

П.В. Фриз, к.т.н., проф.*Житомирський військовий інститут ім. С.П. Корольова
Національного авіаційного університету***МЕТОДИКА ОЦІНЮВАННЯ ОСВІТЛЕНОСТІ КОНТРОЛЬОВАНИХ РАЙОНІВ
ЗЕМЛІ В ЗАДАЧАХ КОСМІЧНИХ СПОСТЕРЕЖЕНЬ**

В статті пропонується методика оцінювання умов освітленості будь-яких районів земної поверхні через побічні параметри – азимут і кут місця Сонця в топоцентричній пунктової сферичній системі координат. Основою для розрахунку координат Сонця обрано метод фундаментальних аргументів. Наведено результати експериментальних досліджень щодо оцінювання точності розрахунків за допомогою запропонованої методики.

Постановка проблеми. При плануванні космічного знімання у видимому діапазоні електромагнітних хвиль актуальним завданням є оцінка умов освітленості районів зйомки в ті періоди часу, коли поле зору технічного засобу дистанційного зондування Землі (ДЗЗ) наводиться на ці райони.

На практиці умови освітленості районів зйомки як правило характеризуються двома параметрами – кутом падіння сонячних променів відносно лінії місцевого горизонту α_S і азимуту падіння сонячних променів β_S [1].

При проведенні зйомки, залежно від типу апаратури технічного засобу ДЗЗ, кут α_S повинен бути не менше ніж заданий. Наприклад, при проведенні зйомки багатозональним скандувальним пристроєм вітчизняного космічного апарату “Січ-2 (МС-2-8)” необхідно, щоб виконувалася умова $30^\circ \leq \alpha_S \leq 70^\circ$ [2]. Проте на практиці вказані вимоги виконуються не завжди.

Так незадовільні умови освітлення в північній півкулі припадають на осінньо-зимовий період. При цьому для районів з широтами від 45° до 55° , де знаходиться Україна та інші європейські держави, в зазначений період Сонце підіймається над горизонтом не вище ніж на 25° .

Найгірші умови освітлення припадають на день зимового сонцестояння. В цей день у місцевий полудень максимальний кут місця Сонця визначається за виразом [3]:

$$\alpha_S = 90^\circ - B_m - \varepsilon,$$

де B_m – геодезична широта m -го району спостереження; $\varepsilon \approx 23,5^\circ$ – кут нахилу площини екліптики до площини небесного екватора.

Наприклад, на широті Києва ($B \approx 50^\circ$) максимальне значення кута місця 21 грудня кожного року становить $\alpha_S \approx 16,5^\circ$.

Таким чином, враховуючи зазначені астрономічні умови, здійснювати зйомку цього району за допомогою космічного апарату типу “Січ-2” з листопада по січень недоцільно.

Разом з тим, як показує досвід обробки інформації ДЗЗ, значення кута β_S необхідні для визначення висоти об’єктів на космічних знімках і в деяких інших випадках. Тому задача точного розрахунку умов освітленості будь-якого району земної поверхні є актуальною як для планування космічного знімання так і для вдосконалення процесу обробки інформації ДЗЗ.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Можливий підхід до розв’язання даного завдання подано в монографіях [4, 5]. Однак, як показала експериментальна перевірка запропонованого в них алгоритму, похибки розрахунків значення α_S іноді перебільшує декілька градусів при вимогах не більше одного градуса. Така погрішність не припустима для планування космічного знімання.

Крім того, спроби розв’язання поставленого завдання зроблені в статті [6]. Однак точність розрахунків також не задовольняє заданим вимогам. Крім того, при проведенні розрахунків необхідно користуватися астрономічними довідниками, що не завжди зручно.

Тому для практичних потреб в інтересах розробки методики оцінювання освітленості контрольованих районів Землі необхідно розробити алгоритм прогнозування координат Сонця з похибками, які не перевищують одного градуса, що і становить мету даної статті.

