

УДК 550.8.013(0.86.44):528.711(045)

## ІНФОРМАЦІЙНА ТЕХНОЛОГІЯ МОДЕЛЮВАННЯ РЕЛЬЄФУ МІСЦЕВОСТІ ІЗ ПРИВ'ЯЗКОЮ ДАНИХ АЕРОКОСМІЧНОЇ ФОТОЗЙОМКИ

*П. О. Приставка*, д-р техн. наук, проф.; *Є. П. Нічіков*

Національний авіаційний університет  
chindakor@mail.ru

*Запропоновано інформаційну технологію побудови тривимірних карт місцевості, що використовує інформацію з електронних фізичних карт та знімки поверхні Землі як початкові дані.*

**Ключові слова:** 3D моделювання, модель рельєфу, текстура, фільтрація, сплайн-інтерполяція.

*Proposed the information technology for construction of three-dimensional maps, using information from electronic physical maps and satellite images or other images of a surface of the Earth, as the initial data.*

**Keywords:** 3D modeling, terrain model, texture, filtering, spline interpolation.

### Вступ

На сьогодні створення реалістичної тривимірної карти може застосовуватися при розробленні навігаційних систем, тривимірних каталогів карт, контролю поточного стану повітряного простору, у кінематографі тощо. Окремим перспективним напрямком є моделювання 3D карт місцевості, де як текстури можуть використовуватись знімки, отримані внаслідок дистанційного зондування Землі (ДЗЗ) космічними апаратами.

Тривимірні моделі карт на основі даних ДЗЗ можуть бути складовими сховищ даних, дані можуть бути деталізовані або агреговані [1] для розв'язання конкретних задач, наприклад, моделювання поточного стану повітряного простору, імітація злітної смуги аеропорту тощо.

Зображення, що є результатами фотозйомки поверхні Землі космічними апаратами, можуть мати велику роздільну здатність, що не дозволяє виводити їх у повний розмір.

У термінах концепції сховищ даних слід відмітити, що фотознімки поверхні Землі є деталізованими даними.

Оброблення та використання таких даних має певні складнощі у той час, як інтерактивна тривимірна модель являє собою сукупність агрегованих даних та надає можливість користувачеві взаємодіяти з картою, дивитись на неї з різних точок, під різним кутом, деталізовано розглядати окремі фрагменти або оцінювати загальну картину.

Питання побудови тривимірної карти передбачає побудову просторової моделі рельєфу місцевості на основі даних геодезичних вимірювань та накладання космічного знімку поверхні Землі із прив'язкою по реперних точках. До того ж, процес створення 3D карти може супроводжуватись потребою розв'язання додаткових задач:

1) збільшення відліків за якими відбувається моделювання тривимірної поверхні на основі методів інтерполяції;

2) зміни в представленні 3D моделі, що сприяють кращому сприйняттю користувачем (ефекти «завади», «згладжування» тощо);

3) процедури обробки накладених текстур (покращення якості).

Подані вище питання потребують дослідження та вибору засобу їх розв'язання.

### Аналіз публікацій

Вказані задачі розв'язуються за допомогою геоінформаційних систем (ГІС) — сучасних комп'ютерних технологій, що дозволяють поєднати модельне зображення території (електронне відображення карт, схем, космо-, аерозображень земної поверхні) з інформацією табличного типу (різноманітні статистичні дані, списки, економічні показники тощо). Також, під ГІС розуміють систему управління просторовими даними та асоційованими з ними атрибутами [2; 3].

Передовими технологіями у напрямку візуалізації просторових моделей, що реалізують, у тому числі і в ГІС, є технологія DirectX [4] (набір API функцій для ОС Windows) та OpenGL [5; 6] (кросплатформена бібліотека), які дозволяють ефективно використовувати апаратні засоби для розв'язку цієї задачі.

