

**Міністерство освіти і науки України
Державний університет «Житомирська політехніка»**

**Горшенін О. Є.
Варганова Д. О.**

Обробка даних аерокосмічних спостережень

Навчальний посібник

**Житомир
2026**

*Рекомендовано до видання вченою радою
Державного університету «Житомирська політехніка»
(протокол № 4 від 24 травня 2026 року)*

Рецензенти:

С. П. Фриз – професор кафедри телекомунікацій та радіотехніки Житомирського військового інституту імені С. П. Корольова, д.т.н., професор;
П. П. Топольницький – доцент кафедри комп'ютерних технологій і моделювання систем Поліського національного університету, к.т.н., доцент;
Ю. О. Подчашинський – завідувач кафедри інформаційно-вимірювальних технологій Державного університету «Житомирська політехніка», д.т.н., професор.

Горшенін О. Є., Варганова Д. О.
Г67 Обробка даних аерокосмічних спостережень : навч. посібн. /
О. Є. Горшенін, Д. О. Варганова. Електронне видання – Житомир :
Державний університет «Житомирська політехніка», 2026. – 131 с.

ISBN

У навчальному посібнику викладено основні відомості про організацію роботи, принципи побудови та функціонування космічних засобів спостереження. Розглянуто основи попередньої обробки повітряно-космічних знімків. У загальному вигляді охарактеризовано програмні засоби обробки даних повітряно-космічного спостереження.

Навчальний посібник відповідає програмі навчальної дисципліни «Обробка даних аерокосмічних спостережень» підготовки магістрів за спеціальністю 172 «Електронні комунікації та радіотехніка». Також він може бути корисним для студентів, що навчаються за спеціальністю 103 «Науки про Землю» та займаються обробленням повітряних і космічних знімків Землі.

УДК 528.8

Навчальне видання

**ГОРШЕНІН Олександр Євгенович
Варганова Діна Олександрівна**

Обробка даних аерокосмічних спостережень

Навчальний посібник

Електронне видання

Комп'ютерний дизайн та верстка: Горшенін О. Є.
Державний університет «Житомирська політехніка»

вул. Чуднівська, 103, м. Житомир, 10005

ISBN

© О. Є. Горшенін, Д. О. Варганова, 2026

ЗМІСТ

Список скорочень	4
Вступ	6
1. Принципи повітряно-космічних спостережень	8
1.1 Загальні принципи повітряно-космічних спостережень	8
1.2 Орбітальний рух космічних апаратів спостереження	16
1.2.1 Загальні відомості про космічний простір	16
1.2.2 Основні системи координат в механіці космічних польотів.	17
1.2.3 Системи рахування часу	20
1.2.4 Основні принципи та особливості орбітального руху космічних апаратів спостереження	25
1.2.5 Моделювання руху космічних апаратів спостереження	32
1.3 Фізичні основи та апаратура отримання даних космічного спостереження	36
1.3.1 Особливості отримання знімків земної поверхні з космічних апаратів	36
1.3.2 Основні принципи побудови та можливості оптико-електронної апаратури аерокосмічних спостережень	39
1.3.3 Основні принципи побудови та можливості радіолокаційної апаратури аерокосмічних спостережень	46
1.3.4 Основні характеристики оптико-електронних космічних знімків закордонних та вітчизняних супутникових систем	52
1.4 Наземні засоби приймання, збереження та обробки даних аерокосмічних спостережень	58
1.4.1 Радіолінії передачі спеціальної інформації	58
1.4.2. Станції приймання спеціальної інформації	59
1.4.3 Оператори продажу космічних знімків та джерела даних аерокосмічних спостережень	66
1.4.4 Сервіси космічних знімків та карт	68
1.4.5 Спеціальне програмне забезпечення для завантаження даних повітряно- космічного спостереження з відкритих джерел	70
2. Принципи, методи і засоби обробки даних повітряно-космічних спостережень	82
2.1. Зміст та принципи первинної обробки даних повітряно-космічних спостережень ...	82
2.1.1 Зміст первинної обробки даних повітряно-космічних спостережень	82
2.1.2 Радіометричні спотворення оптико-електронних знімків та їх корегування	83
2.1.3 Системи координат, що використовуються в обробці даних повітряно-космічних спостережень	91
2.1.4 Геометричні особливості оптико-електронних космічних знімків	100
2.1.5 Геометричне корегування та географічна прив'язка знімків	101
2.2 Зміст та основні принципи тематичної обробки даних повітряно-космічних спостережень	105
2.2.1 Особливості сприйняття людиною повітряно-космічних зображень	106
2.2.2 Завдання та загальні принципи організації візуального дешифрування знімків ...	111
2.2.3 Особливості спостереження об'єктів у польоті	113
2.2.4 Основні завдання тематичної обробки даних дистанційного зондування Землі та методи їх вирішення	117
2.2.5 Програмні засоби обробки повітряно-космічних знімків	119
2.2.6 Застосування геоінформаційних систем в обробці повітряних і космічних знімків	122
Предметний покажчик.....	128
Перелік використаних джерел.....	131

СПИСОК СКОРОЧЕНЬ

АПП – антенно-повертальний пристрій;
АСУ – автоматизована система управління;
АЦП – аналогово-цифровий перетворювач;
БГД – база геоданих;
БКЗ – бортовий комплекс забезпечення;
БІК – бортовий інформаційний комплекс;
БПЛА – безпілотний літальний апарат;
ГІС – географічна інформаційна система;
ГСО – геостаціонарна орбіта;
ДЗЗ – дистанційне зондування Землі;
ДС – діаграма спрямованості;
ЗП – запам'ятовуючий пристрій;
КА – космічний апарат;
КВК – командно-вимірювальний комплекс;
ЛКМ – ліва кнопка миші;
НІК – наземний інформаційний комплекс;
НКУ – наземний комплекс управління;
НП – наземний пункт;
ПДС – приймально-демодулююча станція;
ПЗЗ – прилад із зарядовим зв'язком;
ПКМ – права кнопка миші;
ПППОІ – пункт прийому та попередньої обробки;
ПТ – підсупутникова точка;
РЛ – радіолінія;
РЛС – радіолокаційна станція;
РЛСБО – радіолокаційна станція бокового огляду;
РНС – радіонавігаційна система;
РПРД – радіопередавач;
РПРМ – радіоприймач;
РПС – радіопередавальна система;
РПРС – радіоприймальна система;
РСА – радіолокатор з синтезованою апертурою;
РСУ – робоча станція управління;
СЗПД – система зв'язку та передачі даних;
СПСІ – станції приймання спеціальної інформації;
СК – система координат;
СКБД – система керування базами даних;
СНК – станція нормалізації та конвертування;
СПА – система поточного архівування;
ССО – сонячно-синхронна орбіта;
ЦОП – центр оперативного планування;
ЦОСІ – центр обробки спеціальної інформації;
ЦКМ – цифрова карта місцевості;
ЦМР – цифрова модель рельєфу;
ЦУП – центр управління польотом;
ШПФ – швидке перетворення Фур'є;
ЗД – тривимірн-е (-а, -ий);

GIS – Geographic(al) Information System;
GPS – Global Positioning System;
KML – Keyhole Markup Language;
NASA – National Aeronautics and Space Administration;
NIR (Near Infrared)
OSM – Open Street Map;
WGS84 – World Geodetic System 1984;
USGS – United States Geological Survey;
UTM – Universal Transverse Mercator;

ВСТУП

Спостереження – один із найстаріших методів добування інформації. Будь-яке знання засноване на спостереженнях за явищами природи або людської діяльності. Узагальнено спостереженням можна називати будь-які типи одержання актуальної інформації про об'єкти і явища. Розвиток інформаційних технологій у наш час надає потужний поштовх до розвитку засобів спостереження за різноманітними природними і штучними об'єктами на земній поверхні, аналізу стану та розташування цих об'єктів. До таких засобів відносять поряд з іншими повітряні і космічні системи спостереження. Комплексне застосування систем повітряно-космічного спостереження (ПКС) дозволяє на якісно новому рівні вирішувати завдання планування розміщення та обслуговування просторово розкиданих елементів радіотелекомунікаційних систем, управління їх безпекою та логістикою.

Дані ПКС знайшли широке застосування під час побудови та експлуатації радіотелекомунікаційних систем (РТКС). Ці дані відіграють значну роль у оптимізації систем зв'язку, моделюванні покриття мережі, аналізі перешкод та забезпеченні стійкості інформаційної інфраструктури в умовах динамічних змін зовнішнього середовища. Системи ПКС дозволяють отримувати точну інформацію про географічні, кліматичні та атмосферні умови, а також характеристики рельєфу. Такі дані забезпечують фахівців доступом до високоточного опису навколишнього середовища, що впливає на розповсюдження електромагнітних хвиль, роботу антенних систем та стійкість зв'язку в цілому. Особливо важливими ці дані є в плануванні зон покриття для радіо та телекомунікаційних мереж. Зображення, отримані з космічних супутників, дозволяють моделювати розташування базових станцій у складних географічних умовах, таких як гори, височини чи щільно забудовані міста. Аналіз даних ПКС допомагає прогнозувати вплив атмосферних явищ (дощів, гроз, снігових бур) на якість передачі сигналу. Використання цих даних також є важливою частиною механізмів безпеки, зокрема для захисту мереж від зовнішніх загроз (повені, зсуви, пожежі тощо). Немаловажним напрямком застосування даних ПКС є аналіз і планування маршрутів підходу до автоматичних радіо-телекомунікаційних засобів у важкодоступних районах та у складних умовах.

Дані ПКС потрібні практично скрізь, де використовується територіально розподілені елементи і є необхідність територіальної оцінки, аналізу і прогнозу. Вони використовуються при аналізі та моделюванні об'єктів природокористування, транспортних комунікацій, зв'язку, техногенних та природних катастроф тощо. У медичній сфері на основі таких даних аналізуються фактори, що впливають на рівень захворювань. Велику роль дані ПКС відіграють в забезпеченні ситуаційної обізнаності (*Situational Awareness*) або ситуаційного розуміння (*Situational Understanding*) у військової справі. [1]

Завдання її інтерпретації, аналізу та подальшого використання даних ПКС вимагає комплексного підходу. Поєднання результатів знімання космічними апаратами (КА) поверхні Землі з повітряним зніманням з безпілотних літальних апаратів (БПЛА) дозволило по-новому вивчати Землю: бачити та

досліджувати закриті з тих чи інших причин території та недосяжні ділянки. Основною позитивною властивістю даних ПКС є їх оперативність, об'єктивність і достовірність – знімки дозволяють відображати фактичну на даний час інформацію.

Позитивними властивостями космічного знімання є: детальність – можливе спостереження будь-якої території на Землі з детальністю до 30 см; оглядовість – на одному космічному знімку може бути відображена ланка поверхні Землі розміром від одиниць до десятків кілометрів (в залежності від потрібної детальності знімків); багатоспектральний характер спостережень (набір спектральних каналів в одному знімку), що дозволяє отримувати з одного знімка величезну кількість даних для аналізу стану об'єктів спостереження.[2]

Повітряне знімання з БПЛА має свої властивості, що доповнюють спостереження високою оперативністю отримання даних та високою детальністю знімків (до кількох міліметрів у залежності від дальності спостереження).

Перший розділ навчального посібника присвячений розгляду основ побудови та прикладів реалізації засобів для космічного та повітряного спостереження. Розглянуті особливості руху космічних засобів спостереження та основи його моделювання, фізичні основи та засоби отримання даних космічного спостереження, особливості отримання знімків у різних діапазонах випромінювань. Окремо розглядаються наземні засоби отримання і обробки даних спостереження. Приділена увага сучасним Інтернет-сервісам, що є джерелами космічних знімків від комерційних систем космічного спостереження та програмним засобам взаємодії з ними.

Другий розділ спрямований на викладення інформації щодо принципів, методів та засобів обробки даних повітряно-космічних спостережень. Основна увага приділена первинній обробці, як застосовуваної найбільш широко у різних галузях. Розглядаються загальні прийоми радіометричного корегування та основи прив'язки знімків до координат земної поверхні (геореференціювання). Окремо приділена увага найбільш застосовуваному етапу тематичної обробки – візуальному аналізу знімків. Узагальнено розглянуті методи, що застосовують в процесі автоматизованої обробки даних і програмні засоби, що їх реалізують.

1. ПРИНЦИПИ ПОВІТРЯНО-КОСМІЧНИХ СПОСТЕРЕЖЕНЬ

1.1 Загальні принципи повітряно-космічних спостережень

У останні два десятиліття набув широкого поширення особливий клас інформаційних систем спостереження, який називають системи повітряно-космічного спостереження (ПКС). На сьогодні ПКС стало грати значну роль в діяльності людства. ПКС дуже швидко розвивається і захоплює все нові сфери життя і діяльності. Ефективну роботу сучасної економіки будь-якої країни важко уявити без авіаційних і супутникових методів дослідження поверхні Землі і об'єктів, що на неї розміщені – дистанційного зондування Землі. **Дистанційне зондування Землі (ДЗЗ)** – процес отримання даних про поверхню Землі методом аерофотозйомки або шляхом спостереження і вимірювань із космосу. [6]

Системи повітряно-космічного спостереження впливають на багато аспектів нашого життя. Управління складними територіально рознесеними системами, якими є радіотелекомунікаційні системи, вимагає достовірного і оперативного інформаційного забезпечення. Вироблення обґрунтованих і ефективних рішень можливе тільки на основі відповідної обробки і аналізу величезних об'ємів інформації про просторово розподілені системи та об'єкти. Це вимагає комплексного залучення засобів, що базуються на космічних, авіаційних, радіотелекомунікаційних і комп'ютерних технологіях.

Дані ПКС використовується бізнесом, виробництвом і урядовими установами. Прикладами просторово розподілених об'єктів планування і управління є:

- радіотелекомунікаційні установи і підприємства зв'язку використовують дані ПКС для планування оптимального розміщення радіотрансляційних засобів;

- підприємства з територіально розподіленими елементами і ресурсами використовують дані ПКС для моніторингу та оптимізації розміщення цих елементів;

- логістичні структури з використовують дані ПКС для оперативного моніторингу шляхів доступу та потоків вантажів;

- транспортні підприємства та установи використовують дані ПКС для управління рухом, забезпеченням паливом та іншими ресурсами;

- екологічні організації використовують дані ПКС для моніторингу та поліпшення стану навколишнього середовища в просторі;

- будівельні фірми використовують дані ПКС для пошуку оптимальних місць для будівництва;

- туристичні фірми використовують дані ПКС для вибору та стеження за туристичними маршрутами;

- комунальні підприємства використовують дані ПКС для поліпшення управління всіма ресурсами побутового призначення;

- органи та установи державного управління;

- органи, установи і підрозділи «силових» органів держави;

органи, установи і підрозділи управління надзвичайним станом та багато інших.

Під час стихійних лих растрові дані супутникових знімків можуть бути корисними, щоб показати, де знаходяться постраждалі райони. Наприклад, нещодавній супутниковий знімок, зроблений під час повені, може допомогти показати, де люди можуть потребувати порятунку (рис. 1.1).

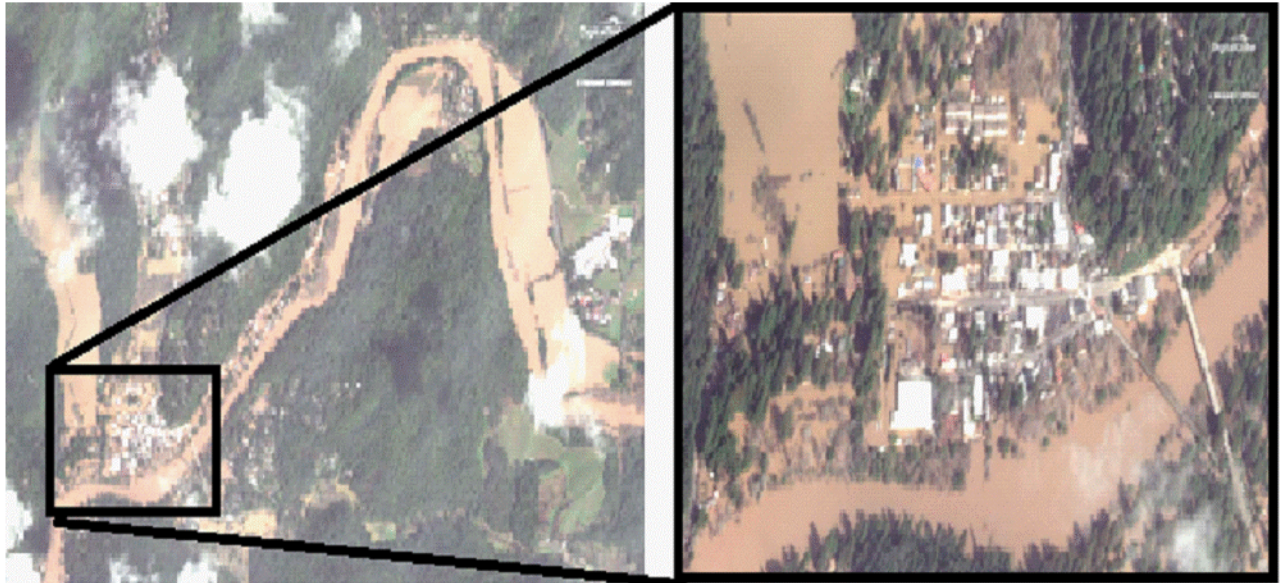


Рис. 1.1 – Супутниковий знімок населеного пункту під час повені



Рис. 1.2 – Супутниковий знімок стихійного сміттєзвалища на околиці Житомира

Іноді люди завдають шкоди навколишньому середовищу, наприклад, скидають небезпечні хімічні речовини, які вбивають рослини і тварин. Використання растрових даних з супутників може допомогти нам відстежувати такі проблеми. Містобудівники можуть використовувати растрові дані з супутників, щоб побачити, де знаходяться неформальні поселення або сміттєзвалища, і допомогти у плануванні інфраструктури (рис. 1.2).

У більш широкому розумінні, дистанційне зондування Землі – це науковий напрямок, заснований на збиранні інформації про поверхню Землі без фактичного контактування з нею.

Процес отримання даних про поверхню включає зондування і запис інформації про відображені або випускається об'єктами енергії з метою подальшої обробки, аналізу та практичного використання.

Процес повітряно-космічного спостереження представлений на рис.1.3 і складається з наступних частин:

Джерело опромінювання чи освітлення (А). Джерело енергії опромінює об'єкти зондування та підживлює енергією електромагнітне поле, яке потім

надходить від об'єктів та становить інтерес для дослідження. В залежності від способу зондування опромінювачем може бути сонце, передавач радіолокатора або лазер оптичного локатора.

Атмосфера (В). Випромінювання що поширюється від джерела до об'єкта частину шляху проходить крізь атмосферу Землі. Характеристики атмосфери безпосередньо впливають на параметри енергетичних випромінювань, що проходять крізь її товщу. Так само, випромінювання, яке йде від об'єкта, також піддається впливу атмосфери на шляху до приймальної апаратури засобу ДЗЗ.

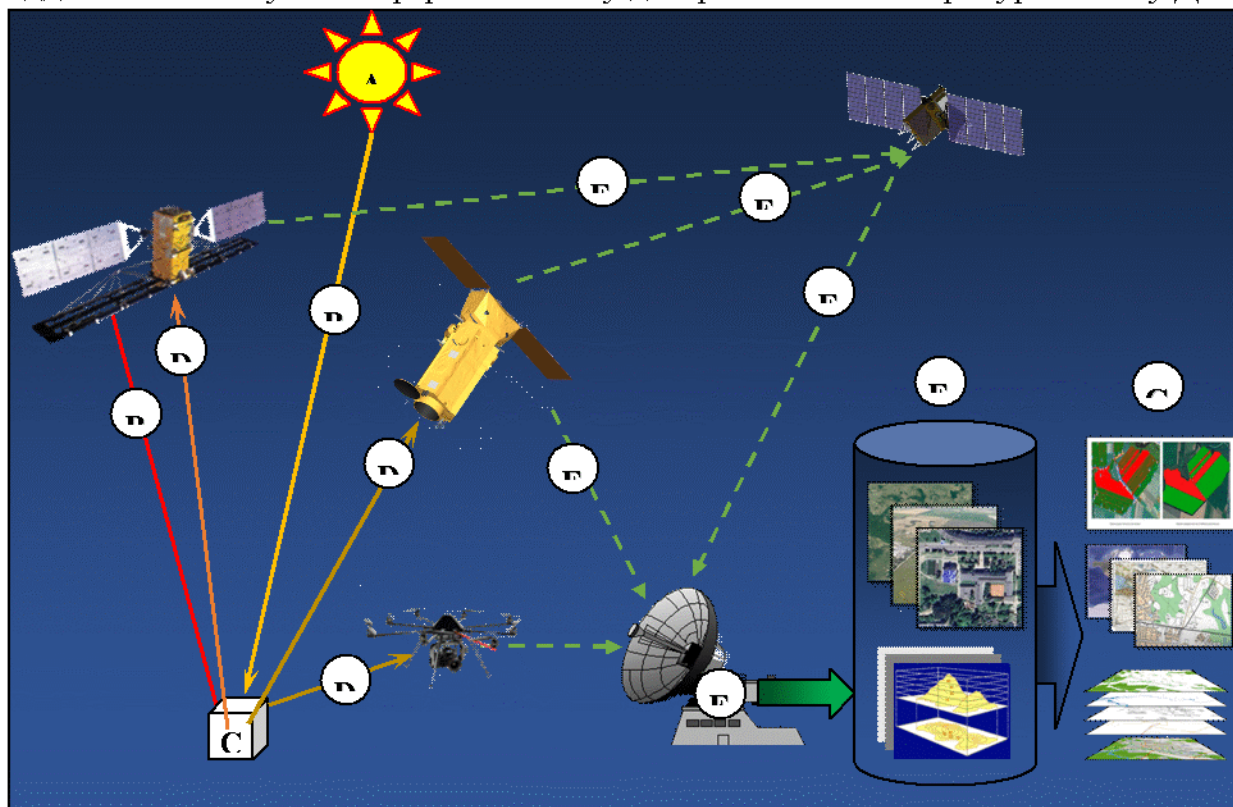


Рис. 1.3 – Схема процесу дистанційного зондування Землі

Об'єкт дослідження (С). Характер взаємодії падаючого на об'єкт випромінювання залежить від властивостей, як самого об'єкта, так і випромінювання.

