

Технічні науки

УДК 621.384

Микитенко Володимир Іванович

кандидат технічних наук, доцент, доцент

Національний технічний університет України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Микитенко Владимир Иванович

кандидат технических наук, доцент, доцент

Национальный технический университет Украины

«Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского»

Mykytenko Vladimir

Candidate of Engineering Sciences, Associate Professor

National Technical University of Ukraine

«Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute»

Цой Анастасія Костянтинівна

студент

Національного технічного університету України

«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

Цой Анастасия Константиновна

студент

Национального технического университета Украины

«Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского»

Tsoi Anastasiia

Student of the

National Technical University of Ukraine

«Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute»

Копійка Світлана Володимирівна

студент

*Національного технічного університету України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»*

Копейка Светлана Владимировна

студент

*Национального технического университета Украины
«Киевский политехнический институт имени Игоря Сикорского»*

Kopeika Svetlana

Student of the

National Technical University of Ukraine

«Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute»

**ПІДВИЩЕННЯ ЕФЕКТИВНОСТІ ЦИФРОВИХ ФОТОАПАРАТІВ
ДЛЯ НАНОСУПУТНИКІВ
ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ЦИФРОВЫХ
ФОТОАППАРАТОВ ДЛЯ НАНОСПУТНИКОВ
IMPROVEMENT OF NANOSATELLITES DIGITAL CAMERAS
EFFICIENCY**

***Анотація.** У статті зроблено аналіз шляхів підвищення ефективності цифрових фотоапаратів для наносупутників. Здійснюється аналіз світового та вітчизняного ринку наносупутників. Розглядаються шляхи підвищення коефіцієнтів стиснення зображень, прийнятних для цілей ДЗЗ, які в поєднанні з оптимізацією просторового дозволу можуть передавати зображення з супутника.*

***Ключові слова:** наносупутники, телебачення, колориметрія, ДЗЗ, RGB, мікросупутники, пікосупутники, малі космічні апарати.*

***Аннотация.** В статье сделан анализ путей повышения эффективности цифровых фотоаппаратов для наноспутников. Осуществляется анализ мирового и отечественного рынка*

наноспутников. Рассматриваются пути повышения коэффициентов сжатия изображений, приемлемых для целей ДЗЗ, которые в сочетании с оптимизацией пространственного разрешения могут передавать изображение со спутника.

Ключевые слова: наноспутники, телевидение, колориметрия, ДЗЗ, RGB, микроспутники, пикоспутники, малые космические аппараты.

Summary. *The article analyzes ways to improve the efficiency of digital cameras for nanosatellites. The analysis of world and domestic market of nanosatellites. Discusses ways of increasing the levels of image compression acceptable for the purposes of ERS, which in combination with the optimization of spatial resolution can transmit images from the satellite.*

Key words: *nano-satellites, television, colorimetry, remote sensing, RGB, mkresponse, pasupuleti, small spacecraft.*

Вступ. Для сучасного технологічного життя інновації становлять основну рушійну силу підвищення конкурентоспроможності, а інноваційний розвиток, що включає інтенсифікацію науково-дослідницької діяльності та її стратегічне втілення на практиці, ставиться обов'язковою умовою для найбільших державних корпорацій. У даних умовах особливу роль відіграє розробка моделей управління інноваціями та їх експериментальна перевірка.

Дистанційне зондування землі (ДЗЗ) має багаторічну історію розвитку, яке почалося з перших фотографічних зйомок Землі з повітряних куль і літаків в кінці 19 століття і по мірі розвитку фотографічної техніки стало основою аерофотографії – важливої прикладної галузі науки, господарства і військової справи. Поява космічних носіїв – супутників землі – забезпечило можливість проведення космічних зйомок.

Літакова і космічна зйомка мають багато спільних рис і часто об'єднуються загальним терміном аерокосмічна зйомка [1, с. 147], оскільки в практичній діяльності вони часто доповнюють одна одну і є елементами технологічного ланцюжка, що об'єднує зйомку наземних об'єктів з їх безпосереднім контактним наглядом [2, с. 95].

Проте техніка і технологія аеро - та космічної зйомки все ж істотно відмінні. Якщо до теперішнього часу при аерофотозніманні використовуються традиційні фотографічні носії зображення, то в космосі зроблений остаточний перехід на оптико-електронні системи, близькі по своїми принципами дії до мало кадрових телевізійних систем [3, с. 861].

