторової інформації, яка буде враховувати недоліки існуючих моделей формування видових зображень. Наведено переваги отримання та галузі використання геопросторової інформації. Встановлено, що в системах обробки геопросторової інформації різного призначення на різних етапах проводиться обробка даних різного типу, які тим не менш, структурно ізоморфні – геопросторові інформаційні структури. Для вирішення проблеми подання різнорідних технологій програмної інженерії в єдиній формі, зручній для їх інтеграції та координації в рамках загального циклу проектування програмних систем, останнім часом використовується математичний апарат теорії категорій. Розглянуто існуючі моделі формування видових зображень в системах обробки геопросторової інформації, їх недоліки та переваги. Розглянута математична модель формування видового зображення у загальній формі може бути представлена, як результат дії оператора, що здійснює перетворення координат та операторів, що визначають яскравість відповідного елемента зображення для заданого елемента земної поверхні у спектральному каналі. Пропонується удосконалена модель формування видових зображень, яка одночасно враховує трансформацію геопросторових координат у координати зображення і перетворення яскравості внаслідок властивостей об'єктів земної поверхні та процесів проходження сонячного випромінювання у атмосфері, що забезпечує можливість коректної обробки та аналізу видових зображень у системах обробки геопросторової інформації.

**Ключові слова:** прийняття управлінських рішень, геопросторова інформація, видове зображення, модель формування зображень, геопросторові координати.

**Polonevych O. V.** State University of Telecommunications, Kyiv

**Khudov H. V.** Ivan Kozhedub Kharkiv National Air Force University, Kharkiv

**Butko I. M.** State Enterprise «State Land Cadastre Center», Kyiv

**Makoveychuk O. M.** Kharkiv National University of Radio Electronics, Kharkiv

**Khizhnyak I. A.** Ivan Kozhedub Kharkiv National Air Force University, Kharkiv

## IMPROVED MODEL FOR FORMATION OF VIEWS IN GEOSPATIAL INFORMATION PROCESSING SYSTEMS

**Abstract:** The subject of research in the work is a model of the formation of species images in systems for processing geospatial information. The purpose of the article is to improve the model of formation of species images in systems for processing geospatial information, which will take into account the shortcomings of existing models of formation of species images. The advantages of obtaining and application of geospatial information are given. It has been established that in systems for processing geospatial information for various purposes at different stages, data of various types are processed, however, they are structurally isomorphic - geospatial information structures. To solve the problem of representing heterogeneous software engineering technologies in a unified form, convenient for their integration and coordination within the general cycle of software systems design, the mathematical apparatus of category theory has recently been used. The existing models of the formation of species images in systems for processing geospatial information, their disadvantages and advantages are considered. The considered mathematical model of the formation of a view image in general form can be presented as a result of the

action of an operator performing the transformation of coordinates and operators determining the brightness of the corresponding image element for a given element of the earth's surface in the spectral channel. An improved model of the formation of species images is proposed, which simultaneously takes into account the transformation of geospatial coordinates into image coordinates and the transformation of brightness due to the properties of objects on the earth's surface and the processes of the passage of solar radiation in the atmosphere, provides the possibility of correct processing and analysis of species images in geospatial information processing systems.

**Keywords:** management decision making, geospatial information, species imaging, imaging model, geospatial coordinates.

**Полоневич О.В.** Государственный университет телекоммуникаций, Киев

**Худов Г.В.** Харьковский национальный университет Воздушных Сил имени И. Кожедуба, Харьков

**Бутко И.Н.** Государственное предприятие «Центр государственного земельного кадастра», Киев

**Маковейчук А.Н.** Харьковский национальный университет радиоэлектроники, Харьков

**Хижняк И.А.** Харьковский национальный университет Воздушных Сил им. И. Кожедуба, Харьков

## УСОВЕРШЕНСТВОВАНАЯ МОДЕЛЬ ФОРМИРОВАНИЯ ВИДОВЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ В СИСТЕМАХ ОБРАБОТКИ ГЕОПРОСТРАНСТВЕННОЙ ИНФОРМАЦИИ

**Аннотация:** Предметом исследования в работе является модель формирования видовых изображений в системах обработки геопространственной информации. Целью статьи является усовершенствование модели формирования видовых изображений в системах обработки геопространственной информации, которая будет учитывать недостатки существующих моделей формирования видовых изображений. Приведены достоинства получения и области применения геопространственной информации. Установлено, что в системах обработки геопространственной информации различного назначения на разных этапах производится обработка данных различного типа, тем не менее, структурно изоморфны – геопространственные информационные структуры. Для решения проблемы представления разнородных технологий программной инженерии в единой форме, удобной для их интеграции и координации в рамках общего цикла проектирования программных систем, в последнее время используется математический аппарат теории категорий. Рассмотрены существующие модели формирования видовых изображений в системах обработки геопространственной информации, их недостатки и достоинства. Рассмотренная математическая модель формирования видового изображения в общей форме может быть представлена как результат действия оператора, осуществляющего преобразование координат и операторов, определяющих яркости соответствующего элемента изображения для заданного элемента земной поверхности в спектральном канале. Предлагается усовершенствованная модель формирования видовых изображений, которая одновременно учитывает трансформацию геопространственных координат в координаты изображения и преобразования яркости вследствие свойств объектов земной поверхности и процессов прохождения солнечного излучения в атмосфере, обеспечивает возможность корректной обработки и анализа видовых изображений в системах обработки геопространственной информации.

**Ключевые слова:** принятия управленческих решений, геопространственная информация, видовое изображение, модель формирования изображений, геопространственные координаты.