Датчик реєстрації випромінювання (D). Випромінювання від об'єкта дослідження, крізь атмосферу потрапляє на віддалений (на КА, на літаку, на БПЛА) високочутливий датчик, де сприймається, вимірюється, а отримана інформація реєструється. В подальшому ця інформація передаватиметься до наземних пунктів приймання та попередньої обробки.

Система передавання та попередньої обробки інформації (E). Інформація, що зібрана знімальною апаратурою засобу ДЗЗ передається в цифровому вигляді на станцію, що приймає, де дані трансформуються в зображення та попередньо обробляються: підготовлюються до операцій тематичного оброблення.

Система інтерпретації та аналізу (F). Отримані та попередньо оброблені зображення обробляють з певною метою за допомогою комп'ютерних методів або дешифрують візуально. В результаті із зображень (знімків) отримують корисну інформація щодо об'єкта, що досліджується.

Доведення результатів спостереження до споживачів (G). Процес спостереження досягає завершення, коли отримана системою спостереження корисна інформація щодо об'єкта інтересу надходить до споживачів та сприяє кращому розумінню стану, властивостей та поведінки об'єкта спостереження задля вирішення певного практичного завдання.

Дистанційні методи поділяються на активні та пасивні. При використанні активних методів апаратура зондування посилає на Землю сигнал власного джерела енергії (лазера, радіолокаційного передавача) та реєструє наслідки його відбиття об'єктами (рис. 1.4).

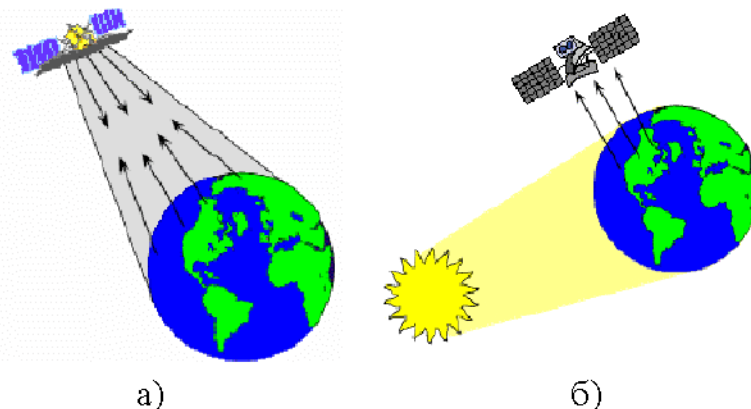


Рис. 1.4 – Методи ДЗЗ: а – активні; б – пасивні

Пасивні методи передбачають реєстрацію відбитої від поверхні об'єктів сонячної енергії чи власного теплового випромінювання об'єктів. Основними джерелами випромінювання, що реєструється пасивними засобами аерокосмічного спостереження, є енергія Сонця, енергія випромінена Землею (поверхнею Землі та об'єктами, що на ній знаходяться), енергія розсіяна і випромінена атмосферою.

Сонце є основним опромінювачем, який визначає можливості знімання земної поверхні у видимому та ближньому інфрачервоному діапазонах. За межами земної атмосфери спектр випромінювання Сонця досить близький до спектра випромінювання абсолютно чорного тіла з температурою 5900К. Але земна атмосфера послаблює енергію опромінювання в певних ланках довжин хвиль (рис. 1.5). Потік сонячного світла, проходячи крізь атмосферу, піддається як кількісній, так і якісній зміні. Якісна зміна пов'язана зі зміною спектрального складу потоку та зміною напрямку випромінювання (рефракцією), а кількісна – з втратами його інтенсивності.

Зміна спектрального складу та інтенсивності відбувається за рахунок **поглинання і розсіювання** випромінювання. В оптичному діапазоні поглинання відбувається різними газовими складовими (молекулярне поглинання) і аерозолями (аерозольне поглинання). Розсіювання світла також є молекулярне та аерозольне. Поглинання та розсіювання формують так звані **вікна прозорості атмосфери**.

Для космічного оптико-електронного знімання найчастіше використовують наступні **діапазони хвиль**: видимий (світловий) – від 0,38 до 0,76 мкм; ближній (фотографічний) інфрачервоний (ІЧ) – від 0,76 до 0,9 мкм;

середній інфрачервоний – від 1,55 до 1,75 мкм і від 2,1 до 2,35 мкм; дальній (тепловий) інфрачервоний – від 3,5 до 5,0 мкм і від 8,0 до 14 мкм.

У **видимому діапазоні** при зніманні з космосу звичайно реєструють лише відбите поверхнею Землі випромінювання. На відміну від видимого діапазону в **ІЧ діапазоні** і радіодіапазоні можлива реєстрація не тільки відбитого випромінювання, але і власного (теплого) випромінювання поверхні Землі і атмосфери. Знімання в мікрохвильовому діапазоні випромінювань (від 1 мм до 30 см) здійснюють вже не оптико-електронними, а радіотехнічними засобами – пасивними радіометрами та активними радіолокаторами.

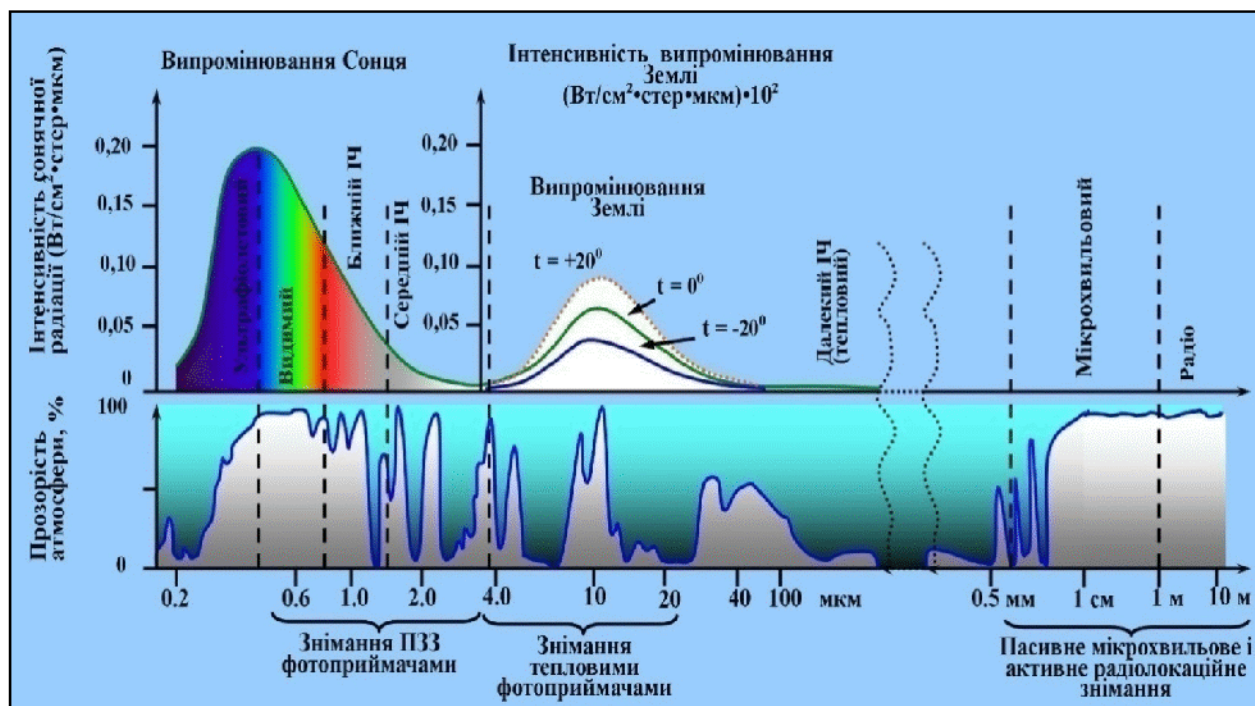


Рис. 1.5 – Випромінювання Сонця і Землі їх послаблення земною атмосферою

При денному зніманні земна поверхня (ландшафт) освітлюється Сонцем. Величина природної денної освітленості ландшафту визначається як *астрономо-географічними*, так і *метеорологічними факторами*. Метеорологічні фактори – хмарність, стан атмосфери і земної поверхні.

До *астрономо-географічних* відносяться широта і довгота місцевості, дата і час доби знімання. Параметри цієї групи визначають висоту Сонця над обрієм. В свою чергу висота Сонця є найбільш визначною для освітленості поверхні Землі. Максимальна освітленість, створена Сонцем у зеніті, в екваторіальних широтах при чистому небі – $1,3 \times 10^5$ лк. На середніх широтах зміна освітленості земної поверхні змінюється в межах 10^3 - 10^4 лк.

Сумарна освітленість E земної поверхні складається з трьох складових, кожна з яких залежить від наведених факторів і змінюється за часом (рис. 1.6):

$$E = E_{\text{п}} + E_{\text{р}} + E_{\text{с}},$$

де $E_{\text{п}}$ - освітленість прямими променями Сонця; $E_{\text{р}}$ - освітленість, створювана променями світла, розсіяного в атмосфері; $E_{\text{с}}$ - освітленість, обумовлена променями світла, відбитого сусідніми яскравими об'єктами (наприклад хмарами).

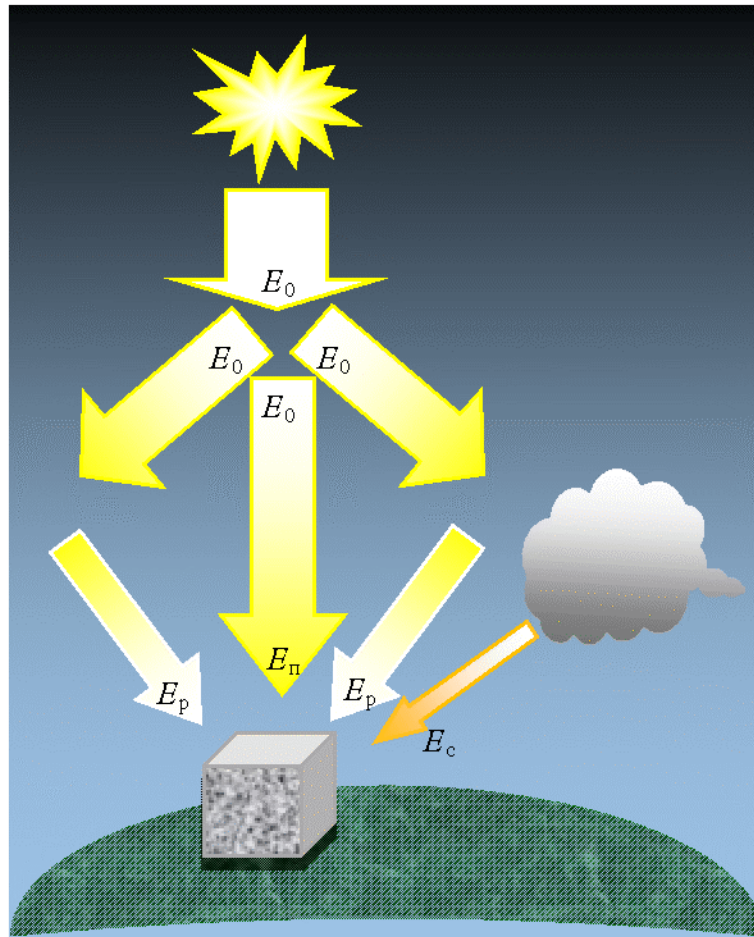


Рис. 1.6 – Освітлювання земної поверхні

Відбиття від поверхонь. Залежно від ступеня шорсткості поверхні відбиття від неї падаючого на поверхню випромінювання може бути дзеркальним (спрямованим), дифузним (абсолютно розсіяне) і дзеркально-дифузним (спрямовано розсіяне) (рис. 1.7).

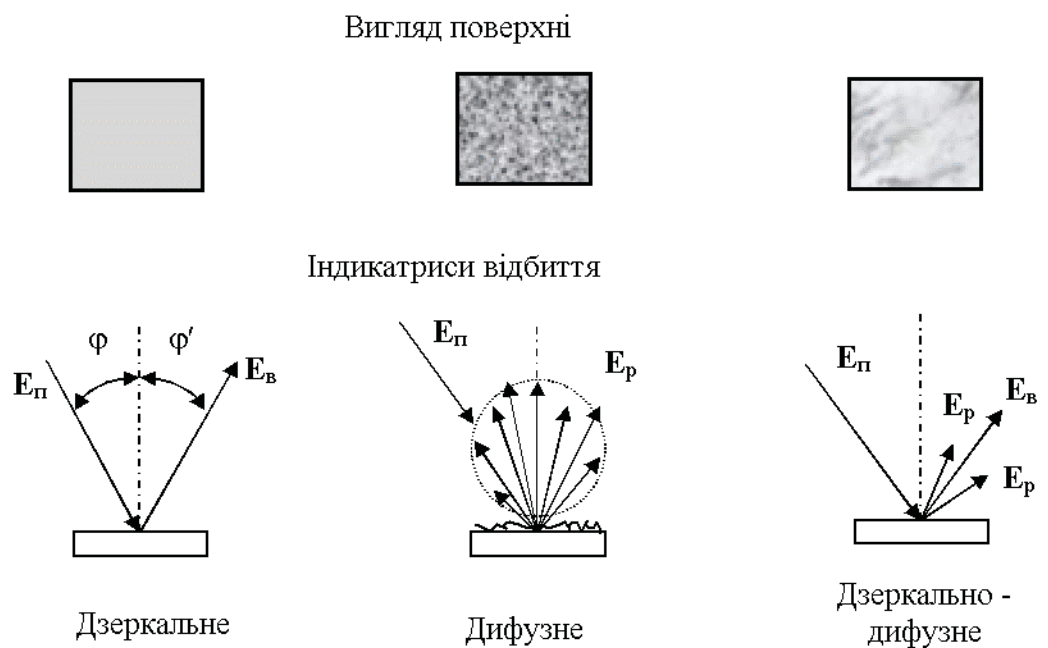


Рис. 1.7 – Види відбиття випромінювань

Дзеркальне відбиття мають гладкі, поліровані поверхні (металів, скло, кристалів, пластмас тощо), шорсткості і нерівності яких малі в порівнянні з довжиною хвилі світла. При дифузному відбитті випромінювання після відбиття розповсюджується у всі боки рівномірно у випадку коли нерівності поверхні за розміром близькі до довжини хвилі або більші (шорсткувата або матова поверхня). Одна і та ж поверхня може бути матовою, дифузно-відбиваючою для видимого або ультрафіолетового випромінювання, але гладкою і дзеркально-відбиваючою для інфрачервоного випромінювання.

В процесі відбиття частина енергії випромінювання поглинається. Кількісно оцінити ступень поглинання можна **коефіцієнтами відбиття**, що обраховують як відношення енергії відбитого випромінювання до енергії опромінення (освітлення) поверхні. Розрізняють коефіцієнти дифузного $\gamma_{\text{дф}}$ та дзеркального відбиття $\gamma_{\text{дз}}$.

Коефіцієнт дифузного відбиття для видимого діапазону – це дійсне **альbedo** - відношення світлового потоку, розсіяного плоским елементом поверхні в усіх напрямках, до потоку, що падає на цей елемент. Більшість об'єктів земної поверхні відбивають дифузно або дзеркально-дифузно. Прикладами дзеркального відбиття від об'єктів може бути відбиття від поверхні спокійної води або від металевих дахів будинків.

Приклади альbedo різних поверхонь:

сухий сніг – 0,85-0,95;	брудний сніг – 0,4-0,5;
морський лід – 0,3-0,4;	темні ґрунти – 0,05-0,15;
вологі сірі ґрунти – 0,1-0,2;	поля злакових – 0,1-0,25;
луги – 0,15-0,25;	хвойний ліс – 0,1-0,15;
листяний ліс – 0,15-0,25.	

Відбите від елементів земної поверхні випромінювання проходить атмосферу в напрямку на КА так само з **поглинанням та розсіюванням в атмосфері**. В змінному вигляді: зі зменшеним контрастом та з засвітленням від розсіювань на серпанку в атмосфері воно потрапляє на вхідний отвір об'єктива знімальної апаратури. Схематично ці процеси показані на рисунку 1.8.

При дистанційному зондуванні Землі з космосу найбільш широко використовуються оптичний діапазон електромагнітних хвиль та мікрохвильова ділянка радіодіапазону (табл. 1.1). Оптичний діапазон включає ультрафіолетову (УФ), видиму і інфрачервону (ІЧ) ділянки спектру. В свою чергу, видима ділянка містить синю (В), зелену (G) та червону (R) смуги; інфрачервона ділянка – ближню, середню та далеку ланки (табл. 1.1).

Ближня і середня ІЧ області (див. рис. 1.5) відповідають відбитому (сонячному) випромінюванню, далека – емісійному випромінюванню (власному тепловому випромінюванню Землі).

Кожен об'єкт (матеріал) має характерний спектр відбиття та випромінювання, який відповідає його хімічному складу. Під час падіння на об'єкт опромінюючих променів, хвилі деякої довжини поглинаються хімічними зв'язками, а інші відбиваються у напрямку датчика.

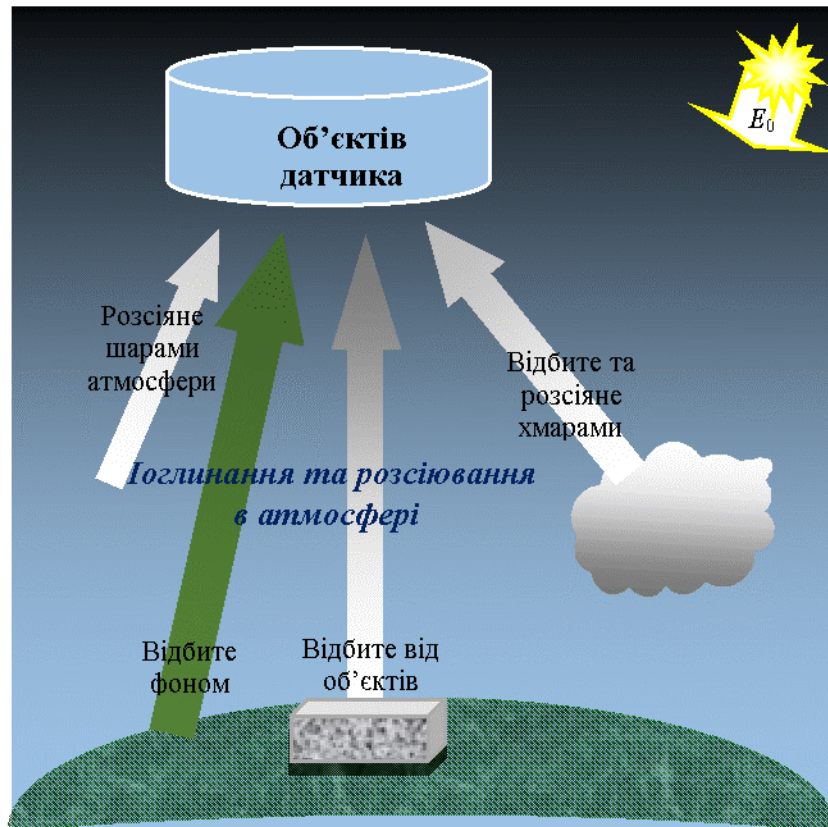


Рис. 1.8 – Проходження атмосфери відбитого від об'єктів випромінювання

Таблиця 1.1 – Характеристики спектральних діапазонів

Назва області спектра	Межі діапазону області спектра, мкм, см
Видима (мкм): фіолетова синя блакитна зелена жовто – зелена жовта жовтогаряча червона	 0,39...0,45 0,45...0,48 0,48...0,51 0,51...0,55 0,55...0,575 0,575...0,585 0,585...0,62 0,62...0,80
Інфрачервона (мкм): ближня середня далека	 0,8...1,5 1,5...3,0 >3,0
Радіохвильова (см) : X C S L UHF	 2,4...3,8 3,8...7,5 7,5...15 15...30 30...100

За типом подання інформації космічні та аерознімки поділяються на панхроматичні (півтонове зображення видимого діапазону), знімки в

ближньому інфрачервоному (VNIR) діапазоні, багатоспектральні знімки (у кількох спектральних смугах випромінювання), теплові знімки (коли в пік селях зображення містяться вже розраховані значення температури відповідної ланки поверхні або шару атмосфери) та гіперспектральні знімки. Знімки можуть зберігатися як файли на диску або у файловій системі зберігання, у базі геоданих або на деякому сервісі (наприклад, на сервісі зображень або на сервісі покриттів).

1.2 Орбітальний рух космічних апаратів спостереження

1.2.1 Загальні відомості про космічний простір

Космічні тіла у Всесвіті поєднуються в системи, складові частини яких зв'язані між собою серед іншого силою тяжіння. Для спостерігача, що розташований на Землі під космічним простором слід розуміти не Всесвіт у філософському розумінні, а суто весь той простір, що простирається за межі земної атмосфери. У космічному просторі визначають окремі області: навколосезний космічний простір, міжпланетний простір, міжзоряний простір тощо. Ці області мають різні властивості. У межах цього навчального посібника надалі розглядатиме тільки навколосезний космічний простір.

Сонячна система – це множина небесних тіл, які рухаються у гравітаційному полі Сонця. До її складу входять: центральне тіло – Сонце; вісім великих планет з 34 супутниками; близько 2000 малих планет (астероїдів); більше 600 комет; безліч метеорних тіл та міжпланетний пил. Відстань, на якій спостерігаються об'єкти Сонячної системи, обмежується орбітою Плутона. Сонячна система рухається разом з нашою Галактикою по майже коловій орбіті зі швидкістю близько 250 км/с . Період обертання Сонячної системи навколо центра нашої Галактики становить близько 200 млн. років [4].