Викладення основного матеріалу дослідження. Для досягнення цієї мети пропонується такий підхід.

По-перше, початковими даними доцільно обрати геодезичні координати заданого району спостереження: довготу L_m та широту B_m , його висоту над поверхнею земного еліпсоїда h_m , а також київський час t_k потрібної календарної дати.

По-друге, шуканими величинами є кут місця α_s та азимут β_s центру Сонця в заданий момент часу в топоцентричній пунктової сферичній системі координат (ТПССК) (рис. 1).

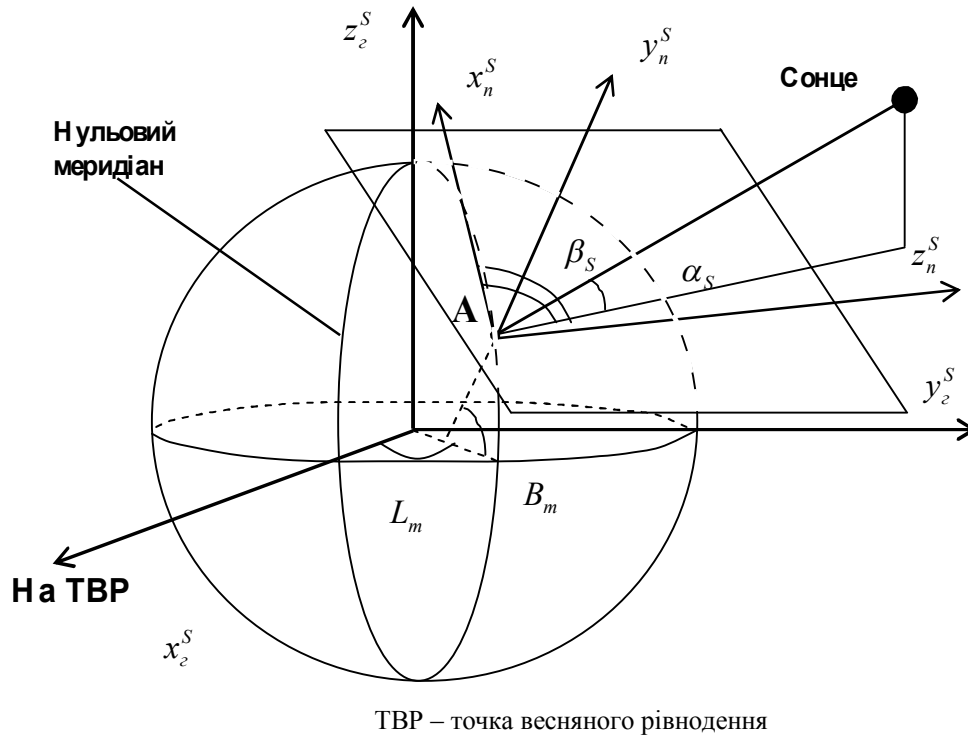


Рис. 1. Визначення координат Сонця в ТПССК

Виходячи з цього, пропонується така послідовність розрахунків:

Перший крок. Визначити координати центра Сонця x_a^S, y_a^S, z_a^S в абсолютній (інерціальній) геоцентричній системі координат (АСК) на заданий час t_k потрібної календарної дати. Принципово ці координати можна визначити безпосередньо з Астрономічного щорічника [7]. Однак такий підхід має такі істотні обмеження:

по-перше, він потребує наявності Астрономічного щорічника на потрібний рік (в Україні такий щорічник *не видається*, а в Астрономічному календарі [8] такі дані не наводяться);

по-друге, якщо необхідно спрогнозувати координати Сонця на наступний рік, то таких даних наперед в Астрономічному щорічнику принципово не існує;

по-третє, для досягнення універсальності програмно-алгоритмічних засобів доцільно проводити розрахунки без залучення довідкових даних з друкованих видань.

Тому пропонується методика розрахунку координат Сонця в АСК без залучення даних Астрономічного щорічника.