### 1. Вступ

На сьогоднішній день використання геопросторової інформації значно збільшилося за останній час та використовується майже у всіх галузях людської діяльності. Це пов'язано з доступністю (істотно зниженням цін на геопросторову інформацію або забезпечення практично вільного доступу до знімків середньої та високої роздільної здатності з великої кількості зарубіжних супутників), оперативністю (дані можна отримувати в режимі реального часу), дистанційністю (безперешкодне отримання видової інформації усіх районів та об'єктів інтересу), об'єктивністю (незалежні та неупереджені данні про реальний стан справ на територіях) та удосконаленням технологій обробки та використання даних дистанційного зондування Землі [1-3].

Для отримання таких даних активно використовуються космічні апарати, супутники, літаки та безпілотні літальні апарати, які надають дані в режимі реального часу. Такі данні є джерелами для створення геоінформаційних систем різного призначення. Призначення геоінформаційних систем визначається вирішуваними в них науковими та прикладними завданнями, такими як інвентаризація ресурсів, управління та планування, підтримка прийняття рішень тощо [2].

Національні уряди, регіональні та місцеві органи влади мають постійну потребу в актуальній інформації про територію країни, навколишнє середовище, активи, людей, а також фізичну та соціальну інфраструктуру країни для процесу прийняття рішень на основі об'єктивних та оперативних даних для заохочення економічного розвитку, підприємницької активності, прозорості та національної безпеки.

Беручи до уваги усі переваги отримання геопросторової інформації та застосування її в геоінформаційних системах різного призначення, можна прогнозувати, що в майбутньому такі данні будуть суттєво впливати на прийняття управлінських рішень – від довгострокового планування до надзвичайних ситуацій.

## **2. Аналіз досліджень і публікацій**

Дослідження [3-4] показують, що створення високопродуктивних систем автоматизації та інформатизації має здійснюватися на базі сучасних інтелектуальних інформаційних технологій, основу яких складають системи підтримки прийняття рішення. В [5, 6] лише зазначається, що інтелектуальні системи повинні мати потужне математичне забезпечення у вигляді відповідних методів та моделей.

В роботі [7] запропоновано адекватна фотограметрична модель космічної панорамної фотозйомки, що заснована на теорії класичної фотограметрії та яка використовує інформацію від навігаційних систем. Базуючись на особливостях формування космічних панорамних зображень та математичному апараті теорії множин, космічній аналітичній фотограметрії, вирішені теоретичні питання суворої фотограметричної моделі для таких зображень. Ця модель включає в себе систему рівнянь, яка визначає порядок обчислення просторових грінвичських та геодезичних координат точки земної поверхні при відомому значенні її геодезичної висоти. Недоліком запропонованої моделі є необхідність отримувати значення геодезичної висоти та використання даної моделі лише для космічних панорамних зображень.

В роботі [8] запропоновано розробка моделі, що описує в кожний момент часу зйомки перехід від порядкових номерів пікселів цифрового космічного сканованого зображення до топологічних параметрів елементів фоточуттєвої структури сканеру. Така фотограметрична модель лише космічних панорамних зображень описує сувору функціональну залежність геодезичної широти, довготи, висоти точки земної поверхні та її просторових грінвичських координат з топологічними параметрами фотоприйомної структури, а також поточним відносним та місцевим часом зйомки. Дана модель не враховує перетворення яскравості внаслідок властивостей об'єктів земної поверхні та процесів проходження сонячного випромінювання в атмосфері.

В роботі [9] запропоновано формування моделей радіолокаційних зображень на основі стохастичних диференціальних рівнянь еліптичного типу. Недоліком є те, що запропонована модель призначена лише для формування тонових радіолокаційних зображень.

## **3. Ціль (мета) дослідження**

Метою даного дослідження є удосконалення моделі формування видових зображень в системах обробки геопросторової інформації.

## **4. Результати дослідження**

Процес розробки та прийняття управлінського рішення, як правило, включає 7 стадій [4–6]:

- аналіз ситуації та постановку мети;
- вибір й обґрунтування критеріїв ефективності та можливих наслідків рішень, які приймаються;

- розгляд варіантів рішень;
- кінцеве формулювання рішення;
- прийняття рішення та доведення його до виконавців;
- організація виконання рішень;
- контроль за виконанням рішень.

В системах обробки геопросторової інформації різного призначення на різних етапах проводиться обробка даних різного типу, які тим не менш, структурно ізоморфні – геопросторові інформаційні структури (GeoIC).

Для вирішення проблеми подання різнорідних технологій програмної інженерії в єдиній формі, зручній для їх інтеграції та координації в рамках загального циклу проектування програмних систем останнім часом використовується математичний апарат теорії категорій, на базі якого побудовано універсальні теоретико-категорійні семантичні моделі цих технологій [10].

Основні геопросторові інформаційні структури, що використовуються:

- 1) «поверхня» – **TGeoSurface**, представляє собою множину точок поверхні Землі, що задані своїми геокоординатами (географічна довгота і широта, висота над рівнем моря);
- 2) «зображення» – **TImage**, множина точок, кожна з яких є вектором інтенсивності в різних спектральних діапазонах, точки задаються у прямокутній системі координат зображення; (задача геоприв'язки)
- 3) «карта» – **TMap**, множина точок, кожна з яких є вектором геоознак (тип поверхні, зонування тощо), точки задаються геокоординатами;
- 4) «ознаки» – **TFeature**, множина ознак (площа, індекс вегетації тощо);
- 5) «рішення» – **TDecision**, множина управлінських рішень.