На сьогодні існує багато ГІС різноцільового призначення. До найбільш потужних можна віднести InterGraph GeoMedia, ERDAS Imagine, ERSI ArcInfo. Інші мають тільки окремі засоби для роботи з тривимірними моделями (MapInfo, Panorama Map) або дуже обмежені можливості (Autodesk Map 3D, gvGIS, GRASS, MapXtreme, K-MINE, STAR-APIC, Tekla Xpower, Zulu, Дубль-ГІС, Manifold, IndorGIS, CityCom) [7]. 3D модулі GeoMedia, Imagine і ArcInfo для візуалізації використовують набір інструкцій відеокарти OpenGL версії 1.1.

Цей набір інструкцій дає змогу швидко отримувати зображення, проте графіка невисокої якості, на відміну від моделей створених за до-

помогою генераторів ландшафтів (наприклад, Bryce [8]). У ArcGIS цифрову модель рельєфу можна побудувати за допомогою інтерпольованих поверхонь (grid) або методу апроксимації поверхні елементарними трикутниками — метод TIN (*Triangulated Irregular Network*) [9].

Проте для розв'язання конкретної прикладної задачі не завжди може підійти одна з існуючих ГС, оскільки:

1) більшість ГС мають закритий програмний код, а, отже, виключається можливість внесення змін до програмного комплексу;

2) вартість розв'язку невеликої задачі може бути суттєво збільшена внаслідок включення до неї вартості конкретної ГС;

3) ГС загального застосування мають розв'язувати широкий спектр задач, більшість з яких не потрібні у випадку розв'язання однієї конкретної. У зв'язку з цим можуть виникати додаткові витрати на навчання персоналу роботі з програмними комплексами.

Отже, розроблення та дослідження інформаційної технології моделювання рельєфу місцевості із прив'язкою даних аерокосмічної фотозйомки у вигляді локальної геоінформаційної системи є актуальними.

### Постановка задачі

Як було зазначено, для створення тривимірної карти необхідно побудувати просторову модель рельєфу місцевості та прив'язати до неї знімок поверхні Землі. Етапи розроблення 3D карти подано на рис. 1.



Рис. 1. Етапи побудови тривимірної карти

Одним із засобів формування початкових даних для моделі рельєфу є оцифрування електронної фізичної карти із визначеною шкалою висот. Фізична карта — загальногеографічна карта, що представлена схематичним зображенням певного фрагменту місцевості та шкалою висот.

Відповідно до кожного кольору зі шкали висот поставлено діапазон висот (рис. 2).

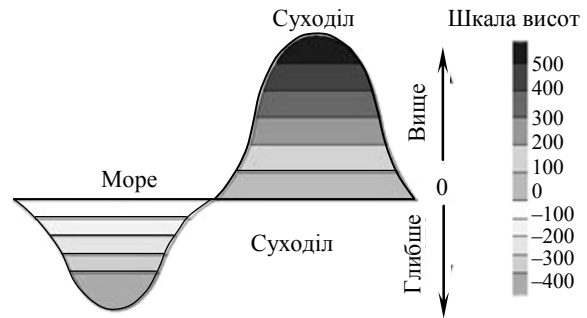


Рис. 2. Шкала висот у фізичній карті

Для визначеності будемо вважати, що фізична карта подана у вигляді растрового зображення в кольоровій моделі RGB.

Позначимо  $p_{i,j}$ ,  $i = \overline{0, W-1}$ ;  $j = \overline{0, L-1}$  — інтенсивність кольорової складової пікселя, де  $W$ ,  $L$  — лінійні розміри зображення.

Нехай  $\epsilon$  цифрове зображення великої роздільної здатності, отримане внаслідок дистанційного зондування космічними апаратами (Landsat, [10] тощо), яке визначає фрагмент поверхні Землі. Тут і далі будемо називати дане зображення текстурою у сенсі текстури тривимірної моделі.

Позначимо  $p_{i,j}^*$ ,  $i = \overline{0, W^*-1}$ ;  $j = \overline{0, L^*-1}$  інтенсивність кольорової складової (R, G, чи B) пікселя, де  $W^*$ ,  $L^*$  — лінійні розміри текстури.

Для визначеності при використанні тривимірних позначень будемо використовувати декартову систему координат, де осі  $x$  та  $z$  відповідають ширині та довжині фізичної карти (текстури), а вісь  $y$  — висоті над рівнем моря.