Сонце – газоподібне розпечене небесне тіло кулястої форми, найближча до Землі «зірка». Маса Сонця $M_C \approx 2 \cdot 10^{30} \text{ кг}$. У ньому зосереджено 99,866 % маси всієї Сонячної системи. Середній радіус Сонця $R_C \approx 7 \cdot 10^5 \text{ км}$, що приблизно в 110 разів більше середнього радіуса Землі. Найменша відстань від Землі до Сонця (в перигелії, січень) $r_{C \text{ min}} = 147,1 \cdot 10^6 \text{ км}$, а найбільша (в афелії, липень) $r_{C \text{ max}} = 152,1 \cdot 10^6 \text{ км}$. Температура Сонця перебуває в межах від 4000 до 2 млн К, при цьому його середня температура становить $T_C^\circ = 6000 \text{ К}$. Освітленість Землі Сонцем (поза атмосферою) $E_C \approx 136000 \text{ лк}$ [4].

Планети – це «холодні» небесні тіла Сонячної системи. Більшість із планет видимі із Землі завдяки відбиваній ними сонячній енергії. Орбіти усіх планет за формою близькі до окружності та мають невеликий нахил одна до іншої.

Земля – третя за рахунком від Сонця планета. Вона має масу $M_3 \approx 61024 \text{ кг}$. Середня щільність Землі $\rho_3 \approx 5,517 \text{ г/см}^3$. Середня температура поверхні Землі $t_3^\circ = 15^\circ\text{C}$ або $T_3^\circ \approx 290 \text{ К}$. Прискорення вільного падіння на поверхні Землі становить $g_0 \approx 9,81 \text{ м/с}^2$. Радіус орбіти Землі (середня відстань від Землі до Сонця) $r_C \approx 150 \cdot 10^6 \text{ км}$, а лінійна швидкість руху Землі по орбіті $V_0 \approx 30 \text{ км/с}$. *Кутова швидкість обертання Землі навколо своєї осі*

$\omega_3 = 7,292115 \cdot 10^{-5} \text{ c}^{-1}$. Іноді для орієнтовних розрахунків приймають $\omega_3 \approx 15$ град/год ≈ 15 кут.хв/хв ≈ 15 кут.с/с. Середній радіус Землі $R_3 = 6371$ км [4].

Форма Землі не є кулею. Для визначення реальної форми Землі німецький математик і фізик Іоганн Лістінг у 1873 р. запропонував представляти її *геоїдом*, під яким розуміється фігура, що має в океанах середній рівень води, а на материках – рівень води в уявлених каналах, з'єднаних з океаном [4]. За такий підхід поверхня геоїда характеризується постійною величиною потенціалу сили тяжіння. Земля не однорідна за щільністю, що сприяє коливанню додаткової гравітаційної збурювальної сили, яка адитивно підсумовується із центральною силою тяжіння Землі. Відхилення гравітаційного поля Землі від гравітаційного поля геоїда за рахунок її нерівномірної щільності називаються *аномаліями* сили тяжіння. На сьогодні на земній кулі відомо близько 270 точок таких аномалій, але для практичного розрахунку збуреного руху космічних апаратів використовують близько 40 із них.

Космічний апарат (КА) – літальний технічний засіб для польотів у космос і в космосі з метою його дослідження та використання. [3] Рух космічних апаратів (КА) у космічному просторі відбувається за певними законами та в певних умовах. Для управління рухом КА та для прогнозування положення КА відносно певних ланок земної поверхні та заданий момент часу потрібно знати і враховувати ці закони і умови. Для описання руху КА слід враховувати, що він перебуває у системі небесних тіл. А це означає, що на КА діють як гравітаційні, так і електромагнітні сили не тільки Землі, а і усіх небесних тіл, що утворюють Сонячну систему.

Особливість КА як носія інструментів спостереження полягає в тому, що вони віддалені від об'єкта спостереження, розосереджені у просторі і в часі, здійснюють безперервний орбітальний (поступальний) і кутовий (обертальний) рух, мають обмежений технічний ресурс, функціонують у складних зовнішніх умовах космічного простору. [4]

1.2.2 Основні системи координат в механіці космічних польотів

Відомо, що для просторового опису положення та руху космічних об'єктів будь-якого походження та призначення використовують цілий ряд систем координат (СК). Вибір із цього ряду конкретної СК роблять, виходячи із можливостей їхньої фізичної реалізації, зручностей використання, простоти математичних розрахунків і наочності одержуваних результатів. Для опису орбітального руху КА, РН та інших космічних об'єктів найчастіше використовуються такі СК [4]: інерціальна геоцентрична прямокутна екваторіальна СК (ІСК); гринвіцька геоцентрична прямокутна екваторіальна СК (ГрСК); геоцентрична сферична СК (ГцССК); геодезична сферична СК (ГдССК); топоцентрична пунктова прямокутна СК (ТППСК); топоцентрична пунктова сферична СК (ТПССК).

Геоцентрична прямокутна екваторіальна системи координат (ІСК) (рис. 1.9). Її початок знаходиться в центрі Землі O . Опорна площина – площина екватора. Ось $X_{\text{и}}$ спрямована в точку весіннього рівнодення (ТВРД). Вісь $Z_{\text{и}}$ –

направлена вздовж осі обертання Землі в сторону Північного полюсу. Вісь $Y_{\text{И}}$ доповнює систему до правої. Положення об'єкта, що рухається, в даній СК задається поточними значеннями його координат $X_{\text{И}}, Y_{\text{И}}, Z_{\text{И}}$ і значеннями проекції вектора лінійної швидкості V_X, V_Y, V_Z на координатні осі. Інколи в цій системі координат використовують полярні сферичні координати. Зазначимо, що ІСК зв'язана із Землею, але не з обертанням Землі навколо своєї осі, а тільки з її центром і площиною екватора. Тому положення осей ІСК практично не залежить від часу. Через це її ще називають абсолютною або нерухомою СК.

Відносна (гринвіцька) геоцентрична прямокутна екваторіальна система координат (ГрСК). На рисунку 1.9 вона позначена осями X_G, Y_G, Z_G .

Початок СК також розташований в центрі Землі. Ось X_G спрямована в точку перетинання Гринвіцького меридіану з екватором, тобто система ГрСК обертається разом з Землею. Будується аналогічно з ІСК і збігається з нею один раз на добу, коли співпадають напрямлення осей OX_G та напрямлення на ТВРД. Положення ГрСК в ІСК задається кутом її повороту γ за певний інтервал зоряного часу. Положення та рух об'єкту в цій системі координат задається поточними значеннями його координат X_G, Y_G, Z_G і значеннями проекцій вектора лінійної швидкості V_X, V_Y, V_Z на координатні осі.

На основі ГрСК можливо задати **геоцентричну сферичну систему координат (ГцССК)** котра також обертається разом з Землею (рис. 1.10). Положення тіла в ній задається відстанню r від центра Землі до центру мас КА, *географічною* довготою λ та *географічною* широтою ϕ проекції КА на поверхню Землі. Кут ϕ та λ відраховуються від площин та осей ГрСК. Цю систему використовують для опису положення як наземних, так і космічних об'єктів. Положення наземних пунктів (НП) у ній так само задається відстанню (радіусом-вектором) r від центра

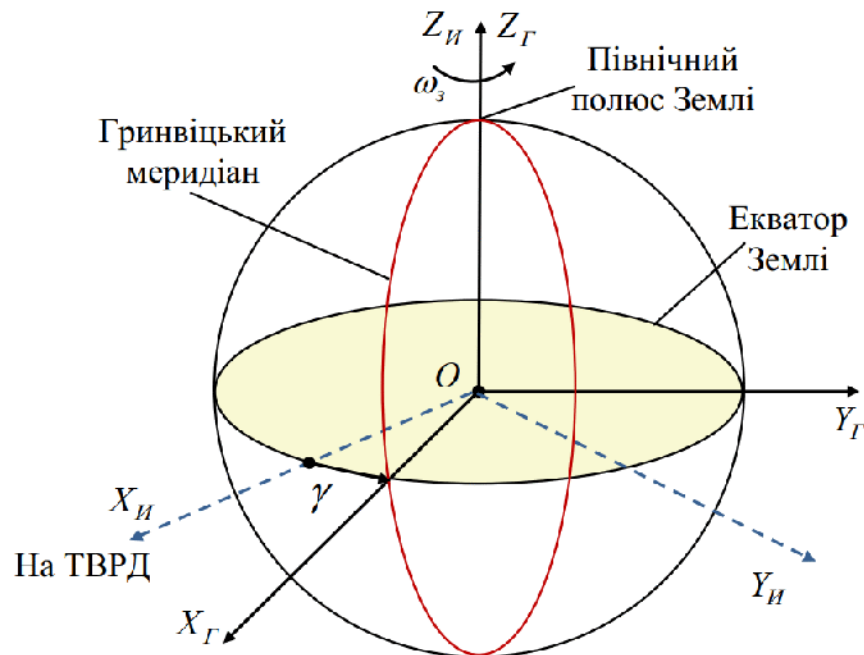


Рис. 1.9 – Інерціальна та гринвіцька системи координат

Землі до НП, *геоцентричною* широтою $\phi_{\text{ц}}$ (кутом між радіусом-вектором і площиною екватора) і *геоцентричною* довготою $\lambda_{\text{ц}}$ (кутом між Гринвіцьким

меридіаном і меридіаном НП). При цьому позитивний напрямок відлічується від Гринвіцького меридіану на схід. Для опису положення КА в цій системі досить замість радіуса-вектора НП використовувати радіус-вектор на КА (рис. 1.10).

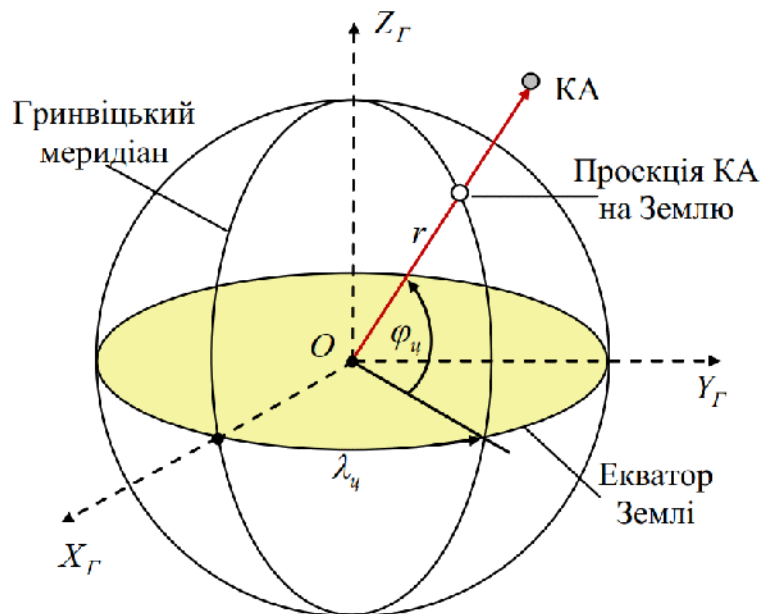


Рис. 1.10 – Геоцентрична сферична СК

Геодезична сферична СК (ГдСС) застосовується для визначення координат НП у тих випадках, коли за модель Землі прийнята не сфера, а референц-еліпсоїд (Красовського, Кларка тощо). Вона відрізняється від ГцССК тільки способом за дання широти. Тут φ – *геодезична широта* (кут між *нормаллю до поверхні еліпсоїда* та *площиною екватора Землі*); $\lambda = \lambda_{\text{ц}}$ – *геодезична довгота*. Детальніше ГдСС розглянута далі у п.2.13.

Топоцентрична пунктова прямокутна система координат (ТППСК) задається відносно площини місцевого горизонту – площини що є дотичною до поверхні Землі у точці розташування НП (рис. 1.11).

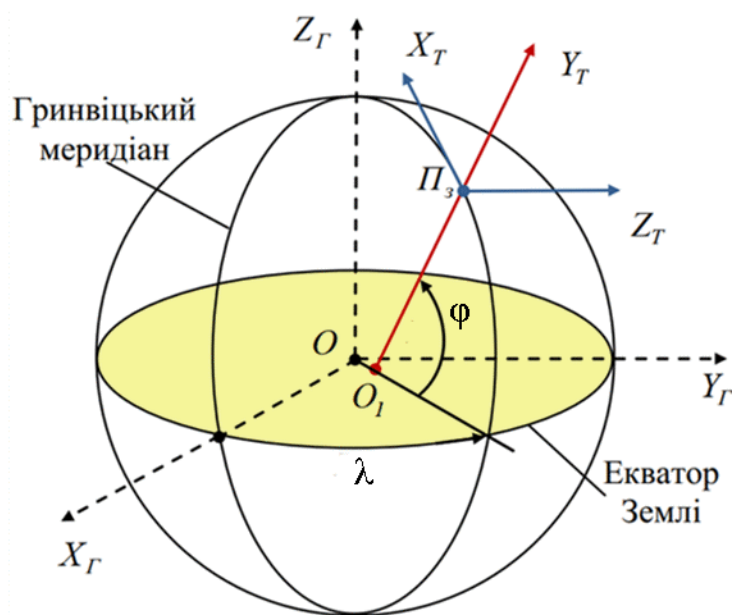


Рис. 1.11 – Топоцентрична пунктова прямокутна СК та ГдСС

Вісь X_T спрямована по дотичній до меридіана НП у бік Північного полюса, вісь Y_T – уздовж радіуса-вектора із центра Землі в точку розташування НП $П_3$, вісь Z_T доповнює систему до правої. Положення НП задається геодезичною широтою φ та геодезичною довготою λ . Положення та рух об'єктів у даній СК задається значеннями їхніх координат X_T, Y_T, Z_T і значеннями проєкцій вектора лінійної швидкості V_{xT}, V_{yT}, V_{zT} на координатні осі.

Топоцентрична пунктова сферична СК (ТПССК) відрізняється від ТПІСК тим, що положення об'єкта (КА) у ній задається кутом місця α , азимутом β і нахиленою дальністю D (рис. 1.12).

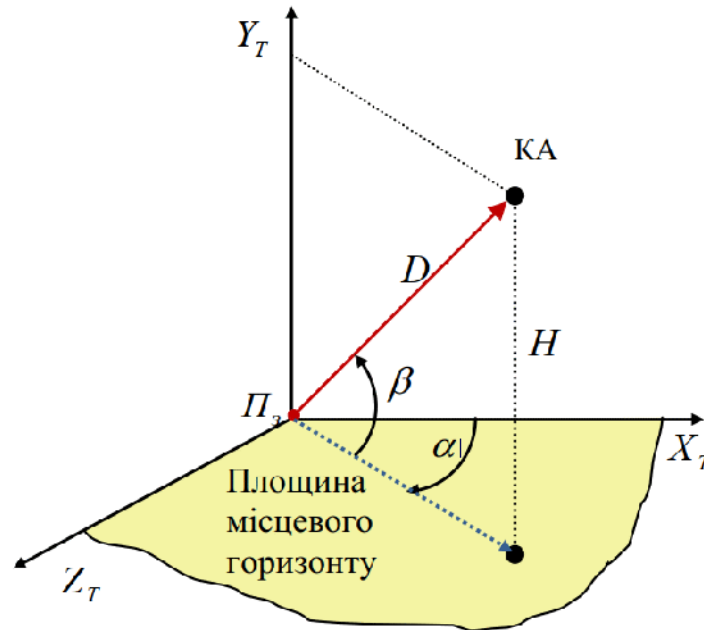


Рис. 1.12 – Топоцентрична пунктова сферична СК

Кутом місця α називається плоский кут у вертикальній площині між проєкцією радіуса-вектора КА на площину місцевого горизонту та напрямком на КА. Цей кут змінюється у межах від 0° до 90° . Азимут β називається плоский кут у горизонтальній площині між напрямком на північ і напрямком на проєкцію радіуса вектора КА на площину місцевого горизонту. Він відлічується за годинниковою стрілкою і змінюється у межах від 0° до 360° . Нахилена дальність D – це найкоротша відстань від НП до КА. Вона обмежується висотою КА H та модулем його радіуса вектора $r = H + R$ з і лежить у діапазоні $H \leq D < r$.

1.2.3 Системи рахування часу

Усі небесні тіла, а також космічні об'єкти *безупинно рухаються* у часі та у просторі. Тому для опису такого руху необхідно знати одиниці виміру та системи обчислення часу. При цьому під **часом** найчастіше розуміють величину, яка характеризує послідовну зміну явищ і станів матерії, що визначає тривалість їх буття.

Під *системою обчислення часу* слід розуміти упорядковану сукупність категорій часу, які в певних сполученнях між собою дозволяють описувати процеси в різних системах. Для виміру часу користуються природними або штучними періодичними процесами зі стабільним періодом повторення. До

природних процесів належать обертання Землі навколо своєї осі та її орбітальний рух навколо Сонця. Найпоширенішими *штучними* процесами є коливання маятника, резонансні коливання кварцової пластинки (кварцові годинники), коливальні процеси в атомах і молекулах (атомні годинники, молекулярні годинники). Історично людство віддавна використовує дві *основні одиниці* виміру часу, обумовлені: обертанням Землі навколо власної осі – **добу**; рухом Землі по екліптиці навколо Сонця – **рік**.

Доба – це проміжок часу, за який Земля робить повний оберт навколо своєї осі відносно якої-небудь точки на небесній сфері. Як *опорна точка* (орієнтир) небесної сфери під час виміру часу можуть використовуватися: точка весняного рівнодення (ТВРД); центр істинного Сонця; середнє екваторіальне Сонце. ТВРД перебуває в центрі Сонця 20 або 21 березня кожного року. В інші дати її можна задати напрямком на зірку, що у ці дні лежить на лінії весняного рівнодення.

Відповідно до цього залежно від опорної точки (світила) на небесній сфері розрізняють *зоряний* і *сонячний* час: зоряний час (опорна точка – ТВРД); істинний сонячний час (опорна точка – центр видимого диска Сонця); середній сонячний час (опорна точка – середнє екваторіальне Сонце).

Зоряна доба – це час повного оберту Землі навколо своєї осі відносно ТВРД або деякої зірки. Іншими словами – це проміжок часу між двома послідовними однойменними кульмінаціями ТВРД на одному і тому ж географічному меридіані (меридіані спостерігача). Зоряна доба починаються в момент верхньої кульмінації ТВРД.

Зоряний час – це час, що відлічується від моменту верхньої кульмінації ТВРД до будь-якого іншого її положення та виражений у частинах зоряної доби.

Істинна сонячна доба – це час повного оберту Землі навколо своєї осі відносно центра істинного Сонця. По-іншому – це проміжок часу між двома послідовними однойменними кульмінаціями центра видимого Сонця на одному і тому ж меридіані. За початок істинної сонячної доби приймається момент нижньої кульмінації центра видимого диска Сонця (істинна північ). **Істинний сонячний час** – це час, що відлічується від моменту нижньої кульмінації істинного Сонця до будь-якого іншого його положення та виражається в частинах істинної сонячної доби – годинах, хвилинах, секундах і т.д. Оскільки Земля рухається навколо Сонця не по колу, а по еліпсу (тобто нерівномірно) і площина екватора Землі нахилена до площини екліптики, то істинна сонячна доба коливається протягом року в межах приблизно ± 15 хв. Це незручно, тому за одиницю виміру часу вводять середню сонячну (середньосонячну) добу.

Середньосонячна доба – це час повного оберту Землі відносно середнього екваторіального Сонця. Інше визначення – це проміжок часу між двома послідовними верхніми (або нижніми) 76 кульмінаціями середнього екваторіального Сонця на одному і тому ж меридіані. За початок середньосонячної доби приймають момент нижньої кульмінації середнього Сонця (середня північ). Середня північ і середній південь (полудень) збігаються із істинними чотири рази на рік: 15 квітня, 13 червня, 1 вересня та 25 грудня. В інші дні року середня північ і середній полудень наступають то трохи раніше, то трохи пізніше істинних, але це розходження не перевищує 16,5 хв. [4]

Все людство живе саме за **середньосонячним часом**. Тому для стислості, де це припустимо, будемо говорити просто про *сонячний* або *середній* час, про *сонячну* або *середню* добу. Дрібнішими одиницями виміру часу є години (год , h), хвилини (хв , m), секунди (с , s), мілісекунди (мс , ms) тощо. Тривалість середньосонячної доби (сд) у *сонячному* масштабі часу прийнята рівною $T_{\text{сд}} = 24\ h = 1440\ m = 86400\ s$. Тривалість зоряної доби (зд) менше сонячної і становить у *сонячному* масштабі часу $T_{\text{зд}} = 23\ h\ 56\ m\ 04\ s = 86164\ s$. Отже, різниця в тривалості середньосонячної і зоряної діб дорівнює $\delta T = T_{\text{сд}} - T_{\text{зд}} = 3\ m\ 56\ s = 236\ s$.

Коефіцієнт пропорційності між сонячним і зоряним масштабами часу розраховується як $q = T_{\text{сд}} / T_{\text{зд}} = 86400\ s / 86164\ s \approx 1,002738$. Цей коефіцієнт показує, у скільки разів тривалість сонячної одиниці часу (наприклад, секунди) більше тривалості зоряної одиниці. А це означає, що один і той же часовий інтервал містить зоряних одиниць більше, ніж сонячних. Отже, його слід застосовувати для перерахунків сонячних інтервалів часу в зоряні. Для зворотних перерахунків, тобто для перерахунків зоряних інтервалів часу в сонячні, слід користуватись коефіцієнтом $q = 1/q \approx 0,997269$.

Зоряний час є більш універсальним, ніж сонячний, для опису незалежних процесів у вселенських масштабах. З огляду на це його використовують в астрономії, в небесній механіці, в динаміці руху КА тощо. Однак він незручний для виміру часу у повсякденному житті людей, оскільки не узгоджується із чергуванням дня та ночі. Тому для опису процесів на Землі у практичній діяльності людства використовують сонячний час.