Надалі, ці GeoIC будемо називати об'єктами, а можливі дії, при яких проводяться перетворення об'єктів – морфізмами. Для введених вище об'єктів можливі такі морфізми, що дозволяють отримувати з одного об'єкту інший:

- 1) тотожні перетворення:
  - Id<sub>TGeoSurface</sub>**: TGeoSurface -> TGeoSurface;
  - Id<sub>TImage</sub>**: TImage -> TImage;
  - Id<sub>TMap</sub>**: TMap -> TMap;
  - Id<sub>TFeature</sub>**: TFeature -> TFeature;
  - Id<sub>TDecision</sub>**: TDecision -> TDecision.
- 2) дистанційне зондування поверхні:
  - MRemoteSensing**: TGeoSurface -> TImage;
- 3) картографування:
  - MMapping**: TImage -> TMap;
- 4) рендеринг:
  - MRendering**: TMap -> TImage;
- 5) виділення ознак:
  - MExtraction**: TMap -> TFeature;
- 6) прийняття управлінських рішень:
  - MManagement**: TFeature -> TDecision
- 7) діяльність:
  - MAction**: TDecision -> TGeoSurface;
- 8) районування:
  - MZoning**: TDecision -> TMap;
- 9) вибір ознак:
  - MSelection**: TDecision -> TFeature;
- 10) вибір параметрів ДЗЗ:
  - MControl**: TDecision -> TImage.

Математична модель формування видового зображення  $I$  для ділянки земної поверхні  $g$  (TGeoSurface  $\rightarrow$  TImage) у загальній формі може бути представлена, як результат дії двох

операторів:

1) оператора  $T$ , що здійснює перетворення координат:

$$\begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix} = T \begin{pmatrix} \varphi \\ \theta \\ h \end{pmatrix}, \quad (1)$$

де  $\begin{pmatrix} \varphi \\ \theta \\ h \end{pmatrix}$  – вектор географічних координат (довгота, широта, висота над рівнем моря);  $\begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix}$  –

вектор координат на зображенні.

2) операторів  $\Phi$ , що визначають яскравість відповідного елемента зображення для заданого елемента земної поверхні  $g$  у спектральному каналі  $c$ :

$$I_c = \Phi_c(g). \quad (2)$$

Розглянемо докладніше введені оператори та їх явний вигляд.

**Оператор перетворення координат.** Перш за все перейдемо від географічних

координат  $\begin{pmatrix} \varphi \\ \theta \\ h \end{pmatrix}$  до евклідових координат (відносно центру Землі):

$$\begin{aligned} X &= R_{Earth} \sin \theta \cos \varphi, \\ Y &= R_{Earth} \sin \theta \sin \varphi, \end{aligned} \quad (3)$$

$$Z = R_{Earth} \cos \theta + h,$$

де  $R_{Earth}$  – радіус Землі.

Як було вказано у роботах [11-15], у загальному випадку оператор перетворення координат можна представити у вигляді моделі перспективної проекції. Тоді, якщо

координати супутника у момент зйомки задаються вектором  $\begin{pmatrix} X_0 \\ Y_0 \\ Z_0 \end{pmatrix}$ , то, позначивши через

$p_x, p_y$  – розміри пікселя матриці сканера,  $\chi$  – кут нахилу пікселя,  $(c_x, c_y)$  – координати головної точки, а  $f$  – фокусну відстань сканера, можемо записати що

$$\begin{pmatrix} x \\ y \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} f/p_x & \tan \chi & c_x \\ 0 & f/p_y & c_y \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \mathbf{R}^T & -\mathbf{R}^T \mathbf{t} \\ \mathbf{0}^T & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} X - X_0 \\ Y - Y_0 \\ Z - Z_0 \\ 1 \end{pmatrix}, \quad (4)$$

де  $\mathbf{R}^T$  – транспонована 3x3-матриця повороту площини сканера відносно земної поверхні (кут між відповідними нормаллями),  $\mathbf{t}$  – 3-вектор зміщення центру сканера відносно його

проекції на поверхню Землі,  $\mathbf{0}^T$  – транспонований нульовий 3-вектор-стовбець (іншими словами, нульовий 3-вектор-рядок). Щоб відобразити той факт, що матрицю  $\begin{pmatrix} \mathbf{R}^T & -\mathbf{R}^T \mathbf{t} \\ \mathbf{0}^T & 1 \end{pmatrix}$  формують складні об’єкти, ми виділили їх жирним шрифтом (на відміну від звичайного числа 1 у правому нижньому кутку матриці).

Рівняння (4) може бути записано у вигляді (5):

$$\begin{pmatrix} x \\ y \\ 1 \end{pmatrix} = P \begin{pmatrix} X - X_0 \\ Y - Y_0 \\ Z - Z_0 \\ 1 \end{pmatrix}, \quad (5)$$

де введено матрицю P:

$$P = \begin{pmatrix} f/p_x & \tan \chi & c_x \\ 0 & f/p_y & c_y \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \mathbf{R}^T & -\mathbf{R}^T \mathbf{t} \\ \mathbf{0}^T & 1 \end{pmatrix}. \quad (6)$$

Зауважимо, що у роботах [14-15], які посилаються на одну із піонерських робіт [11], дана модель записується у формі (7):

$$\begin{pmatrix} x \\ y \\ -c \end{pmatrix} = \lambda A \begin{pmatrix} X - X_0 \\ Y - Y_0 \\ Z - Z_0 \end{pmatrix}, \quad (7)$$

де  $c$  – константа, яка описує характеристики сканера,  $\lambda$  – масштабний коефіцієнт,  $A$  – матриця перетворення (в [11] пропонується використовувати афінне перетворення).