Постає задача створення за цими даними тривимірної карти. Тобто необхідно розробити інформаційну технологію побудови тривимірних карт місцевості, що дозволяє розв'язувати такі задачі:

- 1) розпізнавання електронної фізичної карти та ідентифікацію шкали висот;
- 2) побудову просторової моделі місцевості за отриманими даними;
- 3) прив'язку реалістичної текстури до побудованої моделі;
- 4) покращення якості накладеної текстури;
- 5) зміни в 3D моделі, що сприяють кращому сприйняттю користувачем.

До того ж, під час реалізації інформаційної технології на комп'ютері необхідно використовувати тривимірну карту та внести до неї зміни в режимі реального часу.

**Мета** даної статті — створення нової інформаційної технології побудови тривимірних карт,

що враховує зроблені зауваження, на основі інформації з електронних фізичних карт та даних ДЗЗ або аерофотозйомки, як початкові дані.

### Викладення основного матеріалу

Як зазначено питання побудови тривимірної карти передбачає побудову просторової моделі рельєфу місцевості на основі даних геодезичних досліджень та задачу накладання фотознімка поверхні Землі із прив'язкою по реперних точках. Далі розглянемо етапи створення 3D-карти згідно зі схемою наведеною на рис. 1.

### Розпізнавання фізичної карти

На цьому етапі постає задача співставлення даних електронної фізичної карти з просторовими координатами.

Покладемо  $w$  та  $l$  — лінійні розміри за осями  $x$  та  $z$  фрагменту просторової моделі, що відповідає одному пікселю зображення.

Аналізуючи шкалу висот, можна кожному  $(i, j)$ -му пікселю ( $i = 0, W - 1$ ;  $j = 0, L - 1$ ) фізичної карти з інтенсивністю кольорової складової  $p_{i,j}$  поставити у відповідність висоту  $h_{i,j}$ .

Колір пікселя вхідного зображення може не збігатися з кольором шкали висот, наприклад, якщо на карті існують умовні позначки, зображення річок, назви міст та інші символи. Тоді рекурсивно аналізується значення кольорів сусідніх пікселів, поки не буде знайдене необхідне значення висоти.

### Побудова тривимірної моделі

На сьогодні існує багато графічних акселераторів, які мають апаратні засоби для зафарбовування тривимірних об'єктів, видалення невидимих частин, накладення текстур тощо.

На попередньому кроці було отримано множину  $h_{i,j}$ ;  $i = 0, W - 1$ ;  $j = 0, L - 1$ , точок, що утворені за рівномірною сіткою. Вказана властивість дозволяє досить легко побудувати мережу трикутників:

$$h_{i,j}, h_{i+1,j}, h_{i,j+1}, \dots; i = 0, W - 2; j = 0, L - 2.$$

Отримані полігональні області за допомогою програмних засобів (DirectX, OpenGL тощо) передаються для подальшої обробки акселератором, що дозволяє використовувати переваги 3D-прискорювачів [6].

### Накладання текстури

Прив'язка до просторової моделі рельєфу місцевості реалістичної текстури полягає в розпізнаванні на ній точок місцевості, визначенні горизонтальних координат цих точок та співставлення їх з точками 3D-моделі.

Якщо визначають координати  $(x, z)$  точок місцевості у горизонтальній площині, таку прив'язку називають плановою.

Контурна точка на аерофотознімку із визначеними координатами називається реперною точкою або опознаком. Як опозначки обирають чіткі контурні точки, розташування яких можна визначити на знімку та ототожнити на місцевості. Реперні точки не слід обирати на крутих схилах, округлих контурах лісу або сільськогосподарських культур тощо.

Далі відбувається коригування текстури на основі даних просторової моделі, або орторектифікація текстури [15]. Таким чином, піксельні координати заданих реперних точок на зображенні мають збігатися з відповідними координатами точок з просторової моделі (рис. 3).