У розвитку аерокосмічної зйомки був важливий момент, коли поряд з чорно-білою (панхроматичною) зйомкою почалося використання кольорової (спектрозональної) зйомки. Цей перехід був зумовлений різними причинами і, насамперед, розходженням розв'язуваних завдань. Якщо чорно-біла (панхроматична) зйомка задовольняє багато вимог топографії і картографії, то для спостереження, наприклад, таких об'єктів, як рослинний покрив, більш ефективно використовувати кольорову і спектрозональну зйомку [5, с. 181].

Поява кольорової фотографії, а також кольорового кіно і телебачення, стимулювалися зацікавленістю масового споживача отримати природну передачу образів об'єктів зйомки.

Натуральна передача кольору базувалася на трикомпонентній теорії кольорового зору (колориметрії), що експериментально довела свою ефективність. При кольоровій аерофотозйомці не ставилося завдання натурального, колориметрично точного відтворення кольорів, а використовувалася властивість кольорового зображення передавати істотно більший обсяг інформації про об'єкт зйомки, що сприяло більш точному рішенню завдань дешифрування (розпізнавання, класифікації) досліджуваного об'єкта.

Постановка задачі. Метою роботи є дослідження особливостей підвищення ефективності цифрових фотоапаратів для наносупутників.

Експериментальна частина. Згідно з міжнародними стандартами наносупутники визначаються як малі космічні апарати масою від 1 до 10 кг і знаходяться між пікосупутниками (до 1 кг) і мікросупутниками (від 10 до 100 кг) [1, с. 122]. Перший штучний супутник Землі Супутник-1 класифікується як мікросупутник, так як його маса становить 83,6 кг. Однак, в подальшому, при вдосконаленні ракетно-космічної техніки, мікроелектроніки та авіакосмічної апаратури спостерігається довгострокова тенденція до збільшення середнього розміру космічного супутника.

На початок 2016 року вже запущено на орбіту 491 наносупутників, з них 431 було розроблено на основі стандарту CubeSat. Таким чином 59 % всіх наносупутників припадає на CubeSat, що робить його основним стандартом для розробки наносупутників [2, с. 100]. CubeSat представляє собою стандарт малих супутників кубічної форми, розроблених спільно Каліфорнійським Технологічним і Стендфордським Університетами в 1999 році. На малюнку 1 [8, с. 168] видно, що серед супутників масою від 0,1 до 16 кілограм мікросупутники і пікосупутники представлені в малій кількості.

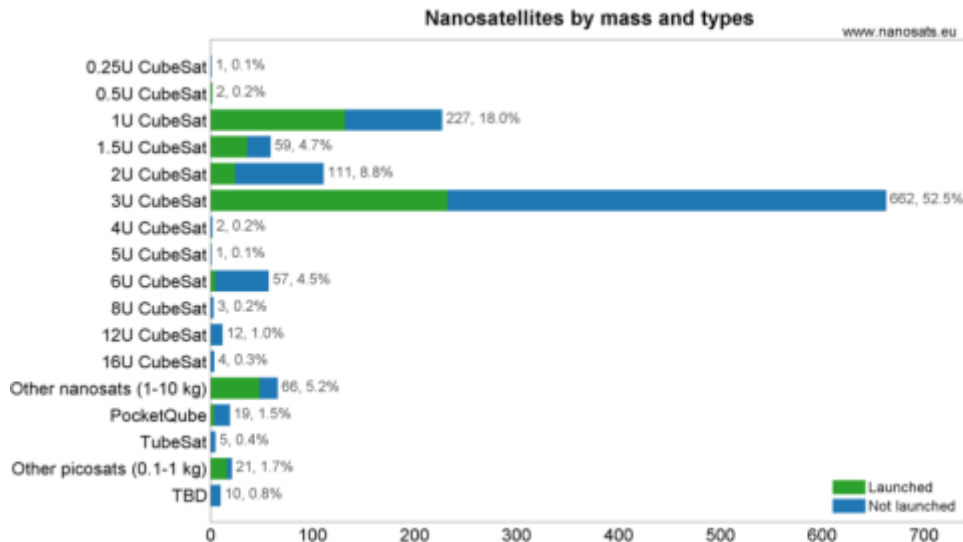


Рис. 1. Розподіл мікросупутників, наносупутників і пікосупутників по моделі [8, с. 168]

Для вирішення багатьох практичних завдань зйомки колориметричним точним способом зображенням об'єкта зйомки немає необхідності. Більш того, припустимо свідоме спотворення передачі кольору, з метою кращого виявлення деяких об'єктів зйомки. Можливо, і це зараз широко використовується в техніці ДЗЗ, використання таких спектральних діапазонів, в яких око не чутливе, наприклад, в ближньому інфрачервоному (ІЧ) діапазоні. При цьому виникає задача оптимального для візуального дешифрування представлення досліджуваного об'єкта, що спостерігається в натуральних кольорах.