Легко бачити, що перетворення (4) є узагальненням перетворення (7).

Таким чином, враховуючи все вищесказане, явний деталізований вигляд оператора перетворення координат  $\mathbf{T}$  пропонується задавати у вигляді (8):

$$\begin{pmatrix} x \\ y \\ 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} f/p_x & \tan \chi & c_x \\ 0 & f/p_y & c_y \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \mathbf{R}^T & -\mathbf{R}^T \mathbf{t} \\ \mathbf{0}^T & 1 \end{pmatrix} \times \\ \times \left[ \left[ R_{Earth} \begin{pmatrix} \sin \theta \cos \varphi \\ \sin \theta \sin \varphi \\ \cos \theta \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 \\ 0 \\ h \end{pmatrix} - \begin{pmatrix} X_0 \\ Y_0 \\ Z_0 \end{pmatrix} \right] \right]. \quad (8)$$

Розглянемо докладніше вираз (8). Матриця (9) називається матрицею внутрішнього калібрування [16-17]:

$$K = \begin{pmatrix} f/p_x & \tan \chi & c_x \\ 0 & f/p_y & c_y \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \quad (9)$$

Матриця (10) називається, в свою чергу, матрицею зовнішнього калібрування [16-17]:

$$C = \begin{pmatrix} \mathbf{R}^T & -\mathbf{R}^T \mathbf{t} \\ \mathbf{0}^T & 1 \end{pmatrix} \quad (10)$$

Знаходження матриць внутрішнього і зовнішнього калібрування носить, в свою чергу, назву задачі калібрування [16-17].

Задача калібрування формується таким чином: маючи  $n$  відповідностей

$$\begin{pmatrix} x \\ y \end{pmatrix}_i = \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \end{pmatrix}_i \quad (11)$$

необхідно знайти матрицю  $P$ , таку, що задовольняються умови (12)

$$\begin{pmatrix} x \\ y \\ 1 \end{pmatrix}_i = \begin{pmatrix} X \\ Y \\ Z \\ 1 \end{pmatrix}_i. \quad (12)$$

Зауважимо, що оскільки земна поверхня не є пласкою, то рівняння (12) буде давати значну похибку. Тому пропонується спочатку компенсувати нелінійності для координат  $X_i$ ,  $Y_i$  (очевидно, що координату  $Z_i$  можна залишити без змін) за допомогою моделі радіальних спотворень, яка може бути записана у вигляді [18]:

$$X'_i = (X_i - \bar{X}_i)(1 + k_1 r_i^2 + k_2 r_i^4) + \bar{X}_i, \quad (13)$$

$$Y'_i = (Y_i - \bar{Y}_i)(1 + k_1 r_i^2 + k_2 r_i^4) + \bar{Y}_i, \quad (14)$$

$$r_i^2 = (X_i - \bar{X}_i)^2 + (Y_i - \bar{Y}_i)^2, \quad (15)$$

де  $X'_i$ ,  $Y'_i$  – координати із скомпенсованими нелінійностями;  $\bar{X}_i$ ,  $\bar{Y}_i$  – середні значення для  $X_i$ ,  $Y_i$  відповідно;  $k_1$ ,  $k_2$  – параметри радіальних спотворень.

Таким чином, умову (12) пропонується замінити на умову (16):

$$\begin{pmatrix} x \\ y \\ 1 \end{pmatrix}_i = P \begin{pmatrix} X' \\ Y' \\ Z \\ 1 \end{pmatrix}_i. \quad (16)$$

Знаходження розв'язку даної задачі складається з таких етапів:

1) знаходження матриці  $P$  по набору відповідностей (11) між точками поверхні і зображення;

2) декомпозиція матриці  $P$  на матриці внутрішнього калібрування  $K$  та матрицю зовнішнього калібрування  $C$ ; після чого з матриці  $C$  за допомогою QR-розкладу знаходиться матриця поворота камери  $R$  і вектор зміщення  $t$  [17].

Перший етап зводиться, до розв'язування оптимізаційної задачі

$$\min_P \sum_i \left\| \begin{pmatrix} x \\ y \\ 1 \end{pmatrix}_i - P \begin{pmatrix} X' \\ Y' \\ Z \\ 1 \end{pmatrix}_i \right\|^2. \quad (17)$$

Вводячи 12-вектор  $p$ , який складається з елементів матриці  $P$ :

$$p = (P_{11} \ P_{12} \ P_{13} \ P_{14} \ P_{21} \ P_{22} \ P_{23} \ P_{24} \ P_{31} \ P_{32} \ P_{33} \ P_{34})^T, \quad (18)$$

можемо сформулювати (16) у еквівалентному матричному вигляді (19)

$$Ap = \mathbf{0}, \quad (19)$$

де введено матрицю (20):

$$A = \begin{pmatrix} X'_1 & Y'_1 & Z_1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & -x_1 X'_1 & -x_1 Y'_1 & -x_1 Z_1 & -x_1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & X'_1 & Y'_1 & Z_1 & 1 & -y_1 X'_1 & -y_1 Y'_1 & -y_1 Z_1 & -y_1 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ X'_n & Y'_n & Z_n & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & -x_n X'_n & -x_n Y'_n & -x_n Z_n & -x_n \\ 0 & 0 & 0 & 0 & X'_n & Y'_n & Z_n & 1 & -y_n X'_n & -y_n Y'_n & -y_n Z_n & -y_n \end{pmatrix} \quad (20)$$

і позначено через  $\mathbf{0}$  нульовий 12-вектор.

Розв'язок системи (19) знаходиться у вигляді власного вектора (з найменшим власним значенням) для добутку матриць  $A^T A$  [17].