Основною одиницею рахунку часу, обумовленою рухом Землі навколо Сонця, є рік (річний рух Землі). Інакше кажучи, рік відповідає проміжку часу, протягом якого Сонце завершує повний круг по небесній сфері. При цьому залежно від опорної точки, відносно якої вимірюється цей проміжок, розрізняють зоряний (**сидеричний**), тропічний, аномалістичний, драконічний, місячний і календарний роки.

Зоряний рік – це час повного оберту Сонця по небесній сфері відносно однієї та тієї ж зірки. Він дорівнює $P_s = 365,25636\ \text{сд} = 366,25636\ \text{зд}$.

Тропічний рік – це час між двома послідовними проходженнями центра Сонця через ТВРД. Він дорівнює $P_{\text{тр}} = 365,2422\ \text{сд} = 366,2422\ \text{зд}$. Коефіцієнт q часто визначають, виходячи із тривалості тропічного року як $q = 366,2422 / 365,2422 \approx 1,002738$.

Тропічний рік лежить в основі сучасного календаря. Однак він містить не ціле число діб, що незручно для практики. Тому вводять поняття **календарного року**, який за григоріанським календарем містить 365 сд, а кожний четвертий (високосний) – 366 сд. Календарний **григоріанський** рік (новий стиль) починається раніше **юліанського** (старий стиль) на 13 діб (1 січня та 14 січня відповідно). Тривалість григоріанського року складає $P_{\text{гр}} = 365,2425\ \text{сд} = 366,2425\ \text{зд}$, а тривалість юліанського року – $P_{\text{ю}} = 365,2500\ \text{сд} = 366,2500\ \text{зд}$. Дробовими одиницями календарного року можуть виступати півріччя (1/2 року), квартал (1/4 року), місяць (1/12 року), тиждень (7 діб або приблизно 1/52 року) та ін.

Ефемеридний час $t_{\text{эф}}$ використовується в астрономії при розрахунках положення небесних тіл і прогнозуванні їхнього руху (обчисленні ефемерид). Зокрема, саме ефемеридний час входить у диференціальні рівняння небесної механіки, механіки космічних польотів тощо. Цей час на відміну від зоряного і сонячного тече винятково рівномірно. Він визначається на основі руху Місяця та планет. Основною одиницею ефемеридного часу є **ефемеридна секунда**, яка дорівнює середньосонячній секундні за 1900 тропічний рік, що налічував $P_{\text{тр } 1900} = 365,2421988 \text{сд} = 31556\,925,9747 \text{с}$.

Атомний час – це еталонний час, відлічуваний за допомогою високоточних атомних цезієвих годинників, прийнятий всіма країнами світу для повсякденного використання з 1 січня 1972 р. Він не зв'язаний безпосередньо ні з обертанням Землі, ні з її рухом навколо Сонця. За домовленістю відхилення атомного часу від ефемеридного не повинне перевищувати $\Delta t \leq 0,7 \text{с}$ за рік. Помилка ходу сучасних атомних годинників становить усього $\delta t = 1 \text{с}$ за 10000...100000 років.

Під системою **земного часу** розуміють сукупність тих категорій часу, які пов'язані з добовим обертанням і річним рухом Землі і якими користується людство на всій земній кулі. При цьому визначальними поняттями служать географічний меридіан і годинний круг світила (Сонця, зірки) або годинний круг ТВРД. Той меридіан, де розташовані об'єкти, наземні пункти, точки спостереження, які цікавлять, називають *меридіаном спостерігача*. *Годинний круг* світила (або ТВРД) – це великий круг небесної сфери, що проходить через полюси світу та зображення світила (або ТВРД). Отже, двограний кут між площинами географічного меридіана та годинного круга світила, названий *годинним кутом*, може служити мірою часу.

Місцевий час – це зоряний t_s або сонячний t_m час на даному географічному меридіані. Точки, які лежать на одному і тому ж меридіані, в один і той же момент мають однаковий місцевий час.

Світовий або всесвітній час t_0 – це місцевий *сонячний* час Гринвіцького (нульового) меридіана. З урахуванням всесвітнього часу місцевий сонячний час на меридіані спостерігача визначається за формулою

$$t_m = t_0 + \lambda_{\text{т}}^{\text{h}},$$

де $\lambda_{\text{т}}^{\text{h}} = \lambda_{\text{т}} / \omega_3$ – географічна довгота меридіана спостерігача в годинній мірі (годинний кут);

$\lambda_{\text{т}}$ – географічна довгота меридіана спостерігача в градусах;

$\omega_3 \approx (360^\circ + 1^\circ) / T_{\text{сд}} \approx 360^\circ / T_{\text{зд}} \approx 15 \text{ град/год}$ – кутова швидкість обертання Землі.

Місцевий час строго відповідає кутовому положенню будь-якого пункту на Землі відносно годинного круга Сонця (зірки). Інакше кажучи, на будь-якій широті кожна точка із їхньої незліченної множини має свій місцевий час.

У повсякденному житті вдаються до «загрубління» шкали часу, виходячи, наприклад, із принципу «на всій території адміністративного утворення однаковий час». Для цього використовують поняття годинного пояса та поясного часу.

Годинні пояси – це 24 ділянки земної поверхні (рис. 1.5) уздовж меридіанів, ширина яких теоретично дорівнює $\Delta\lambda = 360^\circ / 24 = 15^\circ$. На практиці границі годинних поясів для зручності «прив'язують» до адміністративних границь регіонів, установлюють уздовж рік і т.п. Для всіх пунктів у межах одного пояса в кожний момент прийнято однаковий (поясний) час, а в сусідніх поясах час відрізняється рівно на одну годину. Меридіани, які проходять по середині годинних поясів, називаються *основними меридіанами* цих поясів. Ці меридіани знаходяться на відстані один від іншого по довготі точно на величину $\Delta\lambda = 15^\circ$.

З урахуванням цього **поясний час** t_n наземного пункту – це місцевий середньосонячний час **основного** географічного меридіана того годинного пояса, в якому розташований даний пункт

$$t_n = t_0 + \mathcal{C}_*,$$

де $\mathcal{C}_* = 0...23$ – номер годинного пояса.

Розходження поясного часу двох пунктів дорівнює різниці номерів їхніх часових поясів:

$$\Delta t_n = t_{n2} - t_{n1} = \mathcal{C}_2 - \mathcal{C}_1,$$

де t_{ni} та $\mathcal{C}_i$, $i=0, 1, 2 \dots$ – поясний час і номер i -го часового пояса.

Наприклад, Україна займає по довготі весь *другий* годинний пояс $\mathcal{C}_2 = 2$, а Київ перебуває приблизно в центрі цього пояса. Тому поясний **київський час** t_k завжди більше всесвітнього на 2^h (схід Сонця для України починається раніше, ніж для Великобританії), тобто $t_k = t_0 + \mathcal{C}_2 = t_0 + 2 h$.

У весняно-літньо-осінній період у багатьох країнах, у тому числі і в Україні, з метою більш раціонального використання світлої пори доби застосовують поясний (наприклад, київський) *літній* час. Цей час вводиться на всій території України в останню неділю березня, а відміняється в останню неділю жовтня кожного року. При цьому київський **літній час** $t_{кл}$ зміщений *уперед на одну годину* відносно «звичайного» київського, тобто $t_{кл} = t_k + 1 h$.

Крім розглянутих понять у соціальних, біологічних, людино-машинних (ергатичних), технічних та інших системах можуть використовуватися поняття **системного** та **машинного** часу, пов'язаного з етапами або режимами їхнього функціонування. **Польотний час** – це час польоту КА, що відлічується від деякого характерного моменту, наприклад, від моменту старту РН при виводі КА на орбіту. **Орбітальний час** – це час, що характеризує положення КА на даному витку орбіти. Наприклад, якщо за початок витка орбіти прийняти точку перигею, то і відлік орбітального часу зручно вести від цієї точки, тобто від початку витка. **Бортовий час** – це час, що відлічується від характерних подій або етапів на борту КА, наприклад, від початку спостереження за земною поверхнею, після закінчення етапу корекції орбіти і т.п. Рахунок цього часу ведеться в бортовому комп'ютері або в іншому програмно-часовому пристрої. Як правило, для повного просторово-часового опису руху КА бортовий час «прив'язують» до польотного або орбітального, а також до земного, наприклад, до київського.

Матеріал цього підрозділу цілком узятий з [4]. В цьому навчальному посібнику питання розрахунків і перерахунків часу в різних системах відліку розглянуті більш детально з практичними розрахунковими прикладами. Такі розрахунки є практично необхідними не тільки для фахівців з управління КА та космічного зв'язку, але і спеціалістам телекомунікаційних систем та систем спостереження, де є системи глобальної навігації та синхронізації.

1.2.4 Основні принципи та особливості орбітального руху космічних апаратів спостереження

Теорія орбітального руху космічних апаратів – це наука яка займається вивченням руху КА на всіх ділянках його траєкторії.

Після виведення КА на орбіту (на пасивній ділянці руху КА) на нього діють сила тяжіння Землі, Сонця, Місяця, планет, сила обумовлена тиском сонячних променів і сила опору атмосфери.

Якщо з усіх названих сил враховувати тільки центральну силу гравітаційного притягання Землі, а КА розглядати як точку, в якій зосереджена вся маса КА, то рух КА навколо Землі буде називатися **незбуреним або Кеплерівським**. Незбурений рух - це ідеалізований рух КА. За допомогою нього досить просто описати рух КА, а потім врахувати при необхідності фактори, що збурюють, діючі на цей рух. За умовами **незбуреного** руху Земля розглядається як тіло правильної сферичної форми, з радіусом $R_z = 6371,131$ і з заданою щільністю розподілу маси (або середньою щільністю $5,52$ т/см кубічний). При врахуванні впливу всіх сил діючих на КА, рух будемо називати **збуреним**.

При описі незбуреного руху КА важливу роль грають рівняння руху КА, які створені на базі **законів Кеплера**. Для розуміння основних принципів та особливостей незбуреного орбітального руху фізичних тіл, які взаємодіють як маси потрібно розглянути та з'ясувати механічні закони руху таких тіл. Основні три закони такого руху сформульовані німецьким астрономом Йоганом Кеплером як закони руху небесних тіл.

Перший закон Кеплера. Незбурена **орбіта** КА є крива другого порядку (*конічний перетин*), один з фокусів якого знаходиться в центрі сили притягання (Землі) і головна фокальна вісь збігається з вектором Лапласа.

Точки перетинання фокальної осі з орбітою називають **апсидами**, а сама вісь – **лінія апсид** (рис. 1.13)

Якщо розглядати рух КА в полярних координатах (див. рис.1.5) то можна описати рух КА в наступному виді:

$$r = \frac{p}{1 + e \cos(\nu)}, \quad 1.1$$

де p – **фокальний параметр** орбіти

$$p = \frac{b^2}{a}, \quad 1.2$$

a – велика та b – мала піввісь еліпсу,

e – **ексцентриситет** орбіти

$$e = \frac{\sqrt{a^2 - b^2}}{a}, \quad 1.3$$

ν – **істинна аномалія** – кут між напрямком з центра Землі в точку перигею і **радіусом-вектором** КА r , відлічуваним за напрямком руху КА.

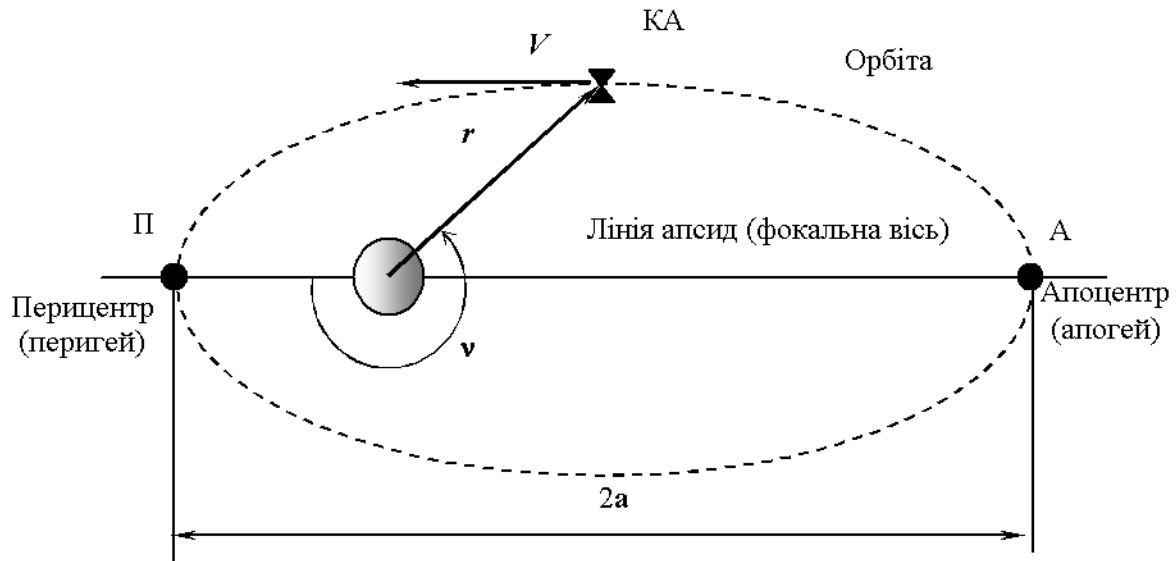


Рис. 1.13 – Орбіта КА (еліпс)

Ексцентриситет e визначає форму орбіти. За умови $0 < e < 1$ – формою є еліпс, за $e = 0$ – коло, за $e = 1$ – парабола, коли $e > 1$ – гіпербола.

Лінійна швидкість V – векторна величина, що завжди спрямована по дотичній до орбіти у точці знаходження КА (див. рис. 1.5).

За початкову швидкість руху

$$V_0 = \sqrt{\mu_0 \left(\frac{2}{r} - \frac{1}{a} \right)} \quad 1.4$$

відбувається рух *по еліпсу*. В формулі 1.4 $\mu_0 = G \cdot M_3$, де G – гравітаційна стала ($6,67259 \cdot 10^{-11} \text{ м}^3 \text{ кг}^{-1} \text{ с}^{-2}$), M_3 – маса Землі.

За початкову швидкість руху

$$V_0 = \sqrt{\frac{\mu_0}{r}} = \text{const} \quad 1.5$$

відбувається рух *по колу*, а швидкість називають коловою. Колова швидкість у поверхні космічного тіла називається **першою космічною швидкістю**, щодо цього космічного тіла. Для навколосемних орбіт перша космічна швидкість залежить від висоти польоту КА над Землею H . Для нульової висоти над поверхнею Землі $V_{I_3} = \sqrt{\frac{\mu_0}{R_3}} \approx 7,91 \text{ км/с}$. Із наведених виразів випливає, що зі збільшенням висоти КА його лінійна швидкість падає і навпаки.

За початкову швидкість руху

$$V_0 = \sqrt{\frac{2\mu_0}{r}} \quad 1.6$$

відбувається рух *по параболі*, а швидкість називають параболічною. Таку швидкість біля поверхні космічного тіла називають **другою космічною**

швидкістю або швидкістю відходу (звільнення). Для поверхні Землі

$$V_{\text{шз}} = \sqrt{2\mu_0/R_3} \approx 11,2 \text{ км/с}.$$

При початковій швидкості руху КА більшої за другу космічну швидкість рух КА буде відбуватися *по гіперболі*.

$$V_0 = \sqrt{\mu_0 \left(\frac{2}{r} + \frac{1}{a} \right)}, \text{ при } a < 0. \quad 1.7$$

По гіперболічній орбіті рухаються КА, які виводяться за межі Сонячної системи.

Третьою космічною швидкістю називають швидкість рівну $16,67 \text{ км/с}$, яку потрібно надати КА в напрямку власної орбітальної *геліоцентричної швидкості* Землі ($V_3 = 29,9 \text{ км/с}$) для одержання швидкості відходу із Сонячної Системи.

Другий закон Кеплера. Радіус-вектор КА за рівні проміжки часу окреслює рівновеликі площі (рис.1.14).

Другий закон Кеплера кількісно визначає зміну швидкості руху планети орбітою. Лінійна швидкість руху КА неоднакова в різних точках його орбіти: що ближче КА до Землі, то більша його швидкість. Швидкість руху КА у перигеї найбільша, а в апогеї — найменша. Площа, яку окреслює радіус-вектор за певний проміжок часу, не залежить від того, в якій частині орбіти перебуває КА.

Третій закон Кеплера. Квадрати зоряних (сидеричних) періодів обертання двох різних КА відносяться, як куби великих півосей їхніх орбіт.

$$\frac{T_1^2(M + m_1)}{T_2^2(M + m_2)} = \frac{a_1^3}{a_2^3}, \quad 1.8$$

де M, m_1, m_2 — маси центральної (Земля) і рухомих (КА1, КА2) точок;

T_1, T_2 — зоряні (сидеричні) періоди обертання першого і другого КА стосовно нерухомого спостерігача в інерційній системі координат.

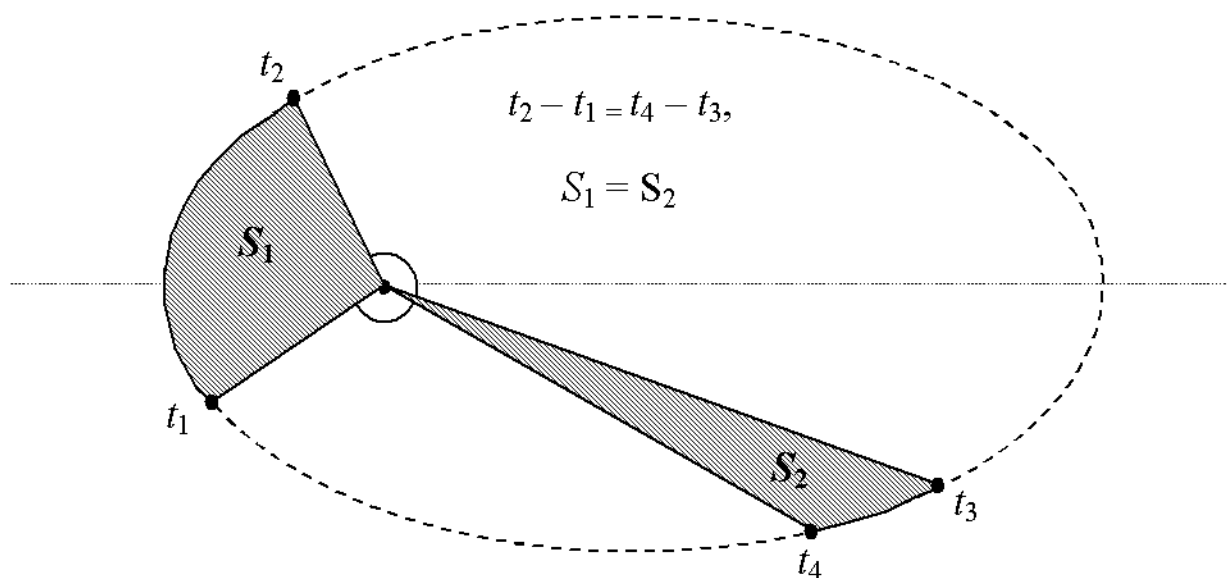


Рис. 1.14 – Площі S_1, S_2 в площині орбіти, що описує радіус-вектор на КА за рівні проміжки часу

Сидеричний період - це час між двома послідовними проходженнями КА однієї і тієї ж точки орбіти (наприклад перигею). Якщо центральне тіло (Земля) саме обертається, тоді час між послідовними проходженнями КА через той самий меридіан, називається **синодичним періодом обертання**. Величина сидеричного або зоряного періоду обертання КА на земній орбіті

$$T_{зв} = 2\pi \sqrt{a^3 / \mu_0} \quad 1.9$$

У механіці орбітального руху задачею двох тіл називають визначення параметрів руху КА в гравітаційному полі центрального тіла (Землі). Для опису цього руху в геодезичній системі координат досить знати шість параметрів: координати X, Y, Z і складові швидкості по осях системи координат V_x, V_y, V_z . Але, незбурений кеплерівський рух простіше описується рівнянням за допомогою спеціально обраних величин, названих **елементами орбіти**. Для замкнутих орбіт КА ці елементи називають також **еліптичними** або **Кеплерівськими елементами орбіти**.

Основними елементами орбіти є наступні (рис. 1.15).

Ω – **довгота висхідного вузла** – кут, розташований в екваторіальній площині і відлічуваний від напрямку на точку весняного рівнодення до лінії перетину площини орбіти з площиною екватора (лінії вузлів). *Висхідним вузлом* називають точку, у якій КА переходить з південної півкулі в північну; протилежна точка називається *спадним вузлом*.