Другий крок. Провести перерахунок координат центра Сонця із АСК в Гринвіцьку прямокутну систему координат (ГрПСК).

Третій крок. Перерахувати координати центра Сонця із ГрПСК у топоцентричну пунктово прямокутну систему координат (ТППСК).

Четвертий крок. Визначити значення кутів α_s та β_s шляхом перерахунку координат центра Сонця із ТППСК у ТПССК.

Розрахунки відповідно до першого кроку пропонується проводити так.

По-перше, визначити координати Сонця в АСК за виразами [9]:

$$x_a^S = R_s \cos \Theta_s; y_a^S = R_s \sin \Theta_s \cos \varepsilon; z_a^S = R_s \sin \Theta_s \sin \varepsilon, \quad (1)$$

де R_s – радіус-вектор Сонця в астрономічних одиницях; Θ_s – істинна геометрична довгота Сонця, яка віднесена до середньої точки рівнодення заданої дати; ε – нахилення екліптики.

Значення радіуса-вектора Сонця можна знайти з рівняння орбіти Землі [10]:

$$R_s = \frac{1,0000002(1 - e_3^2)}{1 + e_3 \cos \vartheta_3}, \quad (2)$$

де e_3 – ексцентриситет навколосонячної орбіти Землі; \mathcal{G}_3 – істинна аномалія Землі на цій орбіті.

По-друге, як відомо [9], параметри e_3 , \mathcal{G}_3 , Θ_S та ε є функціями часу. Тому слід визначити епоху, від якої проводитиметься відлік всіх цих параметрів. Пропонується вибрати за початок епохи гринвіцький полудень 1 січня 1900 року. Тоді для всіх подальших розрахунків слід визначити інтервал часу в сторіччях T_e , що пройшов від початку обраної епохи до заданого часу t_k потрібної календарної дати, за формулою:

$$T_e = \frac{JD - 2415020,0}{36525}, \quad (3)$$

де JD – юліанська дата, що відповідає часу t_k .

Для визначення юліанської дати доцільно скористатися методикою, що наведена в посібнику [11]. При цьому точність розрахунків повинна бути не нижче за 10 значущих цифр після коми.

В основу подальших розрахунків, включаючи і параметр ε , доцільно покласти *метод фундаментальних аргументів* [6]. Крім того, для обчислення значень аномалії \mathcal{G}_3 слід використовувати не приблизний метод, як в роботі [6], а розв'язувати так зване *рівняння центра Сонця* [12].

По-третє, з урахуванням викладеного подальші розрахунки слід проводити таким чином. Визначити поточне значення ексцентриситету

$$e_3 = 0,01675104 - 0,0000418 T_e - 0,000000126 T_e^2. \quad (4)$$

Для знаходження кута \mathcal{G}_3 розрахувати середню аномалію Сонця:

$$M_S = 358^\circ,47583 + 35999^\circ,04975 T_e - 0^\circ,000150 T_e^2 - 0^\circ,0000033 T_e^3$$

і розв'язати рівняння центра Сонця:

$$C_S = (1^\circ,919460 - 0^\circ,004789 T_e - 0^\circ,000014 T_e^2) \sin M_S + (0^\circ,020094 - 0^\circ,000100 T_e) \sin 2M_S + 0^\circ,000293 \sin 3M_S. \quad (5)$$

Після переведення значення параметра C_S в градуси знайти істинну аномалію:

$$\mathcal{G}_3 = M_S + C_S. \quad (6)$$

По-четверте, підставити (4) і (6) в (2) і знайти величину R_S для виразу (1). Для знаходження значення довготи Θ_S , що входить до формули (1), слід скористатися рівнянням (5), а також знайти середню тропічну довготу Сонця L_S , що обчислюється від середньої точки рівнодення на задану дату за формулою Брауна і Ньюкома [13]:

$$\Theta_S = L_S + C_S; L_S = 279^\circ,69668 + 36000^\circ,76892 T_e + 0^\circ,0003025 T_e^2. \quad (7)$$