Другий етап:

– виділяється матриця  $M$ , яка представляє собою верхню  $3 \times 3$  підматрицю матриці  $P$ ; за допомогою QR-розкладу матриця  $M$  розкладається на добуток матриці внутрішнього калібрування  $K$  та матрицю поворота  $R$ , тобто:

$$M = KR. \quad (21)$$

– знаходиться вектор зміщення  $t$ :

$$t = K^{-1} \begin{pmatrix} P_{14} \\ P_{24} \\ P_{34} \end{pmatrix}, \quad (22)$$

що й дає розв'язок задачі калібрування.

**Оператор перетворення яскравості.** Як було вказано у роботах [19-21] модель



відбивання світла у найпростішому випадку можна записати як (рис. 1):

$$i_0 = \rho \cos \phi, \quad (23)$$

де  $i_0$  – інтенсивність відбитого світла,  $\rho$  – коефіцієнт відбивання від поверхні,  $\phi$  – кут напрямком на джерело світла і нормалю до земної поверхні.

Якщо рівняння поверхні задано явно у вигляді (24):

$$h = h(X, Y), \quad (24)$$

то у системі координат сканера нормаль до поверхні Землі запишеться у вигляді 3-х мірного вектора (25):

$$n = \left( -\frac{\partial h}{\partial X} \quad -\frac{\partial h}{\partial Y} \quad 1 \right)^T. \quad (25)$$

Нехай сканер дивиться вниз на поверхню, його оптична вісь направлена по осі  $z$ . Тоді вектор  $(0 \ 0 \ 1)^T$  вказує в напрямку спостерігача (рис. 1).

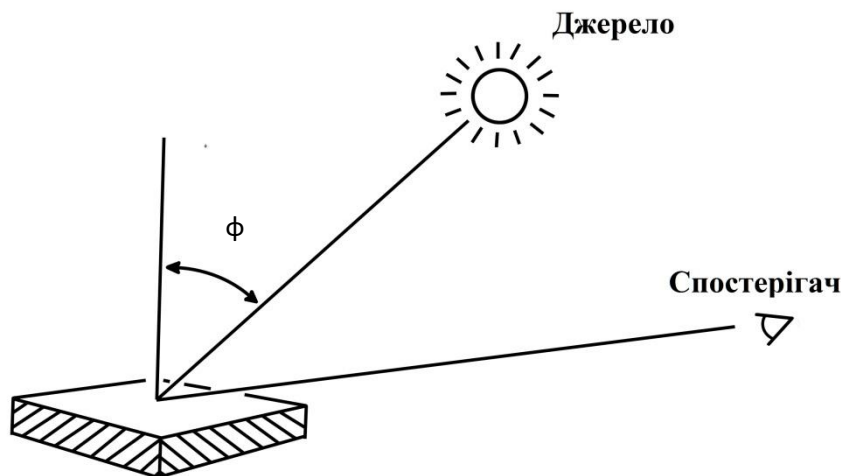


Рис. 1. Визначення кутів при відбиванні світла від елемента поверхні

Припустимо далі, що вектор  $n'$  задає напрямок на одиночне віддалене точкове джерело освітлення, в такому випадку:

$$\cos \phi = \frac{n \cdot n'}{|n| \cdot |n'|}. \quad (26)$$

Врахуємо тепер, що коефіцієнт відбивання залежить від того, до якого класу  $k$  належить об'єкт, від поверхні, якого відбивається світло, і від спектрального каналу  $c$ , тобто  $\rho = \rho(k, c)$ . Якщо відбивання пройшло від об'єкта з індексом  $k'$ , то формально можемо записати:

$$\rho(k, c) = \sum_{k'} \rho_{k,c} \delta_{k,k'}, \quad (27)$$

отже рівняння (23) представиться як

$$i_0(X, Y, c) = \sum_{k'} \rho_{k,c} \delta_{k,k'} \cdot \frac{n \cdot n'}{|n| \cdot |n'|}. \quad (28)$$

Далі слід врахувати проходження світла в атмосфері (задається для кожного спектрального каналу коефіцієнтами проходження  $\gamma_c$ ), а також часткове відбивання від хмар (з коефіцієнтами  $\alpha_c$ ), тоді, як показано в роботах [22]–[27], результуюча інтенсивність  $i'(X, Y, c)$  буде задаватися виразом (29):

$$i'(X, Y, c) = \alpha_c + \frac{(1 - \alpha_c)^2 \gamma_c^2 i(X, Y, c)}{1 - \alpha_c \gamma_c^2 i(X, Y, c)}. \quad (29)$$

Остаточний вираз отримується, якщо врахувати функцію чутливості сканера  $S(i)$ , яка визначає яскравість кожного елемента зображення  $I(X, Y, c)$  для кожного спектрального каналу в залежності від інтенсивності світла, що зареєстровано від поверхні:

$$I(X, Y, c) = S \left( \alpha_c + \frac{(1 - \alpha_c)^2 \gamma_c^2 i(X, Y, c)}{1 - \alpha_c \gamma_c^2 i(X, Y, c)} \right). \quad (30)$$

У частинному, але практично важливому випадку, коли значення добутку  $\alpha_c \gamma_c^2$  близьке до 0, можна розкласти дріб у виразі (30) в ряд і, обмежуючись першим доданком, отримуємо:

$$I(X, Y, c) = S \left( \alpha_c + \beta_c \sum_{k'} \rho_{k,c} \delta_{k,k'} \cdot \frac{n \cdot n'}{|n| \cdot |n'|} \right), \quad (31)$$

де  $\beta_c = (1 - \alpha_c)^2 \gamma_c^2$ .