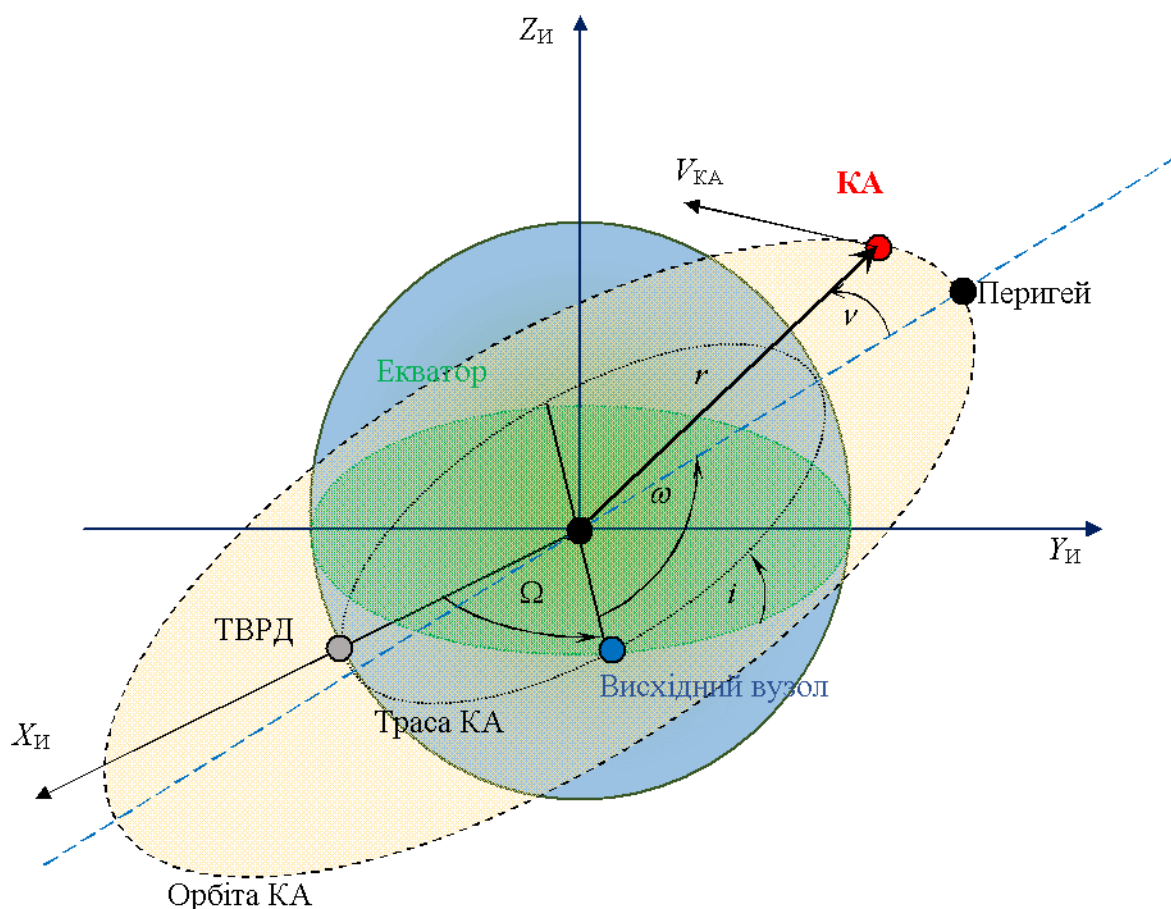


Рис. 1.15 – Кутові Кеплерівські елементи орбіти

i – **нахилення орбіти** – двогранний кут між площиною орбіти і площиною екватора, відлічуваний від площини екватора проти ходу годинникової стрілки для спостерігача висхідного вузла, що знаходиться в точці.

ω – **аргумент перигею** – кутова відстань перигею від напрямку на висхідний вузол, відлічувана в площині орбіти по напрямку руху.

a – **велика піввісь орбіти** (рис. 1.16); $a = 0,5 \cdot (r_A + r_{\Pi})$ – середня відстань КА від центру Землі, що характеризує розміри орбіти.

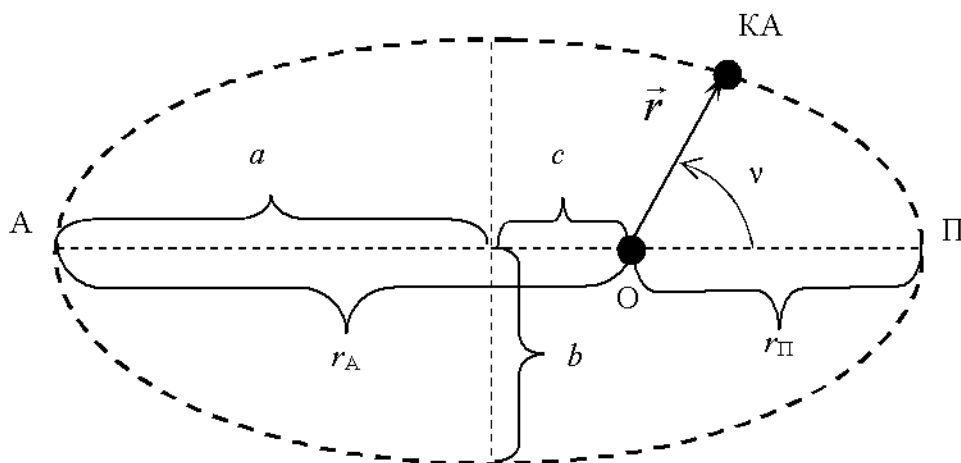


Рис. 1.16 – Кеплерівські елементи орбіти

e – **ексцентриситет орбіти**, $e = c/a = \sqrt{a^2 - b^2}/a$ – (відношення фокусної відстані (між центром орбіти O' і її фокусом O) до величини великої півосі). Характеризує форму орбіти.

τ – **час проходження КА через перигей**. Характеризує поточне положення КА на орбіті.

Іноді використовують допоміжні елементи орбіти: замість a й e використовують радіуси перигею й апогею.

Таким чином, якщо задано **вектор елементів орбіти** $[a, e, i, \omega, \Omega, \tau]$, то можна говорити, що ми знаємо положення КА в будь-який момент часу t .

При розгляді рівняння орбіти КА ми класифікували орбіти за значенням ексцентриситету. Тепер можемо провести більш детальну **класифікацію орбіт**, зокрема по нахиленню та сидеричному періодові обертання КА.

По нахиленню орбіти поділяються на: прямі – $0^\circ < i < 90^\circ$, зворотні – $90^\circ < i < 180^\circ$, екваторіальні – $i = 0^\circ$ та $i = 180^\circ$, полярні – $i = 90^\circ$.

У залежності від величини **сидеричного періоду обертання**: добові – $T = T_3$ синхронні – $T = T_3 / k$, $k = 1, 2, 3, \dots$, несинхронні – $T \neq T_3 / k$, стаціонарні – $T = T_3$, $i = 0$, $e = 0$, хитні – $T = T_3$, $i = 0$, $e \neq 0$, ізомаршрутні – щодоби проходять по одній і тій же трасі, квазіізомаршрутні – через n діб проходять по одній і тій же трасі.

Для наочного опису руху КА корисно використовувати поняття траси КА та під супутникової точки (рис. 1.17).

Підсупутникова точка (ПТ) – це точка на земній поверхні, з якої КА в даний момент видний у зеніті. Якщо прийняти, що Земля – куля, то підсупутникова точка – це точка перетинання радіуса-вектора КА зі сферичною поверхнею Землі (рис. 1.17).

Траса КА – геометричне місце підсупутникових точок або проєкція орбіти КА на поверхню обертової Землі, із указівкою часу проходження окремих пунктів(рис. 1.17).

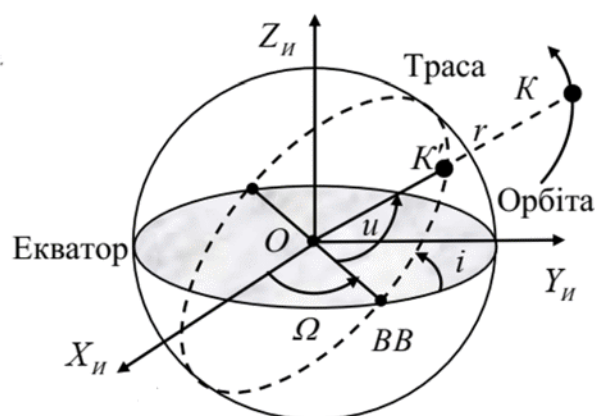


Рис. 1.17 – Підсупутникова точка та траса КА

Для КА спостереження у видимому діапазоні випромінювань вкрай важливими є **сонячно-синхронні орбіти** (ССО). Сонячно-синхронними називають орбіти, площини яких збігаються з напрямком вектора Земля-Сонце або складають постійний кут (рис. 1.18).

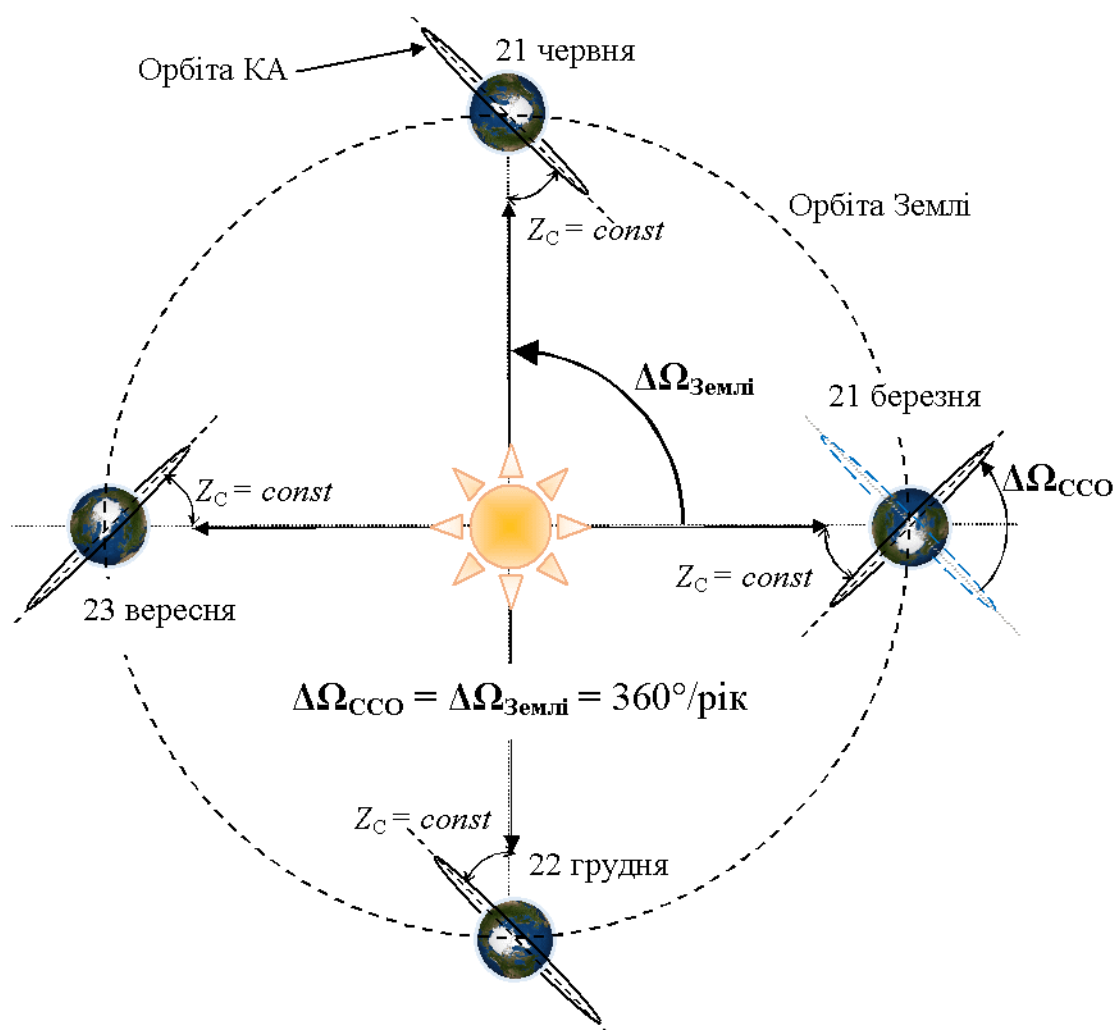


Рис. 1.18 – Підтримання сонячно-синхронної орбіти

З часом положення Землі щодо Сонця постійно змінюється, отже, площина орбіти теж повинна змінювати своє положення в інерціальному просторі, щоб забезпечити незмінне положення площини орбіти щодо Сонця. Поворот площини орбіти здійснюється за рахунок прецесії довготи висхідного вузла орбіти. Поскілки за рік Земля змінює своє положення щодо Сонця на 360° , то і прецесія орбіти за рік повинна дорівнювати 360° (за добу $0,9856^\circ$).

Прецесія довготи висхідного вузла $\Delta\Omega_{ССО}$ повинна бути позитивною, отже нахилення сонячно-синхронних орбіт повинне бути в межах $90^\circ < i < 180^\circ$. Наприклад, для кругових орбіт при висоті над поверхнею Землі 300 км для одержання ССО необхідно забезпечити нахилення 99° , а при висоті 3000 км нахилення 113° . Необхідні умови освітленості забезпечуються вибором моменту запуску супутника, яким і визначається положення його площини орбіти щодо напрямку на Сонце.

ССО цікаві тим, що умови освітленості підсупутникової точки на поверхні Землі залишаються незмінними в протязом тривалого періоду часу. У цю точку через добове обертання Землі попадають різні ділянки Земної поверхні, але картина зміни висоти Сонця над ними повторюється від оберту до оберту. Для спостереження цікаві в більшому ступені кругові ССО, що забезпечують постійний масштаб зображення в одному маршруті.

Геостаціонарна орбіта (ГСО) – в ідеальному випадку це кругова, **екваторіальна орбіта**, рухаючись по якій КА незмінно знаходиться над одною і тією ж точкою поверхні Землі. Середній рух n КА дорівнює при цьому кутовій швидкості обертання Землі. Ексцентриситет і нахилення такої орбіти дорівнюють нулеві.

Для Землі радіус стаціонарної орбіти складає 42160 км (від поверхні Землі 35780 км), а швидкість КА на ГСО складає 3075 м/с (рис. 1.19).

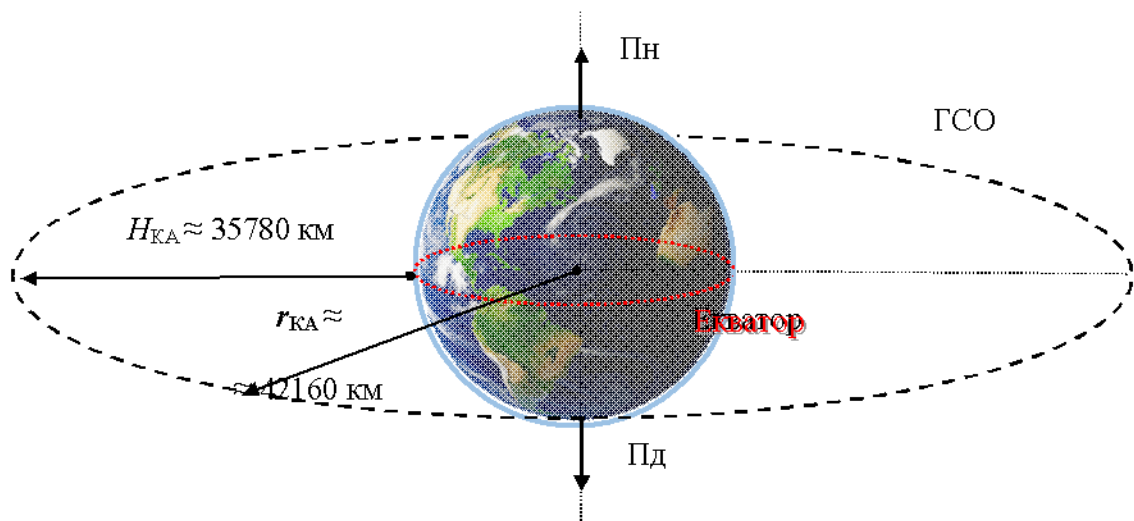


Рис. 1.19 – Геостаціонарна орбіта

У реальних умовах ідеальних стаціонарних орбіт не існує. На рух геостаціонарного КА впливають різні фактори: не центральність гравітаційного поля Землі, притягання Сонця, Місяця й інших планет, тиск сонячного світла. Усі ці

фактори викликають повільну зміну середнього руху. Тому підсупутникова точка геостационарного КА так само буде повільно змінювати своє положення в часі.

1.2.5 Моделювання руху космічних апаратів спостереження

Моделювання руху космічних апаратів спостереження передбачає розрахунок положення його положення в просторі на заданий момент часу t . Положення КА в просторі найбільш наглядно задається координатами його підсупутникової точки (зазвичай геодезичними довготою L та широтою B) та висотою КА $H_{КА}$ над поверхнею математичної моделі Землі.

Множиною ПТ на заданому інтервалі часу є траса КА. Траса відображає слід супутника на Землі, а її форма і положення на земній поверхні однозначно залежать від елементів орбіти та параметрів орбітального руху КА.

За допомогою траси можна оцінювати якість виконання завдання КА спостереження, а саме:

- можливість спостереження за наземним об'єктом із КА;
- необхідний поворот напрямку зору знімальної апаратури для спостереження за наземним об'єктом поза трасою;
- сталість траси КА протягом тривалого часу;
- функціональні можливості КА тощо.

На рисунку 1.20 показано вікно програми моделювання руху КА з відображенням траси типового КА спостереження, який рухається по ССО за час одного оберту (жовта лінія). Карта Землі відображена у проєкції *Universal Transverse Mercator (UTM)*.

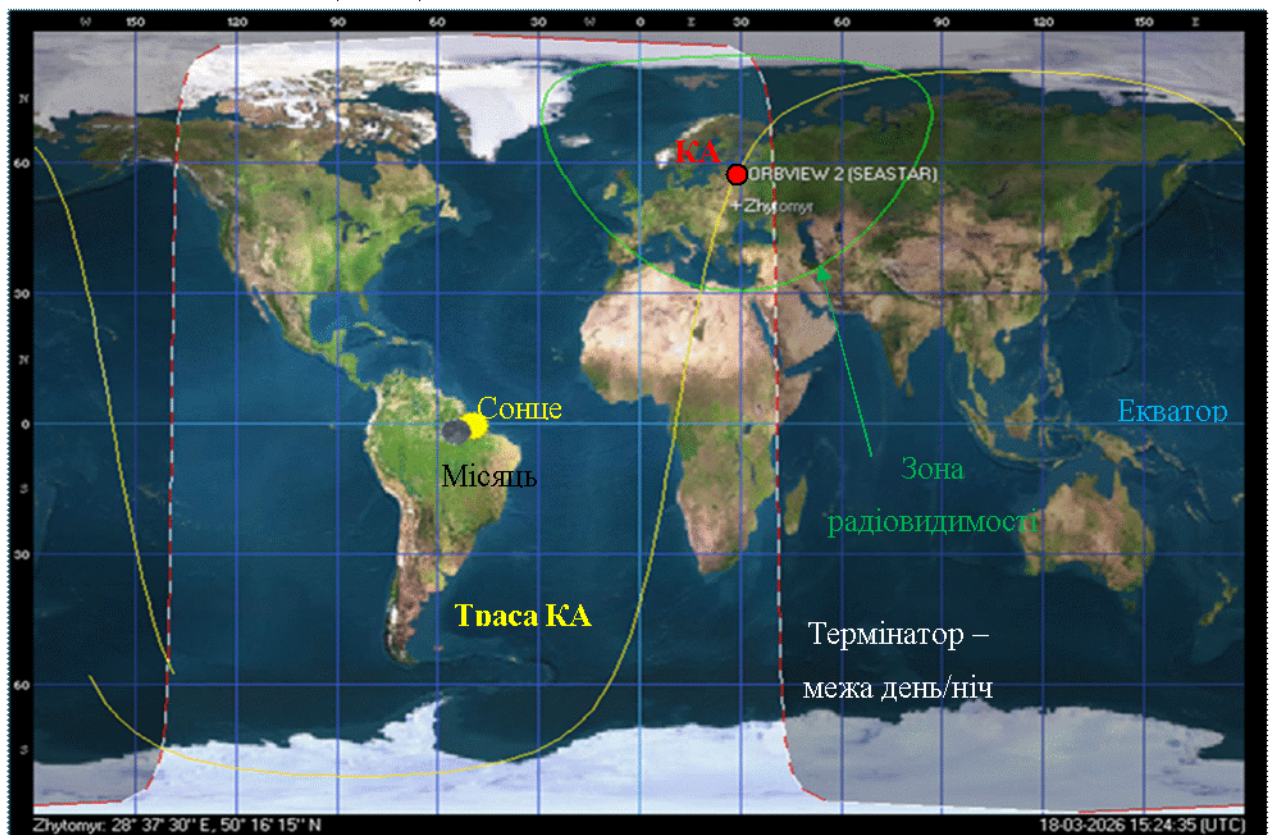


Рис. 1.20 – Вікно програми моделювання руху КА з відображенням траси типового КА спостереження

Початковими даними для побудови траси КА є елементи орбіти КА – вектор $(a, e, I, \omega, \Omega, \tau)$; початковий момент часу побудови траси КА t_0 ; та крок дискретизації розрахунків моделі за часом Δt .

Необхідно знайти геодезичні координати L – довготу та B – широту множини ПТ, що розраховані для дискретних моментів часу $t_i = t_0 + i \cdot \Delta t, i = 1, 2, 3, \dots$

Елементи орбіти КА можуть бути отримані з спеціальних **центрів спостереження за космічними об'єктами**. Замість вектора елементів орбіти КА на практиці частіше використовують інші набори даних, які також характеризують параметри орбіти і параметри руху КА. Одним із таких наборів можуть бути розповсюджені у міжнародній практиці так звані **TLE-файли** (*Two-Line Element set* – дворядкові елементи), які для більшості КА, зареєстрованих у каталозі *NORAD/NASA*, можна знайти за адресою:

<http://celestrac.com/NORAD/documentation/tle-fmy.htm>

Всі дані для формування TLE-файлів вимірюються і фіксуються на момент проходження КА через висхідний вузол орбіти $t_{\text{ВВ}}$. Вони періодично оновлюються в мережі Інтернет для більшості КА з каталогу *NORAD/NASA*.

Це текстові файли з записами, які мають такий вигляд:

SICH 2

1 37794U 11044G 11232.77359185 -.00000048 00000-0 00000+0 0 155

2 794 98.2589 306.2805 0011939 276.5058 83.4778 14.59815940 501

NOAA 17

1 27453U 02032A 08013.48217830 .00000178 00000-0 96164-4 0 7593

2 27453 98.5565 83.4817 0011682 197.1161 163.9628 14.23941486288649

NIGERIASAT 2

1 37789U 11044B 11232.78612574 -.00000046 00000-0 00000+0 0 174

2 37789 98.2570 306.2645 0024799 203.2950 156.7115 14.54544012 506.