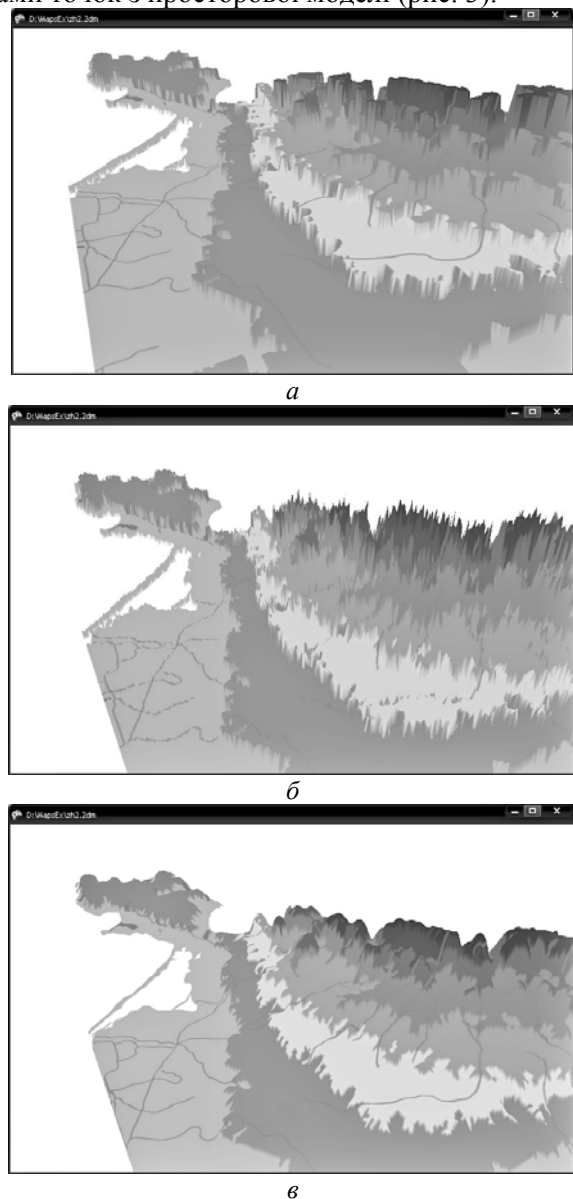


Рис. 3. Тривимірна модель із накладеною фізичною картою: *a* — без змін у візуальному представленні; *б* — зашумлена; *в* — зашумлена та згладжена

### Додаткові зміни в представленні моделі

Наведені нижче зміни в представленні 3D-моделі сприяють кращому сприйняттю користувачем, проте не є засобами збільшення її деталізації. Їх застосування залежить від задачі, яка поставлена перед конкретною реалізацією просторової моделі місцевості.

### Накладання шуму

Електронні фізичні карти містять інформацію про обмежену кількість зрізів висоти. Для візуального покращення результуючої просторової моделі, та зменшення ефекту «східчастості» (рис. 3, а) запропоновано накладання випадкового нормально розподіленого шуму, який залежить від значення висоти точок, на які він накладається, тобто:

$$\tilde{h}_{i,j} = h_{i,j} + \varepsilon_h; \quad i = \overline{0, W-1}; \quad j = \overline{0, L-1},$$

де  $\varepsilon_h = N(0, \sigma_\varepsilon)$  — нормована випадкова величина із середньоквадратичним відхиленням  $\sigma_\varepsilon = \varphi(h)$  — функцією від висоти над рівнем моря, що підбирається таким чином, щоб будь-які значення  $\varepsilon_h$  не виходили за межі відповідного проміжку зі шкали висот.

### Згладжування

Для надання «реалістичності» вигляду моделі можна після накладання шуму провести згладжування послідовності  $\tilde{h}_{i,j}$ ,  $i = \overline{0, W-1}$ ;  $j = \overline{0, L-1}$  за використанням низькочастотних фільтрів, наприклад, таких [12]:

$$\tilde{h}_{i,j}^* = \sum_{ii=i-r_i}^{i+r_i} \sum_{jj=j-r_j}^{j+r_j} \gamma_{ii-i, jj-j} \tilde{h}_{ii, jj};$$

$$i = \overline{r_i, W-r_i-1}; \quad j = \overline{r_j, L-r_j-1},$$

де  $(2r_i+1) \times (2r_j+1)$  — розмір маски низькочастотного фільтра;  $\gamma$  — маска фільтра, наприклад:

$$\gamma = \frac{1}{64} \begin{pmatrix} 1 & 6 & 1 \\ 6 & 36 & 6 \\ 1 & 6 & 1 \end{pmatrix}, \text{ тощо.}$$