Врахуємо вираз (25) для вектору  $n$  і позначимо через  $n'_x$  і  $n'_y$  відповідні компоненти вектору  $n'$  тоді

$$I(X, Y, c) = S \left( \alpha_c + \beta_c \sum_{k'} \rho_{k,c} \delta_{k,k'} \cdot \frac{1 + n'_x \frac{\partial h}{\partial X} + n'_y \frac{\partial h}{\partial Y}}{\sqrt{1 + n'^2_x + n'^2_y} \cdot \sqrt{1 + \left( \frac{\partial h}{\partial X} \right)^2 + \left( \frac{\partial h}{\partial Y} \right)^2}} \right). \quad (32)$$

Для того, щоб позбавитися від залежності від  $n'$ , прийемо, що світло має не точковий, а дифузний характер, отже можна усереднити за всіма напрямками.

Враховуючи все вищесказане, явний деталізований вигляд оператора  $\hat{\Phi}$ , що визначає яскравість відповідного елемента зображення для заданого елемента земної поверхні, пропонується задавати у вигляді (33):

$$I(X, Y, c) = S \left[ \alpha_c + \beta_c \sum_{k'} \rho_{k,c} \delta_{k,k'} \cdot \frac{1}{4\pi} \iint_{\Omega} \left( \frac{1 + \Omega_x \frac{\partial h}{\partial X} + \Omega_y \frac{\partial h}{\partial X}}{\sqrt{1 + \left( \frac{\partial h}{\partial X} \right)^2 + \left( \frac{\partial h}{\partial X} \right)^2}} \right) d\Omega \right]. \quad (33)$$

Збираючи все разом, кінцевий вираз для моделі формування зображення в операторній формі записується як

$$I(x, y) = \bigcup_c \hat{\Phi}_c \left\{ g \left( T \{ \varphi, \theta, h \} \right) \right\}, \quad (34)$$

де в явному вигляді оператори  $T$  і  $\hat{\Phi}_c$  задаються виразами (8) і (33) відповідно.

Таким чином, удосконалена модель формування видових зображень, яка одночасно враховує трансформацію геопросторових координат у координати зображення і перетворення яскравості внаслідок властивостей об'єктів земної поверхні та процесів проходження сонячного випромінювання у атмосфері, що забезпечує можливість коректної обробки та аналізу видових зображень у системах обробки геопросторової інформації.

### 5. Обговорення результатів проведеного дослідження

Отримані в роботі результати пояснюються тим, що, на відміну від існуючих, в удосконаленій моделі формування зображень одночасно враховується трансформація геопросторових координат у координати зображення, властивості об'єктів земної поверхні, процеси проходження сонячного випромінювання у атмосфері. При проведенні дослідження прийняті наступні основні обмеження та припущення:

- прямолінійність розповсюдження сонячного світла в атмосфері Землі;
- розглядаються лише оптико-електронні зображення;
- розглядаються лише геопросторові системи обробки інформації;
- не враховується вплив різного роду шумів та спотворюючих факторів;
- не враховано пора року, метеорологічні умови.

Для поліпшення та поглиблення отриманих результатів необхідно провести додаткові дослідження та експерименти щодо порівняння модельних даних з результатами натурних експериментів.

В подальших дослідженнях необхідно розробити модель формування зображень в інших частотних діапазонах.

### 6. Висновки

Встановлено, що в системах обробки геопросторової інформації проводиться обробка даних різного типу, структурно ізоморфних – геопросторових інформаційних структур. Для вирішення проблеми подання різнорідних технологій програмної інженерії в єдиній формі, зручній для їх інтеграції та координації в рамках загального циклу проектування програмних систем, останнім часом використовується математичний апарат теорії категорій.

Розглянуті існуючі моделі формування видових зображень. Встановлено, що використання даних моделей в системах обробки геопросторової інформації не враховують одночасно трансформацію геопросторових координат у координати зображення та перетворення яскравості внаслідок властивостей об'єктів земної поверхні та процесів проходження сонячного випромінювання в атмосфері.

Математична модель формування видового зображення у загальній формі може бути представлена, як результат дії оператора, що здійснює перетворення координат та операторів, що визначають яскравість відповідного елемента зображення для заданого елемента земної поверхні у спектральному каналі.

Удосконалена модель формування видових зображень, яка одночасно враховує

трансформацію геопросторових координат у координати зображення і перетворення яскравості внаслідок властивостей об'єктів земної поверхні та процесів проходження сонячного випромінювання у атмосфері, що забезпечує можливість коректної обробки та аналізу видових зображень у системах обробки геопросторової інформації.

Напрямок подальших досліджень є розробка моделі формування зображень в інших частотних діапазонах.