Розглянемо класичну для ДЗЗ ситуацію - розрізнення найбільш типового об'єкта на поверхні землі – рослинного покриву. Всі живі рослини мають характерну криву спектрального відбиття – спектральний коефіцієнт яскравості (СКЯ), що має в видимому діапазоні відносно невеликий підйом в області зеленого кольору і значне підвищення коефіцієнта відбиття в ближній інфрачервоній області ((0,76-1) мкм), невидимій оку. Незначні відмінності у формі кривих для різних рослин, будучи виявлені системою розпізнавання, дозволяють визначити типи

рослинності та їх стан. Око на шляху еволюційного розвитку людини навчилося добре розрізняти типи рослинності в зеленому діапазоні, але апаратура спостереження на першому етапі (фотоапарати, електронно-оптичні системи ранніх конструкцій) мала значно меншу контрастну чутливість, що робило кращим спостереження в ближньому ІЧ діапазоні, оскільки забезпечувало краще відношення сигнал/шум реєструючого пристрою. Були створені спеціальні спектрзональні фотоплівки, з одним із спектральних каналів, чутливих у ближньому ІЧ діапазоні. Вони ефективно використовувалися при аерофотозніманню лісів [5, с. 56]. Ясно, що така система принципово відрізнялася від системи RGB, використовуваної при натуральному відтворенні зображень.

Цікаво відзначити, що було й інше, можливо вельми важливе завдання при створенні спектрзональної плівки, а саме: демаскування об'єктів спостереження, які часто маскуються шляхом їх фарбування в зелений колір, але відтворити форму спектральної характеристики відбиття рослинності в ближньому ІЧ діапазоні фарба не може.

Якщо задача розпізнавання замаскованих об'єктів не є головною, то використовуючи істотне зростання чутливості сучасних оптико-електронних систем у порівнянні з фотоплівкою, можна визначити ще одну важливу задачу – дослідження можливостей відмови від ближнього ІЧ діапазону в системах ДЗЗ широкого використання. Втрати від такого рішення можуть бути прийнятними з точки зору розпізнавання рослинності і буде отриманий помітний вигравш спрощення апаратури і скорочення обсягу переданих даних.

Є й інший, новий аспект у розглянутому питанні. Він пов'язаний не тільки зі спрощенням технічних характеристик сучасної знімальної апаратури, але і зі зміною складу користувачів космічної інформації ДЗЗ.

Класифікація оптико-електронних приладів по виконуваних функціях наведена в табл. 1.

Таблиця 1

Класифікація оптико-електронних приладів по виконуваних функціях
[2, с. 45]

Фотоприймачі	Фоторезистор, фотодіод, фототранзистор, лавинний фотодіод, фотоелемент, фотопомножувач
Випромінювачі світла	Світлодіод, напівпровідниковий лазер, газовий лазер, твердотільний лазер, лазер на барвнику
Оптичні хвилеводи	Волоконно-оптичний, плівковий, хвилеводна лінза
Оптична пам'ять	Пристрої на основі: фотоплівки, фотохромних матеріалів, термопластиків, аморфних напівпровідників
Функціональні прибори	Перетворювач некогерентного випромінювання в когерентний, оптичний бістабільний елемент, оптичний вентиль, оптрон
Інтегральні схеми	Оптичні ІС, оптоелектронні ІС
Модулятори світла й відхилювачі системи	Система дзеркал, електрооптичні модулятори, магнітооптичні модулятори, акустооптичні модулятори, волоконно-оптичні розгалужувачі і фільтри
Дисплеї	Світлодіодний, електролюмінесцентний, фосфорисцентний, рідкокристалічний, плазмовий

Знаходження значень пікселів вихідного кадра високого розділення включає в себе декілька етапів:

- 1) проектування піксельної решітки кадрів зображення низького розділення на піксельну решітку високого розділення;
- 2) накладання піксельних решіток отриманих кадрів високого розділення на піксельну решітку базового кадра;
- 3) обчислення значень пікселів результуючого зображення;
- 4) усунення розмивання зображення результуючого кадра [2, с. 46].