Для кожного КА, назва якого починає блок даних, даються два рядки цифрових наборів параметрів орбіти цього КА. Кожен рядок починається з його номеру 1 або 2. Далі записуються параметри орбіти, які за бажанням можна перерахувати в кеплерові елементи орбіти. Натомість більшість програм моделювання руху КА добре сприймає саме цій формат подання.

Для проведення безпосередньо моделювання доцільно використовувати одну з програм моделювання руху КА, яких є безліч в Інтернеті. Для професійного використання можна рекомендувати потужний моделюючий комплекс *Systems Tool Kit* (часто називаний *Satellite Tool Kit*, або скорочено *STK*) від *Analytical Graphics, Inc.* Він дозволяє проводити складний аналіз наземних, морських, повітряних і космічних об'єктів у одному інтегрованому середовищі. В основі STK лежить геометричний рушій для визначення часово-динамічного положення та стану об'єктів, а також просторових взаємозв'язків між об'єктами. STK наразі використовується аерокосмічній та оборонній сферах, а також для багатьох інших застосувань. Комплекс є комерційним, тому для первинного навчання моделюванню динаміки орбітального руху варто користуватися набагато простішими безкоштовними програмами моделювання руху КА.

Прикладом такої простої програми є *Orbitron – Satellite Tracking System* © 2001-2005 by Sebastian Stoff (скорочено *Orbitron*). Програму можна отримати на Інтернет сайті за адресою <https://www.stoff.pl/>. Вона доступна багатьма мовами, у тому числі українською. Програма є безкоштовною, і вважається однією з найпростіших для користувачів при достатній функціональності.

Orbitron – це комплексна програма для розрахунку поточного положення КА, як для візуальних спостережень за супутниками, так і для радіозв'язку з (або за допомогою) КА. Програма показує положення КА на будь-який заданий час (як в реальному часі, так і в режимі симуляції). Поточні параметри орбіт потрібних КА завантажуються з каталогу *NORAD*. Програма має інтерфейс взаємодій з пристроями наведення антени радіостанції на відслідковуваний КА (антенними трекерами).

Після запуску програма попросить завантажити нові набори *TLE*-параметрів. Після погодження мають бути завантажені кілька текстових файлів з *TLE*-параметрами з Центру контролю космічного простору США *NORAD*. По завершенні завантаження файлів на дисплеї має бути вікно інтерфейсу програми (рис. 1.21).

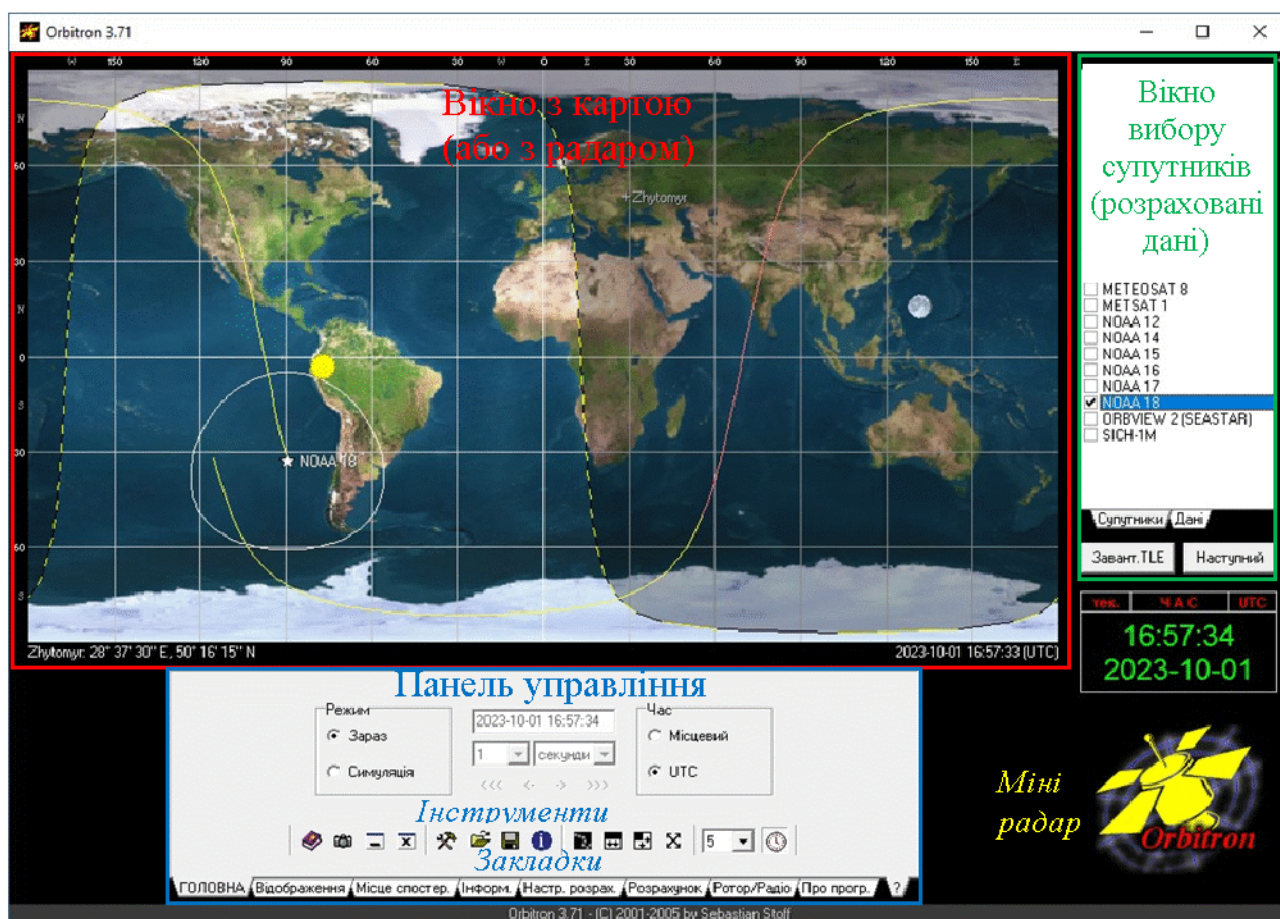


Рис. 1.21 – Вікно інтерфейсу програми *Orbitron*

Робота починається з налаштування програми. Налаштування проводяться за допомогою органів управління на закладках панелі управління. Потрібно налаштувати мову інтерфейсу, вибрати формат відображення координат та часу, встановити потрібний годинний пояс для врахування місцевого часу,

вибрати наземний пункт (НП) спостереження (пункт зв'язку) або задати їх координати та вибрати режим роботи (за поточним часом або симуляція).

Далі у вікні вибору супутників вибрати потрібний набір КА (кнопка «Завантаження *TLE*») та конкретний КА для супроводження. На закладці «Дані» можна передивитися дані щодо поточного або симульованого положення Сонця, Місяця та вибраного КА (рис. 1. 22).

Для безпосереднього моделювання можна використати режим «Симуляція». У такому разі управління часом здійснюється кнопками управління часом та вікном дати та часу на Панелі управління. Кнопки «<» та «>» пересувають час назад та уперед на заданий інтервал Δt . Кнопки «<<<» та «>>>» пересувають час назад та уперед автоматично через заданий інтервал Δt . Положення вибраного та активних КА, Сонця і Місяця на встановлений час будуть відображені на карті.

Якщо на Панелі управління вибрати режим «Зараз», буде розраховане та відображене положення КА, Сонця і Місяця для поточного моменту часу, який береться з годинника комп'ютера. Саме тому для цього режиму вкрай потрібна автоматична синхронізація годинника з серверів часу в Інтернеті. Положення вибраного та активних КА, Сонця і Місяця на поточний час будуть відображені на карті.

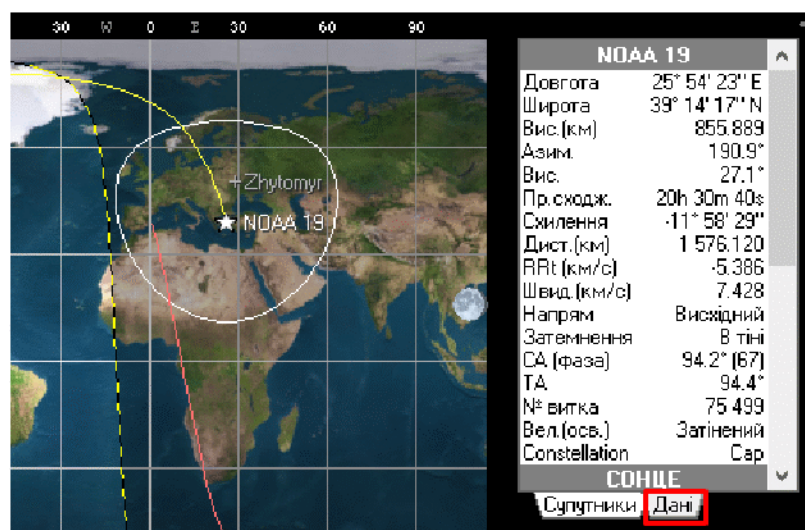
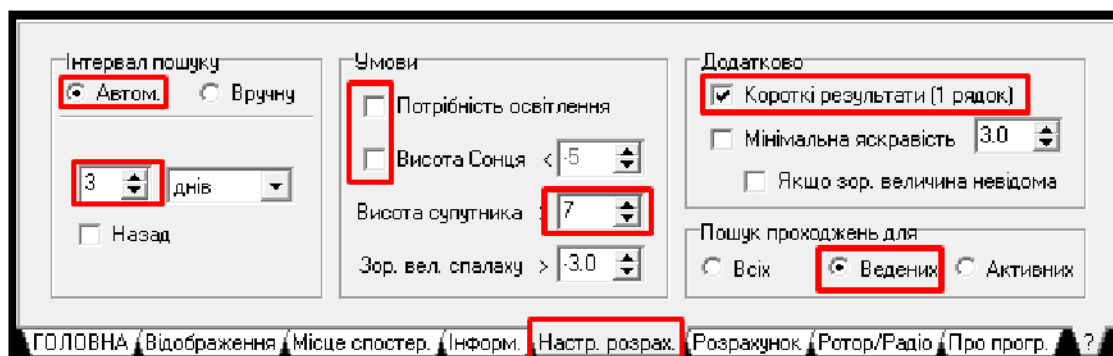


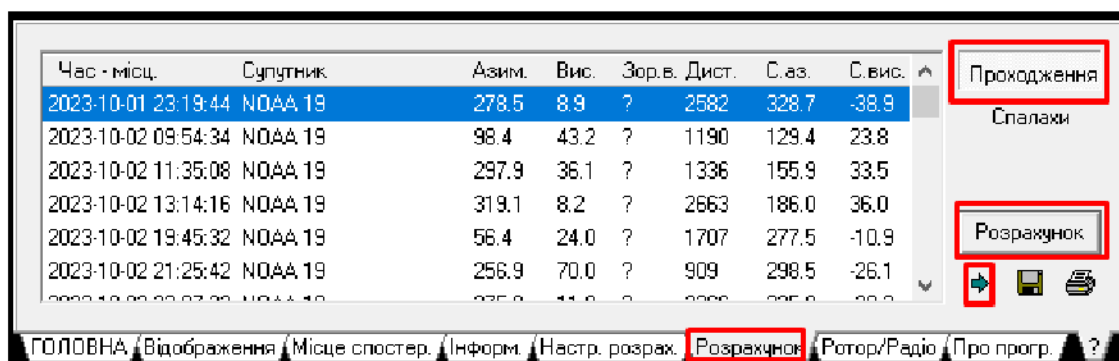
Рис. 1.22 – Дані щодо поточного або симульованого положення Сонця, Місяця та вибраного КА

Розрахувати прогнозовані моменти візуального або радіоконтакту «КА - НП спостереження» на заданий інтервал часу можна в автоматичному режимі. Для цього потрібно скористатись закладками Налаштування розрахунку та Розрахунок на панелі закладок у Вікні Управління (рис. 1.23 а, б).

У вікні Налаштування розрахунку (рис. 1.23 а) потрібно задати тривалість інтервалу пошуку контакту, визначити чи важливе освітлення КА та мінімальну висоту Сонця, задати мінімальний кут місця (висоту над обрієм) КА та задати групу КА (усі, тільки ведені, чи тільки активні). У вікні Розрахунок (рис. 1.23 б) вибрати категорію Проходження і натиснути кнопку Розрахунок. Розраховані результати можливих контактів і їх параметри будуть виведені у вікні Розрахунок.



а)



б)

Рис. 1.23 – Вікна закладок Настройки розрахунку (а) та Розрахунок (б) у Вікні управління

Їх можна зберегти у файлі, чи надрукувати. Якщо натиснути кнопку Перехід до вибраної події ➡. На карті відобразиться ситуація на вибраний зі списку час.

1.3 Фізичні основи та апаратура отримання даних космічного спостереження

1.3.1 Особливості отримання знімків земної поверхні з космічних апаратів

На космічному знімку можна одержати зображення досить великої ділянки місцевості, залежно від поставленої мети – від десятків до сотень квадратних кілометрів. Це дозволяє докладно й точно визначати положення та поточний стан елементів місцевості, рельєфу й об'єктів на значній території. Повторне знімання однієї й тієї ж місцевості дозволяє стежити за всіма змінами, що відбуваються.

Космічні засоби спостереження успішно комплексуються з авіаційними засобами. Це дозволяє додати переваги космічного й повітряного спостереження й взаємно компенсувати їхні недоліки. Космічне спостереження має перевагу екстериторіальності: космічний апарат може знімати будь-яку територією Землі. В той же час, літак або БПЛА може знімати об'єкт розвідки в потрібний час і з короткими інтервалами часу, що дозволяє спостерігати швидкоплинні процеси. На космічному знімку може поміститися місто середньої величини разом із передмістями, а детальність зробленого з висоти БПЛА знімка дозволяє розпізнати дуже дрібні деталі об'єкта. Комплексне використання космічних і авіаційних засобів спостереження дозволяє одержати найбільш повну й достовірну інформацію.

У залежності від завдань спостереження, знімання може проводитися як у різних спектральних діапазонах випромінювань, так і різними типами приймачів. **Оптико-електронне** знімання забезпечує найкращу просторову розрізненість знімків, дозволяє розрізнити об'єкти на знімках за їх температурою та матеріалом поверхні. Отримання знімків земної поверхні за допомогою **радіолокаційних станцій бокового огляду (РЛС БО)** надає можливість в будь-який час доби виявляти та досліджувати об'єкти, що закриті поверху непрозорим, але і не електропровідним матеріалом (листя дерев, сухий пісок тощо) та оцінювати вологість поверхонь.

Результатами космічного та повітряного спостереження є **корисна інформація** про поверхню Землі та розташовані на ній об'єкти, яка вилучається тематичною обробкою зі повітряних і космічних **знімків**, які, в свою чергу, є результатами первинного оброблення **даних знімання**. Для отримання кінцевого результату спостереження створюються спеціальні комплекси космічного або повітряного спостереження. Такі комплекси містять систему взаємодіючих систем, що відповідають за виконання певних етапів та функцій процесу створення результатів спостереження.

Типовий **комплекс космічного спостереження** має наступні складові (рис. 1.24). [7]

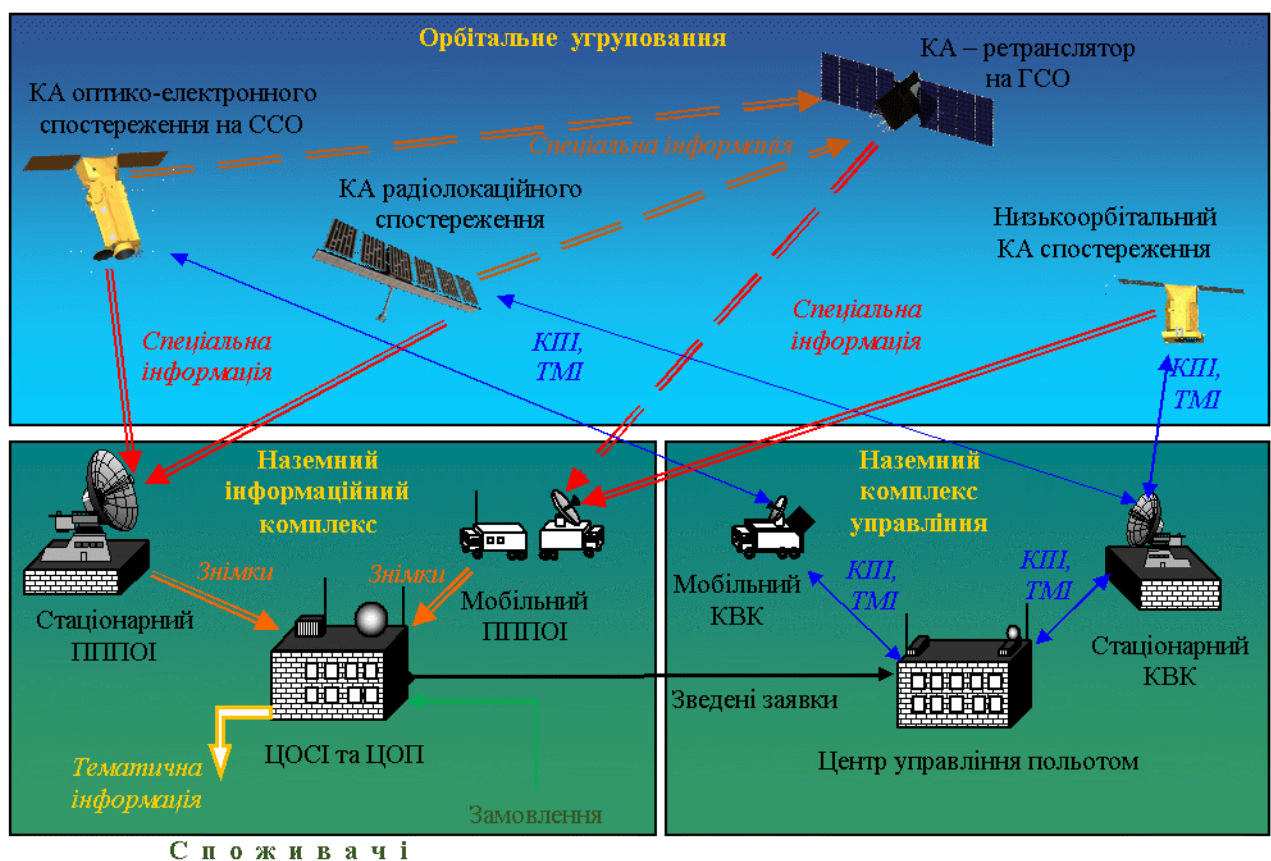


Рис. 1.24 – Склад типового комплексу космічного спостереження

1. **Орбітальне угруповання КА**, яке складається з КА з різною знімальною апаратурою та на різних орбітах, що пристосовані до певних умов знімання. Воно здійснює космічне знімання заданих ланок поверхні за планованими завданнями. Результатами знімання є дані знімання, які являють

собою цифрові записи що отримані бортовою апаратурою знімання. Ці дані під час радіоконтакту КА з НП (сеансу зв'язку) мають передаватися на Землю для подальшої обробки. **Космічний апарат космічного спостереження** узагальнено складається з **бортового комплексу забезпечення (БКЗ)** і **бортового інформаційного комплексу (БІК)**. БКЗ будь-якого КА призначений для забезпечення функціонування всіх наявних на КА систем включно з радіокомандної і радіотелеметричної системами, яки забезпечують зв'язок з наземним комплексом управління. БІК КА спостереження призначений для виконання операцій за призначенням КА – знімання земної поверхні в певних діапазонах випромінювань та передавання отриманих даних (знімків) за допомогою окремої спеціальної радіолінії зв'язку на наземний інформаційний комплекс для подальшого їх оброблення. [7]

2. Пункти прийому та попередньої обробки інформації знімання (ПППОІ). ПППОІ є частиною наземного інформаційного комплексу (НІК, НП). Вони мають в своєму складі **станції приймання спеціальної інформації (СПСІ)**, яка передається з КА по спеціальній радіолінії зв'язку та **засоби первинної обробки** даних знімання. Спеціальна інформація містить у собі закодовані та стиснуті на борту КА дані знімання.

Основне завдання СПСІ – надійне **приймання спеціальної інформації** по радіоканалу «КА-НІК» та її поточне архівування за час сеансу зв'язку. Далі отримані в сеансі та архівовані дані знімання поступають на засоби первинної обробки, де вони розпаковуються, декодуються, розкладаються на окремі потоки по типах знімальної апаратури (по знімальних датчиках) та по діапазонам та смугам знімання. Далі в процесі первинної обробки формуються знімки (у вигляді цифрових масивів) окремо по датчиках, спектральних каналах та смугах. Кожний такий масив несе одне зображення заданої ланки знімання для одного датчика в одному спектральному діапазоні.

Далі, у процесі **попередньої обробки** ці цифрові масиви складають у багатоканальні (або кольорові) знімки та просторово обрізають відповідно до вимог замовника знімання. Сформовані знімки передаються виконавцю тематичної обробки. [7]

3. Тематична обробка – процес одержання корисної інформації зі знімків здійснюється засобами обробки спеціальної інформації. Ці засоби за звичаї групуються в **центр обробки спеціальної (тематичної) інформації (ЦОСІ)**. Основними завданнями ЦОСІ є проведення своєчасної та якісної обробки знімків з метою одержання корисної інформації за завданням та доведення одержаної інформації до замовника інформації

Поскілки одержання певних видів інформації потребує специфічного знімання, до складу ЦОСІ за звичай входить **центр оперативного планування (ЦОП)**. ЦОП збирає заявки від різних замовників інформації та формує попередній **план проведення знімань**. В цьому плані вказуються пропозиції по використанні знімальної апаратури КА угруповання за часом і простором. План у вигляді зведеної заявки передається у органи керування орбітальним

угрупованням, де він корегується щодо поточних можливостей КА та використовується для формування польотних завдань.