Щоб отримати швидкодіючі обчислювальні схеми для реалізації у програмному забезпеченні, достатньо розлого подати наведені вирази з найменшою кількістю арифметичних операцій. Наприклад, для фільтра з маскою  $\gamma$  має місце подання лише з одинадцятьма операціями:

$$h_{i,j}^* = \left( 36h_{i,j} + 6(h_{i-1,j} + h_{i,j-1} + h_{i+1,j} + h_{i,j+1}) + \right. \\ \left. + h_{i-1,j-1} + h_{i-1,j+1} + h_{i+1,j-1} + h_{i+1,j+1} \right) / 64.$$

### Збільшення кількості відліків

У загальному випадку кількість пікселів електронної фізичної карти не збігається з кількістю пікселів накладеної текстури:

$$W \neq W^* \text{ та } L \neq L^*.$$

Відповідно, розмірність послідовності  $h$  менша, ніж розмірність накладеної текстури. Для збільшення кількості відліків  $h$  є потреба в реалізації методів інтерполяції. Для забезпечення швидкодії обчислень доцільним є використання локальних методів апроксимації, зокрема, пропонується застосовувати локальні поліноміальні сплайни на основі  $B$ -сплайнів, що є близькими до інтерполяційних у середньому [13], що дозволяють доповнити масив вершин просторової моделі до розмірів зображення. Наприклад, розгорнуте подання сплайн-оператору другого порядку таке:

$$S_{2,0}(h, x, z) = \frac{1}{64} \left( (1-t)^2 (1-q)^2 h_{i-1,j-1} + \right. \\ \left. + (1-t)^2 (6-2q^2) h_{i-1,j} + (1-t)^2 (1+q)^2 h_{i-1,j+1} + \right. \\ \left. + (6-2t^2)(1-q)^2 h_{i,j-1} + (6-2t^2)(6-2q^2) h_{i,j} + \right. \\ \left. + (6-2t^2)(1+q)^2 h_{i,j+1} + (1+t)^2 (1-q)^2 h_{i+1,j-1} + \right. \\ \left. + (1+t)^2 (6-2q^2) h_{i+1,j} + (1+t)^2 (1+q)^2 h_{i+1,j+1} \right),$$

де  $i = \overline{1, W-2}$ ;  $j = \overline{1, L-2}$ ;  $t = 2(x-iz)/w$ ;  $q = 2(z-il)/l$ ;  $(x, z)$  — координати шуканої точки.

Алгоритми на основі зазначених сплайнів мають велику швидкодію завдяки низькій кількості арифметичних операцій та можуть працювати у режимі реального часу.

### Покращення якості текстури

Текстура, отримана за допомогою космічного апарата, може бути спотворена внаслідок мікроруку камери фіксації. Дана вада є поширеною при нефіксованій фотозйомці або зйомці з платформи, яка може підлягати деякому механічному впливу, наприклад, мікрівібрації (аерофотозйомка тощо).

Наслідок такої вади може бути усунено або, принаймні, значно зменшено, не тільки апаратними засобами, але й процедурами математичної обробки, що функціонують у режимі реального часу.

Припустимо, що спотворення зображення спричинене мікроруком камери фіксації, тобто накладено випадковий низькочастотний фільтр:

$$p_{i,j}^* = \text{Low}(p_{i,j}^0); \quad i = \overline{0, W^*-1}; \quad j = \overline{0, L^*-1},$$

де  $p_{i,j}^0$  — кольорові складові ідеального неспотвореного зображення.