Операція збільшення просторового розділення зображення є протилежною до операції зменшення просторового розділення зображення. Більшість алгоритмів зменшення просторового розділення зображення використовують вузькосмуговий фільтр для зменшення спотворення контурів.

Пропонований алгоритм підвищення просторового розділення зображення на основі техніки надрозділення (Super Resolution) має низку

припущень, які накладаються на вхідне зображення низького розділення. До основних припущень слід віднести наступні:

- 1) вхідне зображення містить декілька кадрів, що описують одну сцену;
- 2) кожен кадр містить зсув пікселів, що визначається за допомогою вектору руху.

При обчисленні значень пікселів результуючого зображення пропонується проводити аналіз якості векторів руху. В залежності від точності вектора руху визначається, яким способом буде здійснюватись проектування кадрів низького розділення на піксельну решітку високого розділення. Якщо алгоритм оцінки руху не може достовірно визначити вектора руху, то застосовується алгоритм розосередженого фільтрування, що дає змогу не вносити додаткових спотворень в зображення з високою роздільною здатністю.

Після етапу проектування піксельних решіток кадрів низького розділення здійснюється операція злиття, що дає змогу отримати вихідне зображення високого розділення. Над результуючим зображенням проводиться додаткове знешумлення з метою усунення спотворень [5, с. 33].

Сьогодні сформувався широкий клас напівпрофесійних і зовсім не професійних споживачів космічної інформації, що стала вельми доступною, для яких натуральне відтворення кольору знімків має важливе значення, оскільки дозволяє досягти природного сприйняття об'єкта зйомки, впізнаваності їх без використання яких-небудь методів цифрової обробки (яка, однак, у принципі не виключається на певному етапі використання інформації). Найбільш яскравий приклад - система Google Earth [6], яка користується все більшою популярністю у світі. Інформація від Google Earth вільно передається через Інтернет і представляє результати зйомки всієї земної кулі на певні моменти часу з різним просторовим розділенням (в основному високим, до 1 м), який в даний час

може бути отриманий з багатьох супутників ДЗЗ, що знаходяться на орбітах. Такою зйомкою (метровою) охоплено до 70% площі поверхні Землі, для інших районів використовується зйомка з меншою роздільною здатністю. Джерелом інформації для Google Earth служать багатозональні 3 і 4-х каналні системи з ІЧ діапазоном, тому Google Earth не може представити користувачам натуральні зображення, а лише так звані псевдокольорові, які однак формуються таким чином, щоб бути максимально схожими на природні. Як показала практика, така операція, в принципі, прийнятна для користувача, тим більше не має під рукою еталону для порівняння.

При такому методі перетворення кольорів повинні бути додатково виконані наступні умови:

- рослинний покрив повинен бути представлений відтінками зеленого кольору;
- сніжний хмарний покрив повинен бути натурально білим;
- водні поверхні можуть мати відтінки від синьо-фіолетового до темно-синього, майже чорного;
- певним чином має бути враховано вплив атмосфери.

Загалом є 5 базових варіантів колірної перетворення каналів.

У професійній практиці прийнято ІЧ сигнал транспонувати в червоний, що призводить до подання рослинних покривів в псевдокольоровому синтезованому зображенні у вигляді полів різного відтінку червоного кольору. Таке колірне кодування допомагає дешифрувальнику, забезпечуючи підвищений колірний контраст між рослинами і ґрунтом, але насилу сприймається непрофесіоналами або ж фахівцями, для яких рослинний покрив не є об'єктом спостереження. Оскільки в сучасному процесі дешифрування і псевдо кольорового синтезу бере участь комп'ютер, можливий різноманітний підбір палітри кольорів,

що кодують різні канали, то тут був описаний процес синтезу, що став практично стандартом для систем ДЗЗ.

Вибір кількості спектральних каналів спостереження та їх розташування на шкалі довжин хвиль - одне з основних питань у теорії і практиці ДЗЗ. У свій час йому було присвячено дуже багато теоретичних робіт і було реалізовано велику кількість систем ДЗЗ не тільки космічних, а й авіаційних, що дає можливість підбити деякі підсумки аналізу в цій області.