Задачі тематичної обробки дуже різняться за спеціалізацією задач замовників: вони потребують фахової освіти обробників для певних галузей. Тому тематична обробка може проводитися замовниками інформації спостереження власними силами. В такому разі задачі ЦОСІ та ЦОП звужуються до планування та взаємодії з замовником знімків. [7]

4. Керування орбітальним угрупованням здійснює **наземний комплекс управління** (НКУ). В його склад входить **центр управління польотом** (ЦУП) та **командно-вимірювальні комплекси** (КВК). ЦУП керує орбітальним угрупованням шляхом аналізу його стану за телеметричними і вимірювальними даними, що поступають з КВК, планує роботу угруповання КА та формує польотні завдання, які КВК передає на КА під час сеансу зв'язку. КВК здійснює радіозв'язок з КА по командно-телеметричній радіолінії, отримує від нього інформацію про стан усіх бортових систем (телеметричні дані) та передає на КА сформовані ЦУП-ом польотні завдання у вигляді програм польоту. Крім того КВК за час сеансу зв'язку вимірює поточні положення КА для уточнення параметрів його орбіти. [7]

1.3.2 Основні принципи побудови та можливості оптико-електронної апаратури аерокосмічних спостережень

БІК КА оптико-електронного спостереження призначений для знімання земної поверхні в видимому та інфрачервоних діапазонах випромінювань та передавання отриманих даних знімання (спеціальної інформації) за допомогою окремої спеціальної ширококутової радіолінії зв'язку на НІК для подальшого їх оброблення.

У БІК КА оптико-електронного спостереження входять (рис. 1.25):

- кілька датчиків спеціальної інформації – знімальна апаратура видимого та інфрачервоного діапазонів відбитих та власних випромінювань земної поверхні;

- загальний пристрій кодування й ущільнення, що поєднує окремі види інформації в єдиний інформаційний потік;

- запам'ятовуючі пристрої, у які надходить дані знімання, які отримуються між сеансами зв'язку КА з НІК;

- передавальна апаратура спеціальної ширококутової радіолінії зв'язку, яка призначена для передавання отриманих даних знімання на НІК під час сеансів зв'язку. [7]

Комплексування радіолокаційних та оптико-електронних датчиків на одному КА спостереження не є доцільним з особливостей застосування оптико-електронних та радіолокаційних засобів.

Знімання земної поверхні оптико-електронною апаратурою з КА має певні особливості, що потребують розуміння специфічних термінів: «смуга захоплення» та «смуга огляду» (рис.1.26).

Смуга захоплення (дистанційне зондування Землі) – смуга на поверхні Землі уздовж траєкторії польоту космічного апарата, ширину якої визначає здатність технічного засобу ДЗЗ отримувати дані ДЗЗ під час знімання [5].

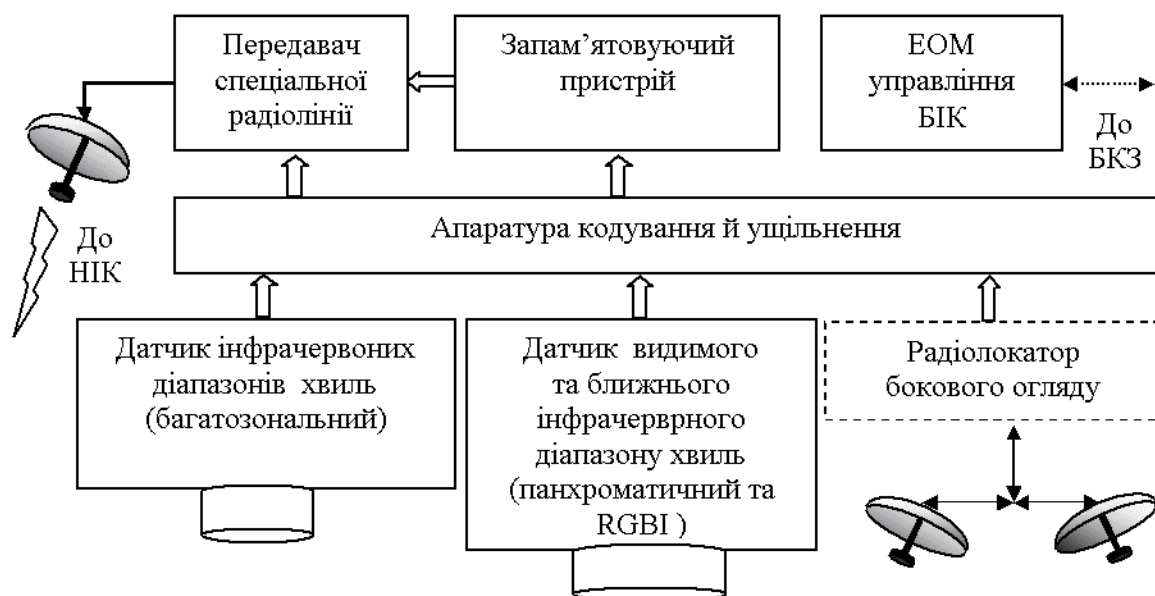


Рис. 1.25 – Типова структура бортового інформаційного комплексу КА спостереження

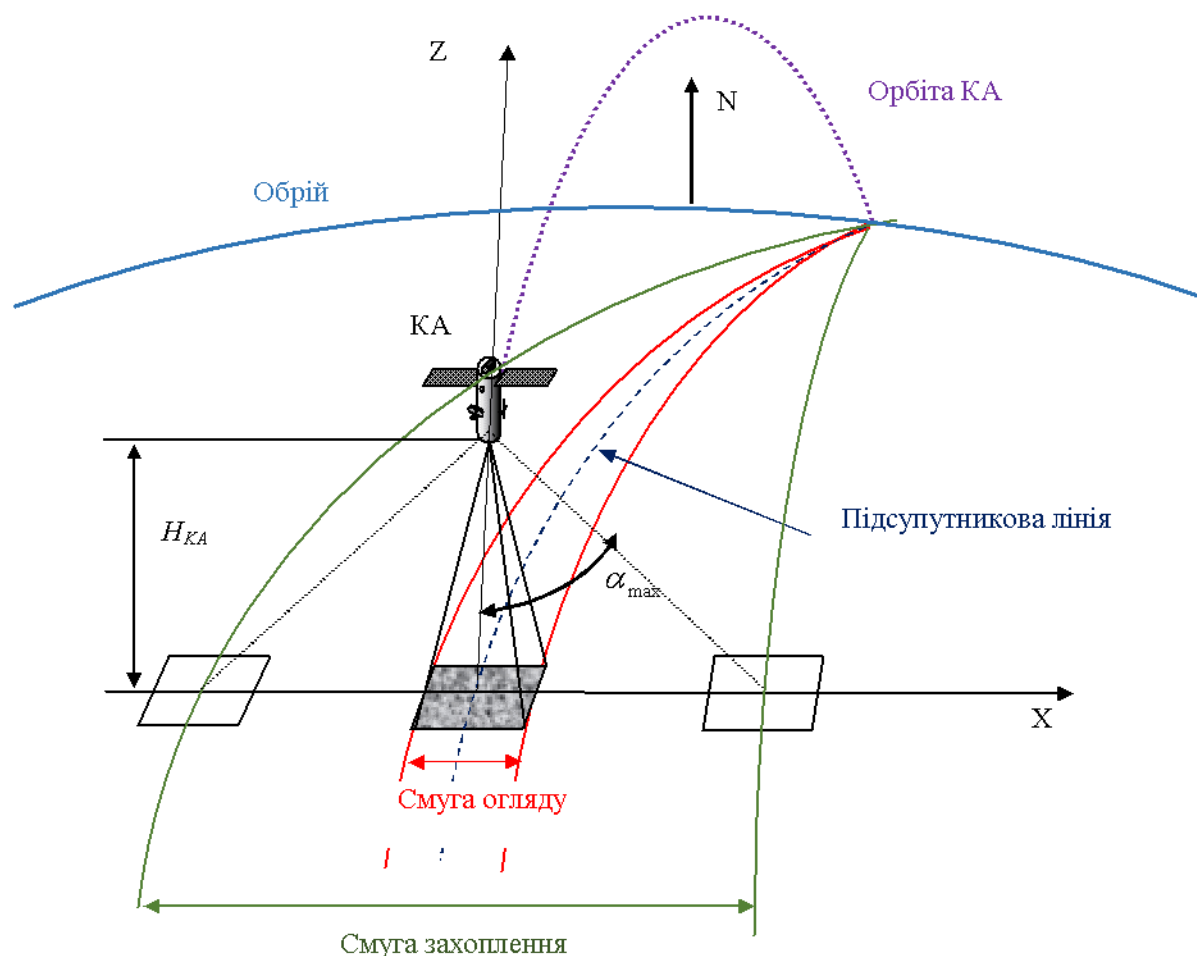


Рис. 1.26 – Смуга огляду та смуга захоплення КА оптико-електронного спостереження

Смуга захоплення оптико-електронного датчика КА спостереження визначається висотою польоту КА ($H_{КА}$), параметрами знімальної апаратури (специфічні назви – «датчик» або «*sensor*») та максимально можливим кутом відхилення оптичної осі об'єктива датчика від нормалі (α_{max}).

Кут відхилення оптичної осі об'єктива від нормалі (α_{max}) зазвичай не має перебільшувати значення $\pm 45^\circ$. У разі перебільшення цих меж, по перше, атмосфера дуже погіршує властивості зображення, яке формується на оптичному приймачеві, по-друге, на зображенні виникають значні перспективні геометричні викривлення.

Смуга огляду (дистанційне зондування Землі) – смуга на поверхні Землі уздовж напрямку польоту космічного апарата, ширину якої визначає поле зору технічного засобу ДЗЗ, а довжину – тривалість знімання, вимірювана в лінійних одиницях [5].

Характеристики оптико-електронної апаратури знімання КА краще розглянути на конкретному прикладі. За приклад візьмемо останній вітчизняний КА спостереження Січ-2 (рис. 1.27).

Січ-2 – малогабаритний космічний апарат. Призначений для спостереження поверхні Землі в оптичному і середньому інфрачервоному діапазонах.

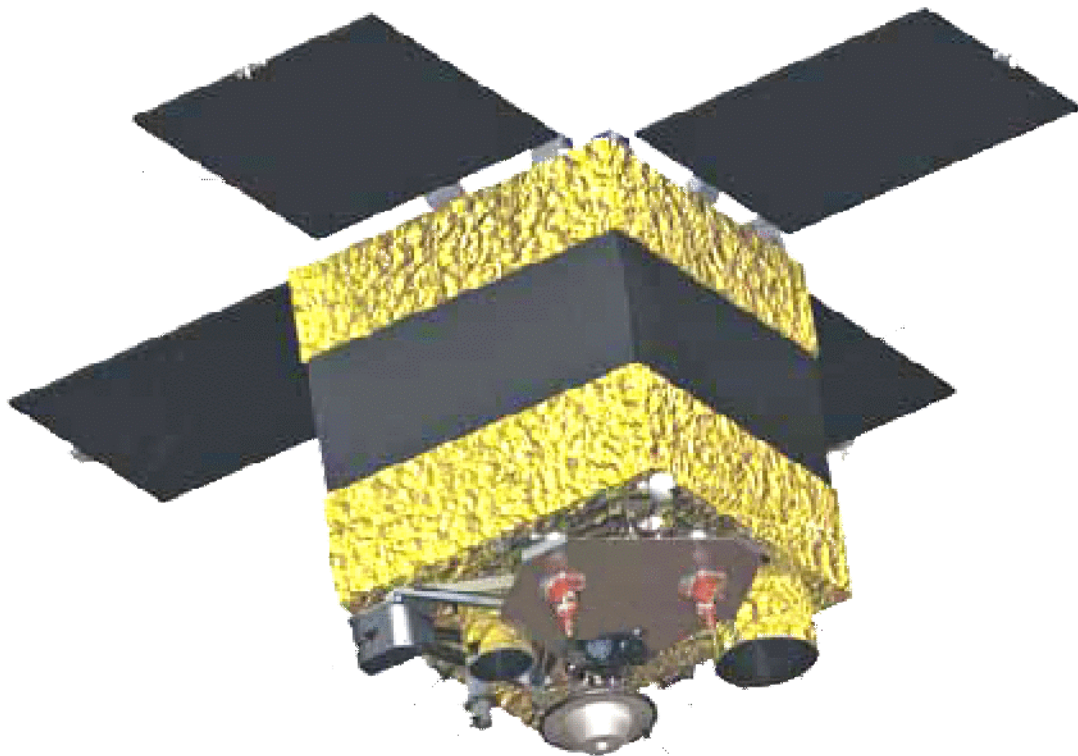


Рис. 1.27 – Зовнішній вигляд КА Січ-2

В комплект входить багатозональний сканувальний пристрій і сканер середнього інфрачервоного діапазону, що забезпечує отримання цифрових оптико-електронних знімків поверхні Землі в панхроматичному і багатоспектральному діапазонах, а також у середньому інфрачервоному діапазоні. Крім того, до складу корисного навантаження Січ-2 було введено комплекс наукової апаратури. Основні характеристики КА приведені в таблиці 1.2.

Таблиця 1.2 – Основні характеристика КА Січ-2

Маса	176 кг
Орбіта:	
- висота	700 км
- нахил	98,24°
Стабілізація	Тривісна активна
Максимальний кут відхилення від надиру	30°
Споживана потужність:	
- максимальна	405 Вт
- середньодобова	90 Вт

Для знімання в видимому і ближньому інфрачервоному діапазонах було розроблено багатозональний скануючий пристрій **МСУ-8**. Апаратура МСУ-8 забезпечувала знімання поверхні Землі і забезпечення спектрального перетворення оптичного випромінювання видимого і ближнього інфрачервоного діапазону спектра у відеосигнал з наступною його корекцією.

МСУ-8 побудований на основі твердотільних багатоелементних лінійних фотоприймачів – **приладів із зарядовим зв'язком (ПЗЗ)**. Кожна лінійка ПЗЗ складається з 2048 фоточутливих елементів, що утворюють набір **миттєвих полів зору**, яки формують **поле зору** приладу. При зчитуванні з ПЗЗ-фотоприймача зарядів формується один рядок зображення (рис. 1.28 а). Двомірне зображення отримується при послідовному рядковому зчитуванні інформації з лінійного ПЗЗ- фотоприймача під час руху космічного апарата (рис. 1.28 б).

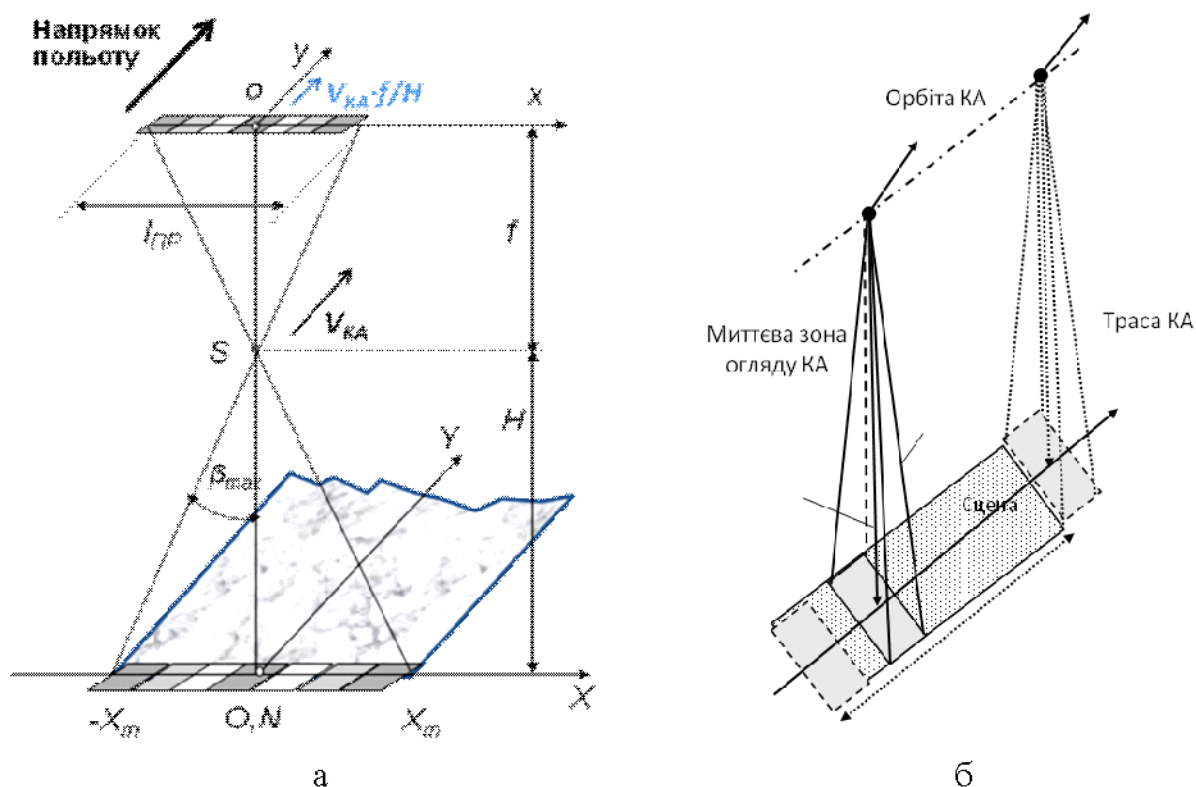


Рис. 1.28 – Схема знімання ПЗЗ- лінійкою фото чутливих елементів (а) та формування сцени за рахунок руху КА з ПЗЗ- лінійкою (б)

МСУ забезпечує ширину смуги огляду 48 км і проєкцію пікселя на поверхні Землі 8 м для всіх спектральних і панхроматичного діапазонів при висоті орбіти близько 650 км. З метою одержання інформації в широкій смузі захоплення використовується відхилення оптичної осі приладу поперек напрямку польоту в межах $\pm 30^\circ$ із кроком 2° . Характеристики знімальної апаратури МСУ-8 та сканера середнього інфрачервоного діапазону приведені в таблиці 1.3.

Таблиця 1.3 – Характеристика знімальної апаратури КА Січ-2

Багатозональний скануючий пристрій МСУ-8	
Спектральні діапазони: - панхроматичний (<i>panchromatic</i>) - багатоспектральні (<i>multispectral</i>)	0,51 – 0,90 мкм 0,51 – 0,59 мкм, 0,61 – 0,68 мкм, 0,80 – 0,89 мкм
Проекція кроку пікселів у надирі	$\approx 8,2$ м
Ширина смуги огляду в надирі	$\approx 48,8$ км
Сканер середнього інфрачервоного діапазону	
Ширина спектрального діапазону	1,51–1,70 мкм
Проекція кроку пікселів у надирі	$\approx 41,4$ м
Ширина смуги огляду в надирі	58,1 км
Підсистема даних	
Об'єм пам'яті	2 ГБ
Швидкість передачі даних	30,72 Мб/с

Оптична система сканера складається з **дзеркально лінзового об'єктива і спектроподільного блоку**. Об'єктив оптичної системи побудований за схемою дзеркально-лінзового телескопа зі сферичними дзеркалами внутрішнього відбиття типу Манжена в сполученні з лінзовим компенсатором аберацій у заданому полі зору (рис. 1.29, 1.30).

Оптико-механічний блок

Параметри ОМБ МСУ-8

Фокусна відстань	860,1 мм
Діаметри зіниць	170/69,7 мм
Ефективний діаметр вхідної зіниці	155 мм
Кутове поле зору (2β)	$4^{\circ}8'$
Коефіцієнт пропускання:	
в панхр. каналі	>0.70
в 1 каналі	>0.76
в 2 каналі	>0.82
в 3 каналі	>0.83
Коефіцієнт пропускання від входу до ПЗЗ	0.6
Розміри	260x520 мм

Рис. 1.29 – Зовнішній вигляд оптико-механічного блоку та основні параметри МСУ-8

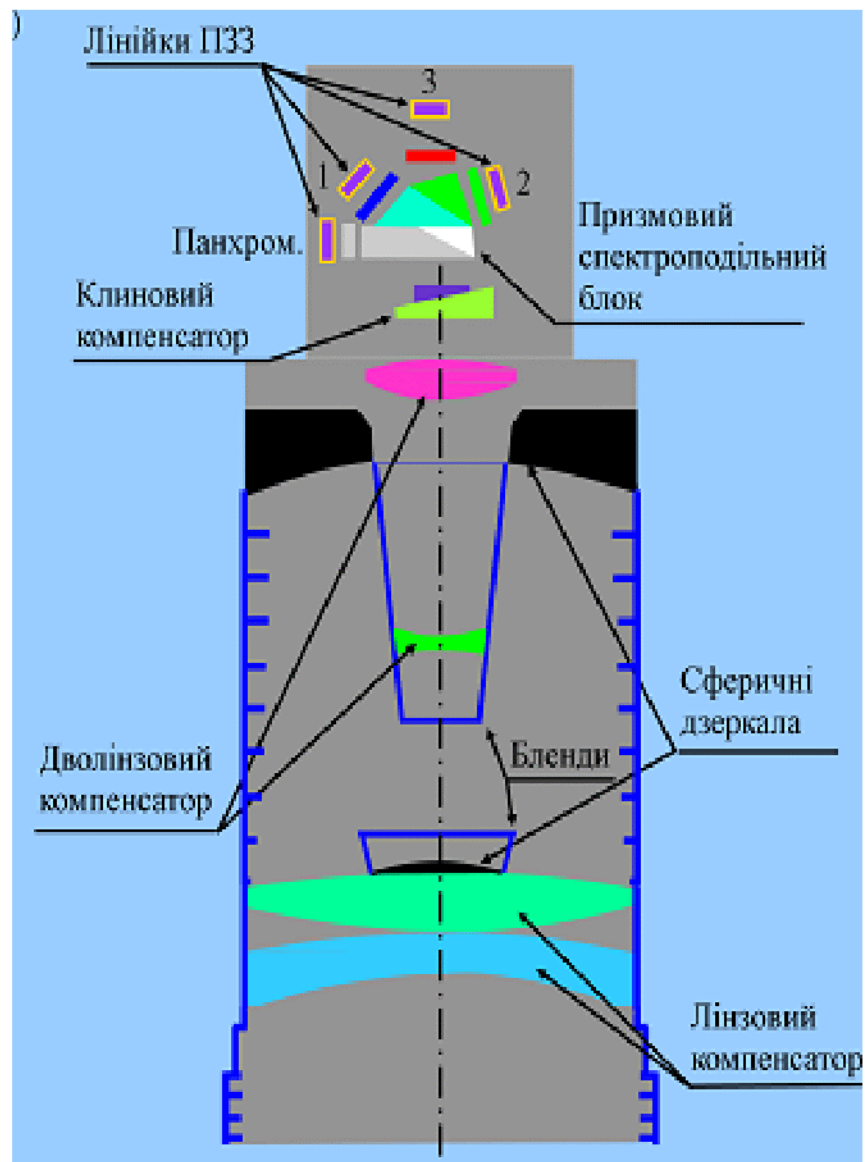


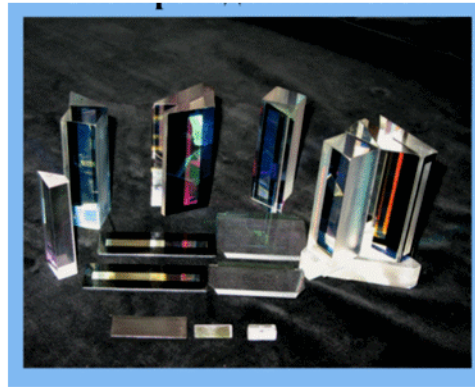
Рис. 1.30 – Оптична схема сканера МСУ-8

Спектророзподільний блок складається зі спектророзподільних пластин, на робочі поверхні яких наносяться багатошарові інтерференційні покриття, з компенсаційної пластини, циліндричних лінз і кольорових (смугових) світлофільтрів (рис. 1.31).