По-п'яте, знайти нахилення екліптики ε за формулою [13]:

$$\varepsilon = 23^\circ,452294 - 0^\circ,0130125 T_e - 0^\circ,00000164 T_e^2 + 0^\circ,000000503 T_e^3.$$

Особливістю запропонованої математичної моделі, яка впливає на точність результатів розрахунків величин R_S і Θ_S , є врахування системи лише двох небесних тіл – Сонця та Землі. У той же час для підвищення точності потрібно врахувати збурення, що виникають через вплив інших тіл Сонячної системи. Одним із варіантів переходу до моделі збуреного руху є розрахунок поправок і врахування їх при визначенні значень збуреного радіуса-вектора [12]:

$$R_S^* = R_S + 0,00000543 \sin A + 0,00001575 \sin B + 0,00001627 \sin C + 0,00003076 \cos D + 0,00000927 \sin H \quad (8)$$

та збуреної істинної геометричної довготи

$$\Theta^* = \Theta_S + 0^\circ,00134 \cos A + 0^\circ,00154 \cos B + 0^\circ,00200 \cos C + 0^\circ,00179 \sin D + 0^\circ,00178 \sin E. \quad (9)$$

У формулах (8) та (9) поправки A і B враховують збурювальний вплив Венери, C – Юпітера, D – Місяця. Поправки E та H пов'язані з довгоперіодичними коливаннями інших збурювальних факторів. Кожна із поправок є функцією часу і розраховується за такими виразами [12]:

$$A = 153^\circ,23 + 22518^\circ,7541 T_e; B = 216^\circ,57 + 45037^\circ,5082 T_e;$$

$$C = 312^\circ,69 + 32964^\circ,3577 T_e; D = 350^\circ,74 + 445267^\circ,1142 T_e - 0^\circ,00144 T_e^2;$$

$$E = 231^\circ,19 + 20^\circ,20 T_e; H = 353^\circ,40 + 65928^\circ,7155 T_e.$$

Таким чином, для підвищення точності розрахунків координат центра Сонця у вираз (1) потрібно підставити уточнене значення (8) замість (2), а також (9) замість (5).

Розрахунки відповідно до *другого кроку* запропонованої методики зводяться до перерахунку координат центра Сонця із АСК в ГрПСК за формулами [10]

$$\begin{pmatrix} x_z^S \\ y_z^S \\ z_z^S \end{pmatrix} = A_{az} \begin{pmatrix} x_a^S \\ y_a^S \\ z_a^S \end{pmatrix}; \quad A_{az} = \begin{pmatrix} \cos \gamma & \sin \gamma & 0 \\ -\sin \gamma & \cos \gamma & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}, \quad (10)$$

де x_z^S, y_z^S, z_z^S – координати центра Сонця в ГрПСК; $\gamma = \omega_3 [S_0 + q(t_m - \mathcal{C}_*)]$ – кут, що відраховується в площині земного екватора від осі Ха АСК до осі Хг ГрПСК; S_0 – зоряний час у середню північ на Гринвіцькому меридіані в дату, що цікавить нас; t_m – поточний місцевий сонячний час на меридіані спостерігача в ту ж дату; \mathcal{C}_* – номер годинного пояса спостерігача.

$$\omega_3 = 7,29211508 \cdot 10^{-5} \text{ c}^{-1} \text{ – кутова швидкість обертання Землі.}$$

Слід підкреслити, що значення S_0 на кожен добу поточного року публікується в спеціалізованих виданнях, наприклад у [7, 8]. Однак, як зазначалося вище, такий підхід до визначення величини S_0 є неприйнятним для алгоритму автоматизованих розрахунків. Тому пропонується автоматизувати розрахунки всесвітнього зоряного часу за методикою, що наведена в [11].