Аналізуючи характеристики декількох десятків супутників ДЗЗ, запущених за останні 30 років, можна відзначити загальний підхід до вибору кількості базових спектральних каналів: три у видимій області, один в ближньому ІЧ. Причому довжини хвиль цих каналів практично збігаються. Вони зосереджені в діапазонах (0,4-0,5) мкм, (0,5-0,6) мкм, (0,6-0,7) мкм і (0,7-0,9) мкм. Спектральне розділення $\Delta\lambda$ в різних системах не перевищує 10% і розробниками систем пояснюється необхідністю більш точним налаштуванням системи на розпізнання об'єктів певного класу. У багатьох випадках така аргументація викликає сумнів, оскільки є ряд факторів, що роблять таку настройку малоефективною. На це є такі підстави [4, с. 101]:

1. З технічних причин форму спектральних фільтрів не вдається зробити досить прямокутною, з чіткою межею їх розподілу. Реально, спектральні характеристики частково перекриваються та їх форма буває близька до дзвоноподібної, іноді несиметричної.

Викликає запитання вибір рівня, на якому вимірюється ширина спектрального каналу.

2. СКЯ в одних і тих же природних утвореннях не є достатньо стабільними. Вони змінюються на деяку величину, залежно від кута спостереження, кута освітлення та стану атмосфери. СКЯ

рослинності помітно варіюють також від напрямку вітру і району зростання.

3. Існують неминучі шуми фотоприймачів, які вносять свій внесок у величину $\Delta\lambda$, включаючи флуктуаційні шуми і шуми квантування.

Тим не менш, численні системи ДЗЗ працюють досить ефективно і активно розвиваються. Кількість спостережень і завдань, розв'язуваних на базі ДЗЗ, обчислюється тисячами і точно налаштувати систему під кожного користувача неможливо, та й практика показує, що в цьому немає необхідності, маючи на увазі системи ДЗЗ масового обслуговування, - клас систем який в даний час можна чітко позиціонувати.

Звертає на себе увагу аналогія з системою людського зору, трикомпонентної основи, що відрізняється нечітким поділом каналів між собою. Враховуючи викладене, можна припустити, що наявність широких спектральних каналів, що перекриваються, у системі RGB не буде суттєвою перешкодою для використання цієї системи, в якості базової, для ДЗЗ масового обслуговування.

Внаслідок застосування цифрових технологій сучасні фотокамери забезпечують не тільки зручний спосіб для реєстрації і запису цифрових фотографій, але також і можливість редагування та поліпшення одержуваних цифрових фото, як в самій фотокамері, так і з використанням персонального комп'ютера.

Останні технічні рішення типу «SoC» («System on Chip») дають підстави стверджувати, що в цій частині фотопроцесу можливе повне усунення комп'ютера. Так, розроблене асоціацією виробників фотокамер і пристроїв відображення CIPA (Camera & Imaging Products Association) стандарт "CIPA DC-001", відомий під назвою PictBridge, вже зараз забезпечує уніфікацію процесу передачі і обробки даних вхідного і вихідного пристроїв фотографічного процесу, зокрема камери та принтера.

Припущення про можливість рівномірного розподілу ймовірності знаходження об'єкта в клітинці матриці вимагає підтвердження для конкретних застосувань.

Розглянемо в якості загального випадку спрямовану градієнтну перколяцію, для якої ймовірність знаходження об'єкта в комірці змінна або по ширині (уздовж кожного рядка матриці), або змінна по висоті (уздовж кожного стовпця матриці). При цьому закон розподілу цієї ймовірності має моду, тобто ймовірність зростає до осі матриці і зменшується по краях матриці.

Будемо витримувати при цьому середнє значення концентрації – ймовірність знаходження об'єкта в комірці по всій матриці – і відповідно відкладати його по осі ординат графіків отриманих залежностей. Такий підхід дозволяє виділяти вплив нерівномірності розподілу ймовірностей за наявності моди у законі розподілу.

Будемо оцінювати збільшення ймовірності знаходження об'єкта в клітинці на осі матриці і зменшення її до країв матриці параметром f , що характеризує відносне збільшення ймовірності знаходження об'єкта в комірці по осі матриці у порівнянні із середнім її значенням. Мода закону розподілу об'єктів по матриці може збігатися з даним напрямком перколяції або вона може бути «поперек» розглянутого напрямку перколяції. Проведене статистичне моделювання показало, що обидва розглянутих статистичних феномена: наявність порогу перколяції та наявність точки максимальної кластеризації мають місце як у випадку вертикального, так і в разі горизонтального розподілу градієнтів вірогідності наявності об'єкта в комірці.