### Список використаної літератури

1. Shikhov A. N., Cherepanova E. S. Ponomarchuk A. I. Geoinformation systems: the use of GIS technologies in solving hydrological problems, a workshop, textbook. manual, Perm, 2014. 91 p.
2. Earth Observing System. High-Resolution Satellite Imagery. <https://eos.com/ru/products/high-resolution-images/> (дата звернення: 05.03.2020).
3. Філіпович В. Є. Оперативний контроль поширення нелегального видобутку бурштину та оцінка збитків, заподіяних державі, за матеріалами багатозональної космічної зйомки. Екологічна безпека та природокористування. 2015. № 4(20). С. 92–97.
4. Управлінські рішення: евристичність, креативність, транспарентність: навчальний посібник. / Під ред. М.П.Бутка. Ніжин: ТОВ «Видавництво «Аспект-Поліграф», 2008. 428 с.
5. Савченко А. С., Синельников О. О. Методи та системи штучного інтелекту. Київ: НАУ, 2017. 190 с.
6. Кушлик-Дивульська О. І., Кушлик Б. Р. Основи теорії прийняття рішень. Київ, 2014. 94 с.
7. Андронов В. Г., Лазарева Е. В. Координатная привязка и ортокоррекция космических изображений в режимах панорамной съемки со сканированием головным зеркалом. Системный анализ, управление и обработка информации. 2011. С.
8. Андронов В. Г., Дегтярєв С.В., Лазарева Е. В. Фотограмметрическая модель космических панорамных изображений. Известие ВУЗов. Приборостроение. 2012. Т. 55. № 1. С. 19–24.
9. Кадочников А. П., Казанцев А. А., Мишуков О. А., Шигорев С.А. Формирование моделей радиолокационных изображений в виде стохастических дифференциальных уравнений для распознавания космических объектов. Труды учебных заведений. 2019. Т. 5. № 4. С. 106–113.
10. Ковалєв С. П. Теоретико-категорный подход к проектированию программных систем. Фундаментальная и прикладная математика. 2014. Том 19, Выпуск 3. С.111–170.
11. Abdel-Aziz Y. I, Karara H.M. Direct Linear Transformation from Comparator Coordinates into Object Space Coordinates. ASP Symposium on Close-Range Photogrammetry, Falls Church, VA. 1971. P. 1–18.
12. Zhang J., Zhang X. Strict geometric model based on affine transformation for remote sensing image with high resolution. International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing. 2003. № 34 (B3). P 309–312.
13. Morgan M., Kim K., Jeong S., Habib A. Parallel projection modelling for linear array scanner scenes. XXth Congress of ISPRS, 12-23 July, 2004.
14. Гнатушенко В. В. Альтернативні геометричні моделі одержання супутникових зображень високого розрізнення. Геометричне та комп'ютерне моделювання. 2004. Вип. 8. С. 48–53.
15. Гнатушенко В. В. Геометричні методи формування зображень високого розрізнення зі супутника IKONOS. Праці Таврійської державної агротехнічної академії. 2004. Вип. 4, Т.27. С. 35–39.
16. Дэвид Форсайт, Жан Понс. Компьютерное зрение. Современный подход. Москва: Вильямс, 2004. 928 с.
17. Hartley R., Zisserman A. Multiple View Geometry in Computer Vision (2nd ed.). UK: Cambridge University Press, 2003. 670 p.

18. Zhang Z. A Flexible New Technique for Camera Calibration. MSR-TR-98-71. Microsoft Research. 1998. [Electronic resource]. URL: [https://www.researchgate.net/publication/3193178\\_A\\_Flexible\\_New\\_Technique\\_for\\_Camera\\_Calibration](https://www.researchgate.net/publication/3193178_A_Flexible_New_Technique_for_Camera_Calibration). (дата звернення: 19.01.2020).
19. Peter A. Burrough, Rachael A. McDonnell. Principles of Geographical Information Systems. Oxford, Oxford University Press, 1998. 333 p.
20. J. Schott. Remote Sensing: The Image Chain Approach (2nd ed.). Oxford, Oxford University Press, 2007. 668 p.
21. Robert J. Woodham, "Using Digital Terrain Data To Model Image Formation In Remote Sensing," Proc. SPIE 0238, Image Processing for Missile Guidance, (23 December 1980); doi: 10.1117/12.959167.
22. Маковейчук О. М., Подліпаєв В. О. Алгоритми реставрації дефокусованих зображень. Системи озброєння і військова техніка. 2005. № 3-4. С. 99–103.
23. Mashkov O.A., Sobchuk V.V., Varabash O.V., Dakhno N.B., Shevchenko H.V. and Maisak T.V. (2019), "Improvement of variational-gradient method in dynamical systems of automated control for integro-differential models". Mathematical Modeling and Computing. Vol. 6. No. 2. P. 344 – 357.
24. Barabash O.V., Dakhno N.B., Shevchenko H.V. and Maisak T.V. (2017), "Dynamic Models of Decision Support Systems for Controlling UAV by Two-Step Variational-Gradient Method". Proceedings of 2017 IEEE 4th International Conference "Actual Problems of Unmanned Aerial Vehicles Developments (APUAVD)", October 17-19, 2017, Kyiv, Ukraine. National Aviation University. P. 108 – 111.
25. Барабаш О.В., Бодров С.В., Мусієнко А.П. Аналіз побудови мережі відеоконтролю пунктів митного спостереження на основі функціонально стійкої системи. Науково-практичний журнал «Зв'язок». Київ, ДУТ, 2014. № 2. С. 8 – 11.
26. Маковейчук А. Н., Подліпаєв В. А., Худов Г. В. Теоретическое обоснование методики защиты видовых изображений от воздействия маскирующих помех. Системи обробки інформації. 2005. Вип. 6. С. 62–71.
27. Бутко І. М., Маковейчук О. М. Визначення джерел лісових пожеж за супутниковими знімками. Науковий вісник НЛТУ України. 2012. Вип. 22.3. С. 80-84. Режим доступу: [http://nbuv.gov.ua/UJRN/nvntu\\_2012\\_22](http://nbuv.gov.ua/UJRN/nvntu_2012_22).