Відповідно до *третього кроку* запропонованої методики здійснюється перерахунок координат центра Сонця x_z^S, y_z^S, z_z^S із ГрПСК у ТППСК за формулами [10]:

$$\begin{pmatrix} x_n^S \\ y_n^S \\ z_n^S \end{pmatrix} = A_{zn} \begin{pmatrix} x_z^S - x_m \\ y_z^S - y_m \\ z_z^S - z_m \end{pmatrix}; \quad A_{zn} = \begin{pmatrix} -\sin B_m \cos L_m & -\sin B_m \sin L_m & \cos B_m \\ \cos B_m \cos L_m & \cos B_m \sin L_m & \sin B_m \\ -\sin L_m & \cos L_m & 0 \end{pmatrix},$$

де x_n^S, y_n^S, z_n^S – координати центра Сонця в ТППСК; x_m, y_m, z_m – координати фазового центра антени в ГрПСК.

Вони розраховуються через геодезичні координати за виразами:

$$x_m = (R_e / A_m + h_m) \cos B_m \cos L_m; \quad y_m = (R_e / A_m + h_m) \cos B_m \sin L_m; \\ z_m = \left(\frac{R_e (1 - \tilde{\alpha})}{A_m} + h_m \right) \sin B_m; \quad A_m = \sqrt{1 - \tilde{\alpha} (2 - \tilde{\alpha}) \sin^2 B_m},$$

де $R_e = 6378,131$ км – екваторіальний радіус Землі; $\tilde{\alpha} = 1/298,3$ – коефіцієнт полярного стиснення Землі.

Останнім, *четвертим кроком* методики є перерахунок координат центра Сонця із ТППСК у ТПССК за формулами [11]:

$$\alpha_S = \arctg \left[y_n^S / \sqrt{(x_n^S)^2 + (z_n^S)^2} \right]; \quad 0^\circ \leq \alpha \leq 90^\circ; \\ \beta_S = \arctg(z_n^S / x_n^S); \quad 0^\circ \leq \beta \leq 360^\circ. \quad (11)$$

Для перевірки працездатності даного алгоритму в процесі досліджень розроблено програмне забезпечення. Воно дозволяє розраховувати значення α_S та β_S на будь-який інтервал часу з мінімальною дискретністю в 1 с. Для оцінювання точності результатів розраховані значення α_S^P порівнювалися з вимірними за допомогою штатного геодезичного теодоліта Т10В значеннями α_S^B . Ці виміри взяті за еталонні, оскільки їх середньоквадратична помилка становить 10", а необхідна точність розрахунків кута – $\alpha_S^P \leq 1^\circ$.

Для проведення вимірів теодоліт встановлювався поблизу пунктів першого класу Державної опорної геодезичної мережі в містах Житомирі та Євпаторії. Проводилося 9 циклів вимірювань у різні пори року. Кожний цикл вимірювань продовжувався протягом світлової частини доби. Для оцінювання точності розрахунків використовувались тільки виміри кута місця Сонця (КМС). Виміри азимуту також проводилися, однак вони не використовувалися для оцінювання, оскільки не вдалося з'ясувати точну поправку магнітного схилення для юстирування теодоліта на північ.

Для оцінювання точності розрахунку значень КМС за допомогою розробленого алгоритму пропонується такий підхід. Припустимо, що всі виміри теодолітом рівноточні. Тоді приблизне (середнє) значення КМС $\tilde{\alpha}_S$ для кожного моменту часу визначається за формулою [14]:

$$\tilde{\alpha}_S = \frac{\alpha_S^P + \alpha_S^B}{2}.$$

Для приблизного оцінювання точності розрахунку значень КМС визначається різниця між середнім значенням та розрахованим ($\tilde{\alpha}_S - \alpha_S^P$). Як показав аналіз, для всіх проведених експериментів граничні

значення цієї різниці знаходяться в межах від $(\tilde{\alpha}_S - \alpha_S^P)_{\min} = 1'$ до $(\tilde{\alpha}_S - \alpha_S^P)_{\max} = 57'$. Цей факт дозволяє зробити попередній висновок про прийнятну точність розрахунків за допомогою розробленого алгоритму. Результати вимірювань і розрахованих значень КМС подані на рисунку 2.