При цьому значення порогу перколяції змінюється значно, а значення середньої по матриці концентрації в точці максимальної кластеризації, яку позначимо K_{mk} , практично не змінюється. У таблиці 2

наведені результати статистичного моделювання для матриці 50×50 при модальні законах розподілу НС по матриці зі значенням параметра $f=0,5$.

Таблиця 2

Результати статистичного моделювання [8, с. 172]

Закон розподілу ймовірностей знаходження об'єктів по матриці	Значення порогу стохастично і перколяції	Значення концентрації в точці максимальної кластеризації	Середня нормована кількість кластерів в точці Кмк	Максимальна середня нормована довжина найкоротшого шляху керованої перколяції	Концентрація для максимуму середнього найкоротшого шляху керованої перколяції
рівномірний	0,55-0,65	-0,25	0,13	1,66	0,6
модальний, мода вздовж напрямку перколяції	0,45-0,55	-0,25	0,123	1,64	0,4
модальний, мода поперек напрямку перколяції	0,65-0,75	-0,25	0,123	1,67	0,55

Таким чином, процедура визначення необхідного числа наносупутників в кластері, що забезпечують суцільне покриття межвиткового інтервалу смугами спостереження розміром 50 км, для значення Кмк буде робастною, тобто малочутливою до помилок і припущень щодо законів розподілу ймовірностей знаходження об'єкта в комірці.

Висновки. Обґрунтованим є припущення про те, що у недорогих перспективних системах ДЗЗ масового обслуговування різноманітних споживачів можна обмежитися використанням колориметричною системою RGB, що забезпечує природну передачу кольору зображення об'єктів спостереження.

Використання системи RGB дозволить виключити з бортової апаратури близький інфрачервоний канал, що призведе до її спрощення і

здешевлення і має особливе значення, якщо система ДЗЗ формується на базі малорозмірних космічних апаратів (наприклад, наносупутників).

Як приклад розглянута концепція отримання інформації ДЗЗ шляхом запуску одночасно великої кількості досить простих над малих супутників – наносупутників, які будучи розподіленими по міжвитковому інтервалу траси в сукупності будуть оперативно вирішувати завдання глобального ДЗЗ.

У розглянутому прикладі створення кластерів наносупутників ДЗЗ значення концентрації стохастичної основи (ймовірності знаходження НС комірці обслуговування) $\sim 0,25$, що в два з половиною рази менше порога стохастичної перколяції. При цьому кількість доданих НС для утворення шляху керованої перколяції через наявні кластери стохастичної основи не перевищує 4% від кількості НС стохастичної основи. Цей відсоток падає зі зростанням розмірів мережі.

Отримані результати можуть бути використані для формування загальної моделі глобальної мережі недорогих наносупутників ДЗЗ, наприклад, таких, що створені в вищих навчальних закладах.

Література

1. Азоев Г. Л. Инновационные кластеры nanoиндустрии. — М.: БИНОМ Лаборатория знаний, 2012. — 296 с.
2. Елизаренко А.С. Соломатин В.А., Якушенков Ю.Г. Оптико-электронные системы в исследованиях природных ресурсов. - М: Недра,1984. – 215 с.
3. Каширин А. В., Глебанова И. И. Анализ современного состояния рынка наноспутников как подрывной инновации и возможностей его развития в России / Молодой ученый. — 2016. — №7. — С. 855-867.

4. Книжников Ю.Ф., Кравцова В.И., Тутубалина О.В. Аэрокосмические методы географических исследований. М.: «Академия», 2004. – 336 с.
5. Кристенсен Клейтон М. Дилемма инноватора: Как из-за новых технологий погибают сильные компании / Пер. с англ. — 4-е изд. — М.: Альпина Паблишер, 2015. – 239 с.
6. Павлов А. Планета Земля / Upgrade, 2008. - №50. - С. 40-43.
7. Buchen E. SpaceWorks’ 2014 Nano/Microsatellite Market Assessment. – 2014.
8. Колобродов В.Г., Лихоліт М.І., Марченко В.О., Микитенко В.І. Вибір оптико-електронної системи малорозмірного університетського супутника / Вісник ЧДТУ. - 2008. – №2. – С. 167 - 172.
9. URL: [Електронний ресурс]. – Режим доступу: <http://compress.ru/article.aspx?id=16304>