Позначимо  $\{\tilde{p}_{i,j}^*\}_{i=0, W^*-1, j=0, L^*-1}$  — послідовність відповідної кольорової складової растра після стабілізації. У праці [14] подано лінійні оператори  $\tilde{p}_{i,j}^* = C(p_{i,j}^*)$  такі, що

$$\tilde{p}_{i,j}^* \approx p_{i,j}^0; \quad i = \overline{0, W^* - 1}; \quad j = \overline{0, L^* - 1},$$

для випадкової маски  $\chi$ :

$$C(p_{i,j}^*) = \sum_{ii=i-r_i}^{i+r_i} \sum_{jj=j-r_j}^{j+r_j} \chi_{ii-i, jj-j} p_{ii, jj}^0;$$

$$i = r_i, W - r_i - 1; \quad j = r_j, L - r_j - 1;$$

де (для прикладу)

$$\chi = \frac{1}{3136} \begin{pmatrix} 1 & 8 & -74 & 8 & 1 \\ 8 & 64 & -592 & 64 & 8 \\ -74 & -592 & 5476 & -592 & -74 \\ 8 & 64 & -592 & 64 & 8 \\ 1 & 8 & -74 & 8 & 1 \end{pmatrix}.$$

### Програмне забезпечення

Для реалізації запропонованої інформаційної технології була розроблена автоматизована система, призначена для розпізнавання текстур цифрових фізичних карт, ідентифікації шкали висот та побудови тривимірних моделей за отриманими даними. Система складається з двох окремих доданків, які можуть працювати незалежно один від одного.

Перший доданок MapCreator (рис. 4) реалізує розпізнавання електронної фізичної карти у форматі JPEG або BMP та збереження отриманих даних у файл формату 2dm.

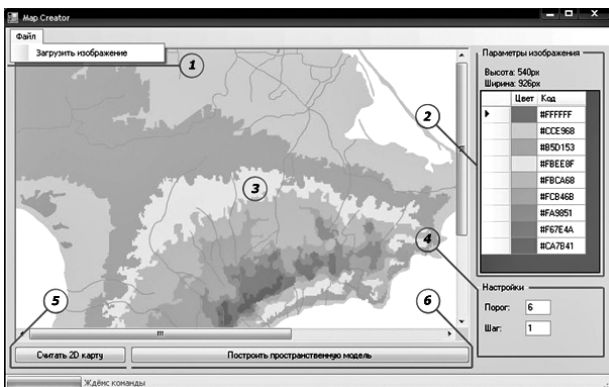


Рис. 4. Головне вікно першого доданка:

- 1 — менюзавантаження зображення;
- 2 — панель параметрів зображення;
- 3 — основна частина вікна доданка; 4 — панель налаштувань зачитування карти;
- 5 — кнопка запуску зачитування карти;
- 6 — кнопка побудови просторової моделі

Другий доданок Map3DBuilder (див. рис. 3) дозволяє зчитати дані з файла формату 2dm та реалізує методи побудови та перетворення просторової моделі (накладання текстури, зашумлення, згладжування тощо).

Системні вимоги для другого доданка: процесор: Pentium з тактовою частотою не менше 1ГГц або аналогічний процесор; ОЗП: не менше 96 МБ (рекомендовано 256 МБ); операційна система: Windows XP Service Pack 3 або вище; екран: роздільна здатність 800 × 600, 256 кольорів; графічна карта: із підтримкою DirectX 9.0c та підтримкою піксельних шейдерів версії 1.1.

Необхідні компоненти: Microsoft .NET Framework 3.5 або вище; Microsoft XNA Framework Redistributable 3.0.

### Висновки

Розроблено інформаційну технологію моделювання рельєфу місцевості з реальними текстурами тривимірних карт, які отримані в результаті зйомки поверхні Землі, наприклад, космічними апаратами. До складу інформаційної технології входить:

1) використання оцифрованих даних фізичної карти як карти висот тривимірної поверхні;

2) використання методів інтерполяції тривимірних даних на основі локальних поліноміальних сплайнів близьких до інтерполяційних у середньому для збільшення кількості відліків за якими відбувається моделювання тривимірної поверхні;

3) використання методів накладання шуму та методів низькочастотної фільтрації для кращого сприйняття моделі користувачем, зокрема, зменшення ефекту «сходинок»;

4) використання цифрової стабілізації зображень для покращення накладених текстур.