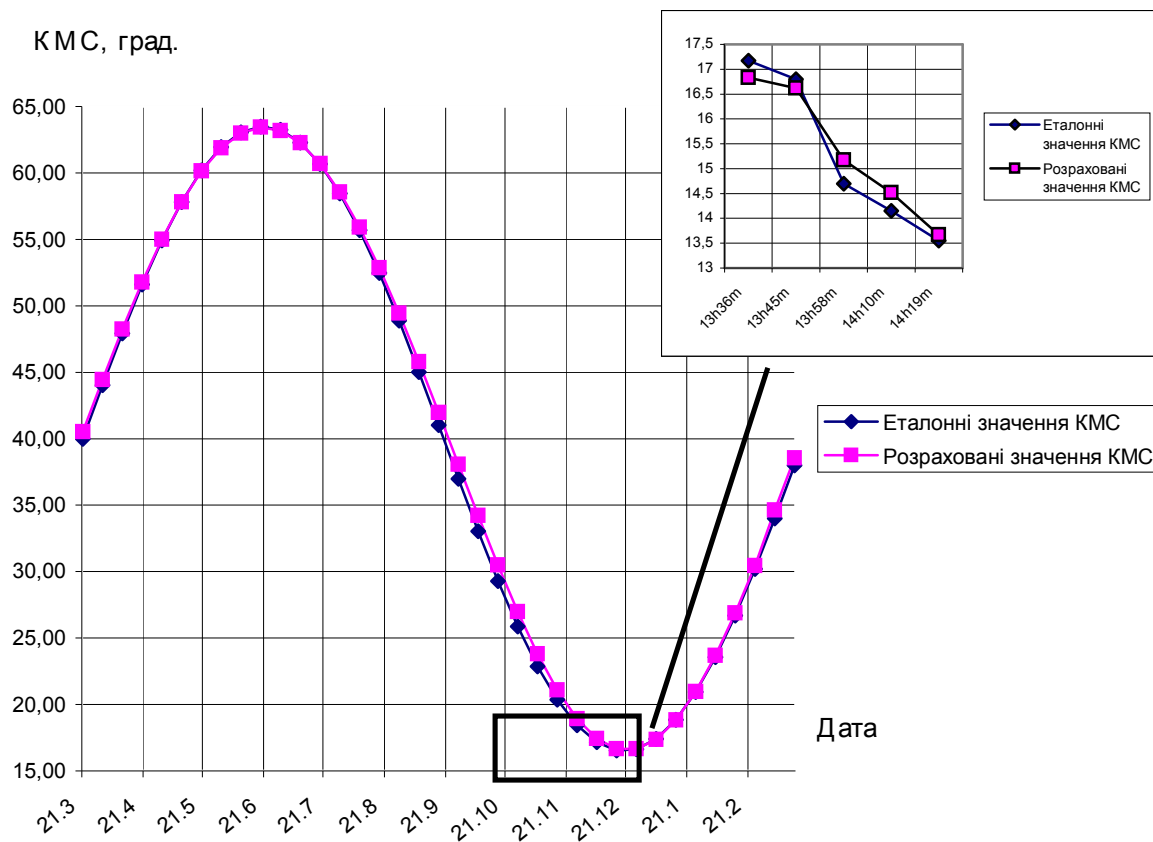


Рис. 2. Розраховані та еталонні значення кута місця Сонця

Для більш точного оцінювання необхідно визначити середньоквадратичне відхилення [14]

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (\tilde{\alpha}_S - \alpha_S^P)^2}$$
, де n – кількість проведених вимірів, що для різних задач знаходиться в межах від 40 до 60.

Для проведених експериментів розрахункові значення становлять $\sigma = 16',17$. Оскільки σ є точковою оцінкою параметрів розподілу, то слід визначити інтервал, який покриває σ з довірчою ймовірністю $\gamma = 0,95$. При цьому можна використовувати табульовану функцію $q = q(\gamma, n)$ [14]. Тоді межі інтервалу визначаються як $\sigma(1-q) \leq \sigma \leq \sigma(1+q)$.