## References

1. Shikhov A. N., Cherepanova E. S. and Ponomarchuk A. I. (2014), "Geoinformation systems: the use of GIS technologies in solving hydrological problems": a workshop, textbook. Manual. Perm, 91 p.
2. "Earth Observing System. High-Resolution Satellite Imagery" (2020), <https://eos.com/ru/products/high-resolution-images/>. 05 March 2020.
3. Filipovych V. Ye. (2015), "Operational control over the spread of illegal amber mining and assessment of damage caused to the state, based on multi-zone space survey". *Ecological safety and nature management*, № 4(20). P. 92–97.
4. "Management decisions: heuristics, creativity, transparency": a textbook (2008), Pid red. M.P. Butka. Nizhy`n: TOV «Vy`davny`cztvo «Aspekt-Poligraf». 428 p.
5. Savchenko A. S. and Sy`nel`nikov O. O. (2017), "Methods and systems of artificial intelligence." Ky`yiv: NAU. 190 p.
6. Kushly`k-Dy`vul`s`ka O. I. and Kushly`k B. R. (2014), "Fundamentals of decision theory." Ky`yiv, 94 p.
7. Andronov V. H. Lazareva E. V. (2011), Coordinate referencing and orthocorrection of space images in panoramic shooting modes with scanning with a head mirror. *System analysis, management and information processing*. P. 19–24.
8. Andronov V. H. Dehtiarjov S.V. Lazareva E. V. (2012), Photogrammetric model of space panoramic images. *News of universities. Instrumentation*. Vol. 55. № 1. P. 19–24.

9. Kadochnykov A. P. Kazantsev A. A. Myshukov O. A. Shyhorev S.A. (2019), Formation of models of radar images in the form of stochastic differential equations for recognition of space objects. *Proceedings of educational institutions*. Vol. 5. № 4. P. 106–113.
10. Kovalëv S. P. (2014), "Category-theoretic approach to the design of software systems". *Fundamental and Applied Mathematics*. 19(3). P.111–170.
11. Abdel-Aziz Y. I. and Karara H. M. (1971), "Direct Linear Transformation from Comparator Coordinates into Object Space Coordinates". *ASP Symposium on Close-Range Photogrammetry*, Falls Church, VA. P. 1–18.
12. Zhang J. and Zhang X. (2003), "Strict geometric model based on affine transformation for remote sensing image with high resolution". *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*. № 34 (B3). P 309–312.
13. Morgan M., Kim K., Jeong S. and Habib A. (2004), "Parallel projection modelling for linear array scanner scenes". *XXth Congress of ISPRS*, 12-23 July, 2004.
14. Gnatushenko V. V. (2004), "Alternative geometric models for obtaining high-resolution satellite images". *Geometric and computer modeling*. 8. P. 48–53.
15. Gnatushenko V. V. (2004), "Geometric methods of forming high-resolution images from the IKONOS satellite". *Proceedings of the Tavriya State Agrotechnical Academy*. 4. (27). P. 35–39.
16. Forsyth David, Ponce Jean (2004), "Computer vision. A Modern Approach." Moskva: Vy`lyams. 928 p.
17. Hartley R. and Zisserman A. (2003), "Multiple View Geometry in Computer Vision (2nd ed.)." UK: Cambridge University Press. 670 p.
18. Zhang Z. (1998), A Flexible New Technique for Camera Calibration. MSR-TR-98-71. Microsoft Research. [Electronic resource]. URL: [https://www.researchgate.net/publication/3193178\\_A\\_Flexible\\_New\\_Technique\\_for\\_Camera\\_Calibration](https://www.researchgate.net/publication/3193178_A_Flexible_New_Technique_for_Camera_Calibration). 19 Jan. 2020.
19. Peter A. Burrough and Rachael A. McDonnell (1998), "Principles of Geographical Information Systems". Oxford, Oxford University Press. 333 p.
20. Schott J. (2007), "Remote Sensing: The Image Chain Approach (2nd ed.)." Oxford, Oxford University Press 668 p.
21. Robert J. Woodham (1980), "Using Digital Terrain Data To Model Image Formation In Remote Sensing," *Proc. SPIE 0238, Image Processing for Missile Guidance*, doi: 10.1117/12.959167.
22. Makoveichuk O. M. and Podlipayev V. O. (2005), "Algorithms for restoration of defocused images". *Weapons systems and military equipment*. № 3-4. P. 99–103.
23. Mashkov O.A., Sobchuk V.V., Barabash O.V., Dakhno N.B., Shevchenko H.V. and Maisak T.V. (2019), "Improvement of variational-gradient method in dynamical systems of automated control for integro-differential models". *Mathematical Modeling and Computing*. Vol. 6. No. 2. P. 344 – 357.
24. Barabash O.V., Dakhno N.B., Shevchenko H.V. and Majsak T.V. (2017), "Dynamic Models of Decision Support Systems for Controlling UAV by Two-Step Variational-Gradient Method". *Proceedings of 2017 IEEE 4th International Conference "Actual Problems of Unmanned Aerial Vehicles Developments (APUAVD)"*, October 17-19, 2017, Kyiv, Ukraine. National Aviation University. P. 108 – 111.
25. Barabash O.V., Bodrov S.V. and Musienko A.P. (2014), "Analysis of the construction of a network of video surveillance of customs observation posts based on a functionally stable system". *Scientific and practical journal "Communication"*. Issue 2. P. 8 – 11.
26. Makovejchuk A. N., Podlypaev V. A. and Xudov G. V. (2005), "Theoretical substantiation of the method of protection of species images from the effects of masking interference". *Information processing systems*. 6. P. 62–71.
27. Butko I. M. and Makoveichuk O. M. (2012), "Identification of forest fire sources based on satellite images". *Scientific Bulletin of NLTU of Ukraine*. 22.3. P. 80-84. Access mode: [http://nbuv.gov.ua/UJRN/nvnltnu\\_2012\\_22](http://nbuv.gov.ua/UJRN/nvnltnu_2012_22).