Інформаційну технологію реалізовано у розробленому програмному забезпеченні, що дозволяє розпізнавати електронні фізичні карти, будувати просторові моделі рельєфу, накладати реалістичні текстури, зашумлювати та згладжувати поверхню моделі, поліпшувати якість текстури за допомогою цифрових стабілізаторів.

Отримані результати можуть мати застосування при розробці авіатренажерів, симуляторів для підготовки пілотів літаків, навігаційних систем, каталогів карт, для оперативного відображення даних дистанційного зондування Землі, контролю поточного стану повітряного простору та ін. Подальші дослідження можуть припускати розробку автоматизованих систем навігації авіаційного руху, моделювання погодних умов, моделювання зльоту та посадки літака тощо.

**ЛІТЕРАТУРА**

1. *Технологии анализа данных: Data Mining, Visual Mining, Text Mining, OLAP* / А. А. Барсегян, М. С. Куприянов, В. В. Степаненко [и др.]. — 2-е изд., перераб. и доп. — СПб. : БХВ-Петербург, 2007. — 384 с.
2. *Савиных В. П.* Геоинформационный анализ данных дистанционного зондирования / В. П. Савиных, В. Я. Цветков. — М. : Картогеоцентр-Геоиздат, 2001. — 228 с.
3. *Електронний ресурс.* — Режим доступу: [http://uk.wikipedia.org/wiki/Геоінформаційна\\_система](http://uk.wikipedia.org/wiki/Геоінформаційна_система)
4. *Адамс Д.* DirectX: продвинутая анимация: пер. с англ. / Д. Адамс. — М. : КУДИЦ-Образ, 2004. — 480 с.
5. *Райт Р.* OpenGL. Суперкнига: Пер. с англ. / Р. Райт, Б. Липчак. — 3 изд. — М. : Вильямс, 2006. — 1040 с.
6. *Энджел Э.* Интерактивная компьютерная графика. Вводный курс на базе OpenGL: пер. с англ. / Э. Энджел. — 2-е изд. — М. : Вильямс, 2001. — 532 с.
7. *Орещенко А. В.* Способы программной реализации тривимірних реалістичних картографічних моделей / А. В. Орещенко // Геодезія, картографія і аерофотознімання : міжвідомчий науково-технічний збірник. Вип. 72 / Нац. ун-т «Львівська політехніка»; — Л. : Видавництво Нац. ун-ту «Львівська політехніка», 2009. — 82—90 с.
8. *Китченс С.* Врусе для дизайнера: пер. с англ. / С. Китченс, В. Гавенда. — СПб. : ДиаСофтЮП, 2001. — 656 с.
9. *ArcGIS 9 ArcMap* Руководство пользователя. — М. : ESRI, 2004. — 558 с.
10. *Електронний ресурс.* — режим доступу: <http://landsat.gsfc.nasa.gov/>
11. *Електронний ресурс.* — режим доступу: [http://ru.wikipedia.org/wiki/Текстура\\_\(трёхмерная\\_графика\)](http://ru.wikipedia.org/wiki/Текстура_(трёхмерная_графика)).
12. *Приставка П. О.* Обчислювальні аспекти застосування поліноміальних сплайнів при побудові фільтрів / П. О. Приставка; зб. наук. праць. — Д. : Вид-во Дніпропетр. ун-ту, 2006. — Т. 10. — С. 3—14.
13. *Приставка П. О.* Поліномаїльні сплайни при обробці даних / П. О. Приставка. — Д. : Вид-во Дніпропетр. ун-ту, 2004. — 236 с.
14. *Приставка П. О.* Застосування комбінованих фільтрів на основі поліноміальних сплайнів при обробці растрових зображень / П. О. Приставка // Вісн. НАУ. — К. : НАУ, 2008. — №4. — С. 104—107.
15. *Горошко М. П.* Дистанційні спостереження за гірськими територіями басейну Верхньої Тиси / М. П. Горошко, С. І. Миклуш, О. Г. Часковський // Науковий вісник. — Львів: УкрДЛТУ. — 2003. — Вип. 13.1. — 284 с.

Стаття надійшла до редакції 15.05.2012.