Розрахунки за цією методикою показують, що параметр $\sigma = 16',17$ знаходиться в середині інтервалу $11',8 \leq \sigma \leq 20',52$ з довірчою ймовірністю $\gamma = 0,95$. Отже, похибка розрахунків значення α_S^P за допомогою розробленого алгоритму не перевищує 1σ , що відповідає заданим вимогам.

Висновок. Таким чином, розроблено автоматизований високоточний алгоритм прогнозу координат Сонця, який доцільно покласти в основу методики оцінювання умов освітленості контрольованих районів Землі при проведенні космічного знімання.

Список використаної літератури:

1. Кохан С.С. Дистанційне зондування Землі: теоретичні основи : підручник / С.С. Кохан, А.Б. Востоков. – К. : Вища школа, 2009. – 511 с.
2. Космічна система “Січ-2” для спостереження Землі в оптичному діапазоні. – Д. : ДП “КБ “Південне” ім. М.К. Янгеля”, 2008. – 12 с.
3. Фриз П.В. Основи орбітального руху космічних апаратів : підручник / П.В. Фриз. – Житомир : ЖВІ НАУ, 2012. – 348 с.

4. *Манойлов В.П.* Дистанційне зондування Землі із космосу: науково-технічні основи формування й обробки видової інформації : монографія / *В.П. Манойлов, В.В. Омельчук, В.В. Опанюк.* – Житомир : ЖТДУ, 2008. – 384 с.
5. *Попович П.Р.* Баллистическое проектирование космических систем / *П.Р. Попович, Б.С. Скребушевский.* – М. : Машиностроение, 1987. – 240 с.
6. *Болобан С.І.* Методика оцінки висоти об'єктів за розмірами їх тіней на космічних знімках / *С.І. Болобан, Р.М. Осадчук* // Вісник ЖДТУ / Технічні науки. – Житомир : ЖДТУ, 2010. – Вип. № 3 (54). – С. 32–36.
7. *Астрономический ежегодник.* – М. : Наука, 1989. – 480 с.
8. *Астрономічний календар на 2000 рік* / ГАО НАНУ. – Вип. 46. – К. : Сфера, 1999. – 240 с.
9. *Астрономический календарь. Постоянная часть* / Под ред. *В.К. Абалакина.* – 7-е изд. перераб. – М. : Наука, 1981. – 704 с.
10. *Основы теории полета космических аппаратов* / *В.С. Авдеевский, Б.М. Антонов, Н.А. Анфимов и др.* ; под ред. *М.К. Нариманова и Г.С. Тихонравова.* – М. : Машиностроение, 1972. – 608 с.
11. *Організація балістико-навігаційного забезпечення управління космічними апаратами : підручник* / *О.Б. Захаров та ін.* ; за заг. ред. *М.С. Сівова.* – К. : НАОУ, 2007. – 508 с.
12. *Меес Ж.* *Астрономические формулы для калькуляторов* : пер. с англ. / *Ж.Меес.* – М. : Мир, 1988. – 168 с.
13. *Баранов В.Н.* *Космическая геодезия : учебник* / *В.Н. Баранов, Е.Г. Бойко, И.И. Краснорылов.* – М. : Недра, 1986. – 408 с.
14. *Гуреев М.А.* *Теория вероятностей и элементы математической статистики : учеб. пособие* / *М.А. Гуреев.* – М. : МО СССР, 1980. – 400 с.

ФРИЗ Петро Васильович – кандидат технічних наук, доцент, заслужений працівник освіти України, професор кафедри геоінформаційних і космічних систем Житомирського військового інституту ім. С.П. Корольова Національного авіаційного університету.

Наукові інтереси:

– моделювання процесів у складних технічних системах.

Стаття надійшла до редакції 05.03.2013