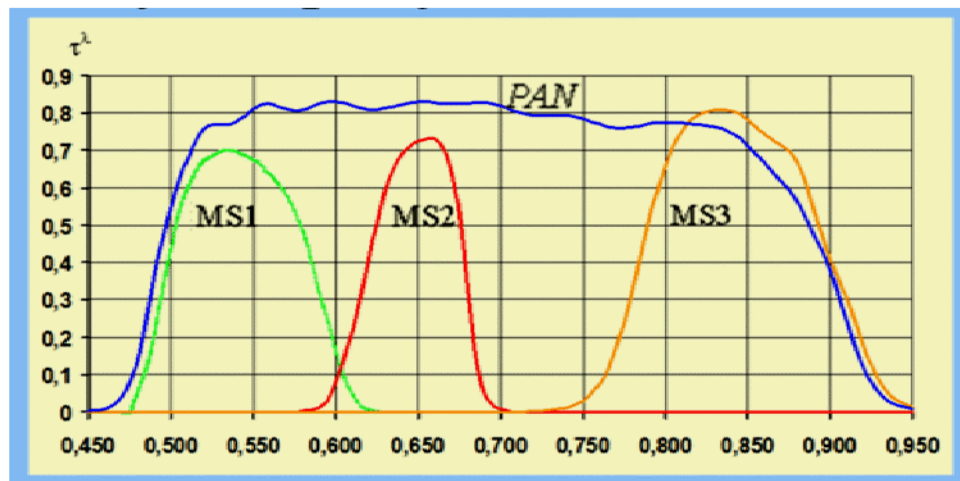
Одержання на виході кожного з трьох спектральних та панхроматичного каналів випромінювання з заданою формою спектрального пропускання досягається підбором інтерференційних покриттів, нанесених на спектророзподільні пластини, і підбором кольорових (смугових) світлофільтрів.

Як **фотоприймачі** використовуються ПЗЗ- лінійки CCD 191D фірми «Loral Fairchild», що мають 6000 пікселів розміром 10x10 мкм (рис. 1.32).

Апаратура обробки може переключати підсилення напруги сигналу з виходу ПЗЗ сходами 1, 2, 4, 8 разів. На вхід 12-ти розрядного аналогово-цифрового перетворювача (АЦП) напруга сигналу подається у діапазоні 0...1В. Після обробки процесором сигнали передаються у 8 бітовому поданні (256 рівнів яскравості).



а



б

Рис. 1.31 – Зовнішній вигляд спектроподільного блоку (а) та смуги пропускання спектральних каналів МСУ-8 (б)



Рис. 1.32 – Зовнішній вигляд ПЗЗ- лінійки CCD 191D та її параметри

Отримані цифровані дані значень сигналу в елементах растру зображення для кожного спектрального каналу запаковуються у цифрові пакети та зберігаються в запам'ятовуючому пристрої. Під час сеансу зв'язку вони передаватимуться по широкосмуговій спеціальній радіолінії зв'язку на наземній ПППОІ.

1.3.3 Основні принципи побудови та можливості радіолокаційної апаратури аерокосмічних спостережень

Розміщені на літаках або КА радіолокаційні станції (РЛС) знайшли широке застосування у спостереженні за землею поверхнею та розташованими на ній об'єктами. На космічних і авіаційних засобах знімання земної поверхні застосовують **РЛС бічного огляду (РЛСБО)** або **радіолокатори із синтезованою апертурою антен (РСА)**. Основною відмінністю таких радіолокаторів є те, що вони спостерігають (зондують) земну поверхню з борту носія (КА або літака) в напрямку «до низу - в бік» (рис. 1.33). [7]

Загальний принцип роботи РЛСБО полягає у наступному. Антена радіолокатора формує один або два (при огляді двох сторін) променя діаграми **спрямованості** (ДС), які спрямовані перпендикулярно до траси (або лінії шляху), тобто у бічному напрямку. ДС антени РЛС спрямована убік Землі внаслідок відхилення її униз від лінії місцевого горизонту на кут $\beta = 15^\circ \dots 75^\circ$ (кут візування). РЛС опромінює ділянку земної поверхні перпендикулярно до напрямку руху КА (або літака) і приймає відбиті від неї радіосигнали у заданій смузі.

Під час руху КА по орбіті (або польоту літака-носія) діаграма спрямованості РЛС БО переміщається разом з носієм. Внаслідок поступального руху антенного променя зі швидкістю польоту є можливість здійснювати огляд місцевості послідовно за напрямком руху. За рахунок цього проглядається безперервна смуга місцевості, що паралельна траєкторії польоту носія.

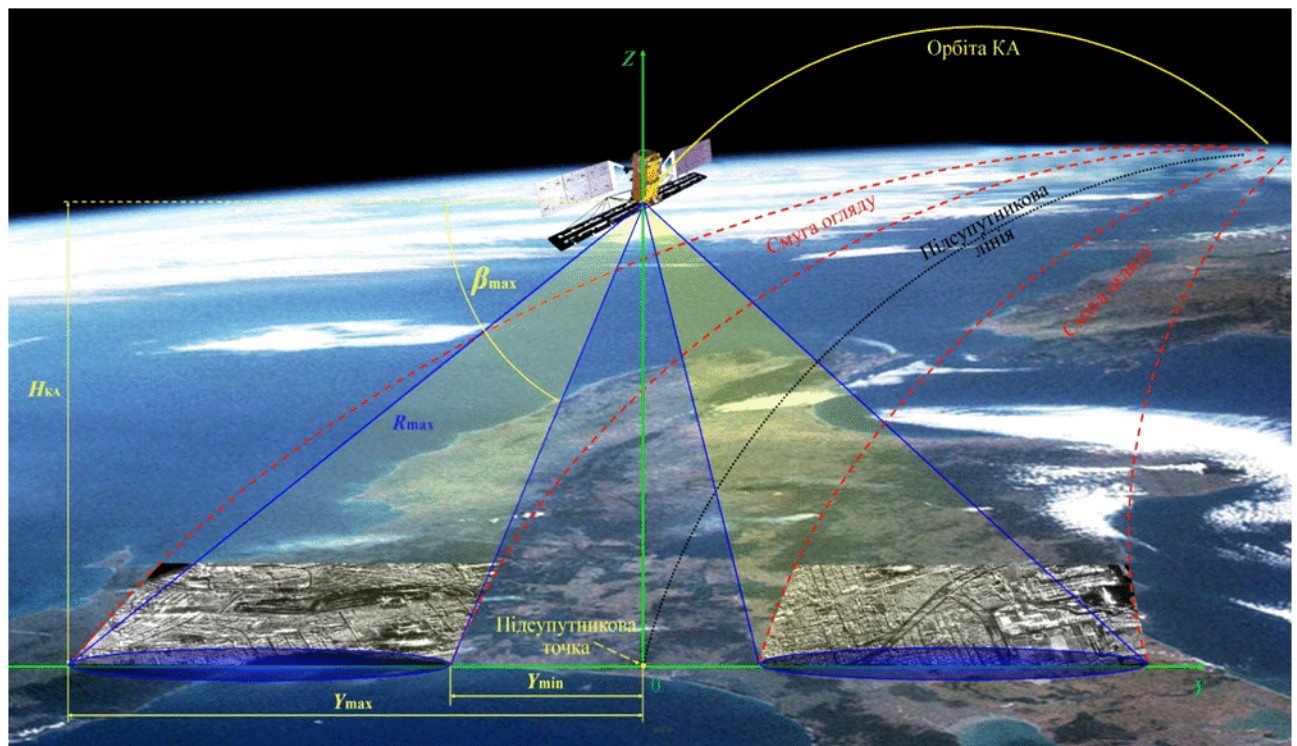


Рис. 1.33 – Схема бічного огляду поверхні РЛСБО з КА

Радіолокаційне зображення земної поверхні створюється в прямокутних координатах «нахилена дальність – шляхова дальність». Нахилена дальність R – це відстань від фазового центру антени РЛСБО до певної точки на земній поверхні (об'єкта). Шляхова дальність X – це відстань на земній поверхні вздовж напрямку руху носія РЛСБО (рис. 1.34).

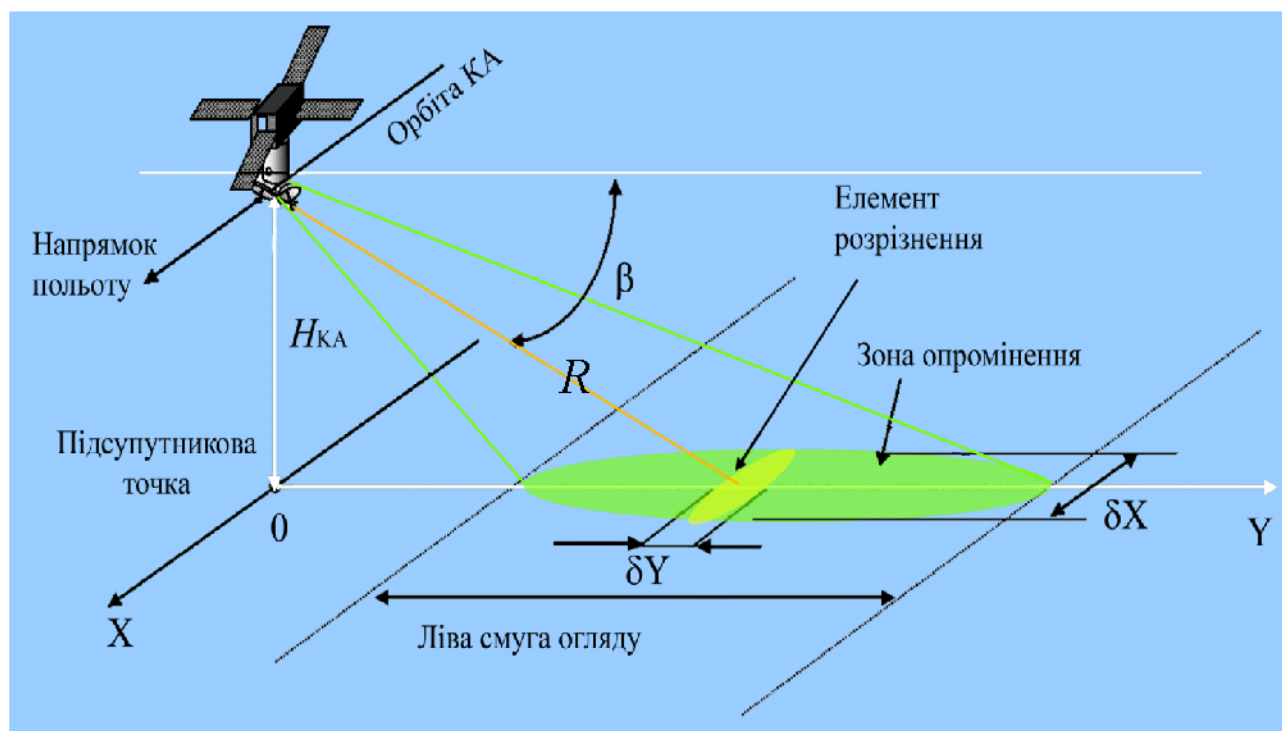


Рис. 1.34 – Схема опромінювання та формування елемента розрізнення за шляховою дальністю

Розрізнення РЛСБО на земній поверхні за напрямком руху (за шляховою дальністю) ΔX визначається шириною проєкції антенного променя на поверхню вздовж напрямку руху:

$$\delta X = \Theta \cdot R = \frac{\Theta \cdot H}{\sin(\beta)},$$

де β - кут візування елемента поверхні; Θ - ширина діаграми спрямованості антени за рівнем половинної потужності (у радіанах); H – висота КА.

Розрізнення за нахиленою дальністю ΔR визначається тривалістю τ відбитого від ланки поверхні, прийнятого та стисненого після оптимальної обробки сигналу. Розрізнення на поверхні поперек напрямку руху (за на поперечною дальністю) ΔY визначається розрізненням за нахиленою дальністю ΔR та дальністю певної точки поверхні від ПТ – Y_T (рис. 1.35):

$$\delta Y = \frac{c \cdot \tau}{2 \cdot \cos(\beta)},$$

де $c = 3 \cdot 10^8$ м/с – швидкість розповсюдження радіоімпульсу. [7]

Спрощена функціональна схема такої РЛСБО містить у собі передавач, антенний перемикач, антену, приймач, синхронізатор, адресні лічильники, АЦП та запам'ятовуючий пристрій (ЗП) (рис. 1.36). [7]

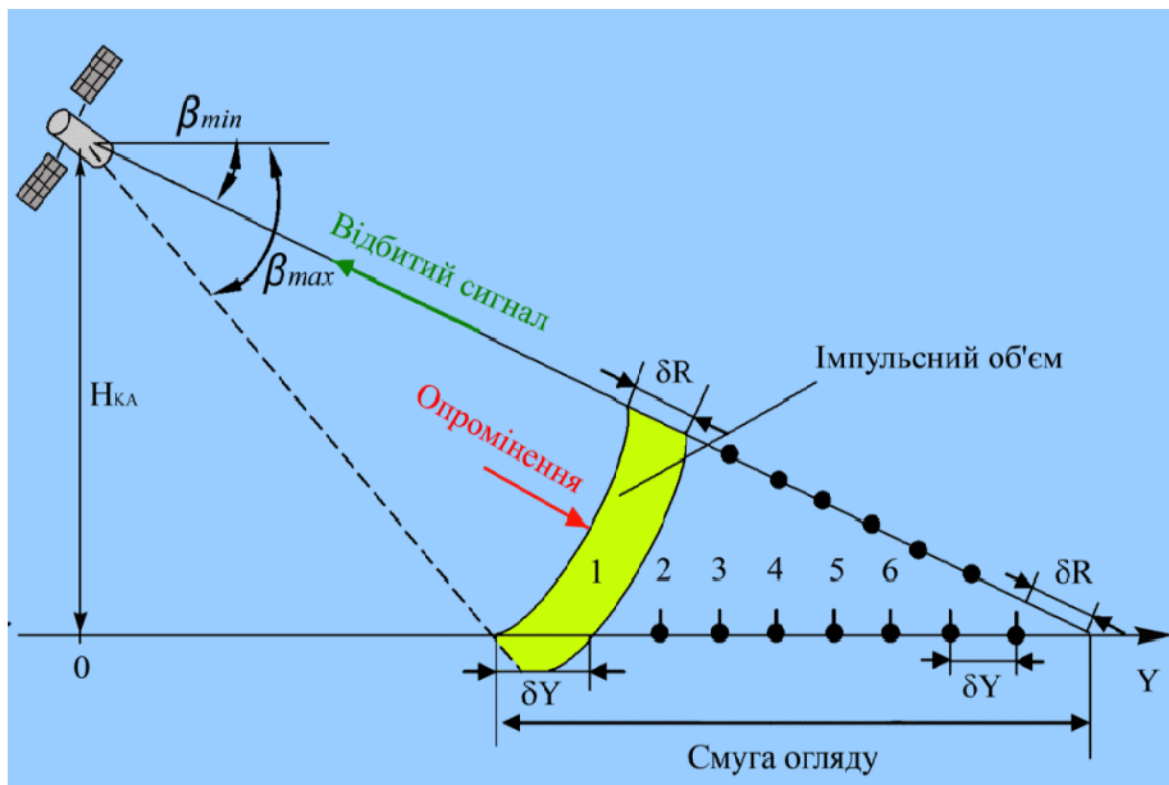


Рис. 1.35 – Схема опромінювання та формування елемента розрізнення за поперечною дальністю

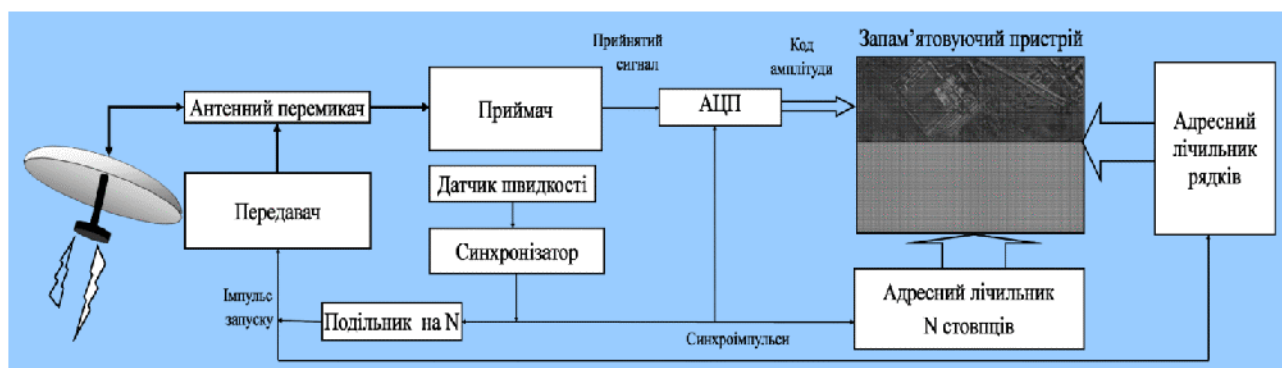


Рис. 1.36 – Функціональна схема РЛСБО

Масиви цифрових відліків сигналу з виходу приймача цілком описують відбивну здатність ділянок місцевості, які розрізняються (елементів поверхні). Оцінки амплітуди, створювані однорядковим розгортанням дальності, записують в рядок ЗП з темпом розповсюдження сигналу поперек смуги огляду. Завершується запис одного рядка ЗП після приходу сигналу, що відіб'ється від дальньої межі смуги огляду. Запис у наступний рядок ЗП почнеться після випромінювання чергового імпульсу передавача (з затримкою). У результаті в ЗП рядок за рядком фіксується зображення смуги місцевості, що спостерігається. Для того щоб рядки на місцевості формувалися один за одним без прогалин та великих накладень, синхронізація запису здійснюється пропорційно швидкості пересування носія РЛСБО. [7]

Радіолокаційне зображення для візуального аналізу формується у наземному пункті приймання та оброблення шляхом відображення записаного масиву відліків сигналу на екрані у вигляді точкового зображення (рис. 1.37). Кожний

точці зображення на екрані відповідає один елемент розрізнення РЛСБО (одна комірка ЗП). Яскравість точок зображення на екрані відповідає відбивній здатності відповідних ділянок місцевості.



Рис. 1.37 – Отримане з радіолокаційного знімку зображення великого міста з аеродромом

Для покращення детальності радіолокаційних знімків (просторового розрізнення ΔY) поперек напрямку польоту потрібно зменшувати тривалість стиснутого прийнятого імпульсу τ . Це легко реалізується за рахунок використання широкосмугових з зондувальних сигналів із складною модуляцією (ЧМ, ФМ та їх комбінації).

Для покращення детальності радіолокаційних знімків (просторового розрізнення ΔX) вздовж напрямку польоту знадобиться збільшувати розмір антени в напрямку польоту. Це технічно важко зробити. Тому використовують інший підхід – штучне синтезування апертури антени за рахунок послідовного за часом і рухом носія. Під час синтезування відбувається когерентне накопичення відбитих сигналів, які створюються зондувальними імпульсами з різних положень антени під час її руху. Ця технологія є досить складною: 1) необхідна висока когерентність зондуючи сигналів; 2) необхідна висока точність інформації про поточне положення фазового центру антени;

3) потрібна досить складна технологія обробки когерентних сигналів. Синтезування апертури дозволяє отримувати радіолокаційні знімки з просторовим розрізненням що наближається до розрізнення оптико-електронних знімків. [7]

Спрощено принцип роботи **радіолокатора з синтезованою апертурою (РСА)** полягає у наступному.

Розміщений на борту носія високостабільний передавач випромінює зондувальний сигнал в напрямку району, що досліджується, за допомогою антени з широкою діаграмою спрямованості (рис. 1.38). Відбитий сигнал приймається протягом всього часу опромінення-відбиття з фіксацією (запам'ятовуванням) амплітуд і фаз прийнятих сигналів. Після прийому сигналу, відбитого від найбільш віддаленої межі зони опромінення, передавач РСА знову випромінює сигнал в напрямку зони опромінення, причому кожний наступний зондувальний сигнал повністю відповідає першому з точністю до збереження початкової фази коливань першого сигналу. Таке випромінювання є когерентним. Когерентність випромінювання передавача є основною умовою отримання високої розрізняювальної здатності РСА. [7]

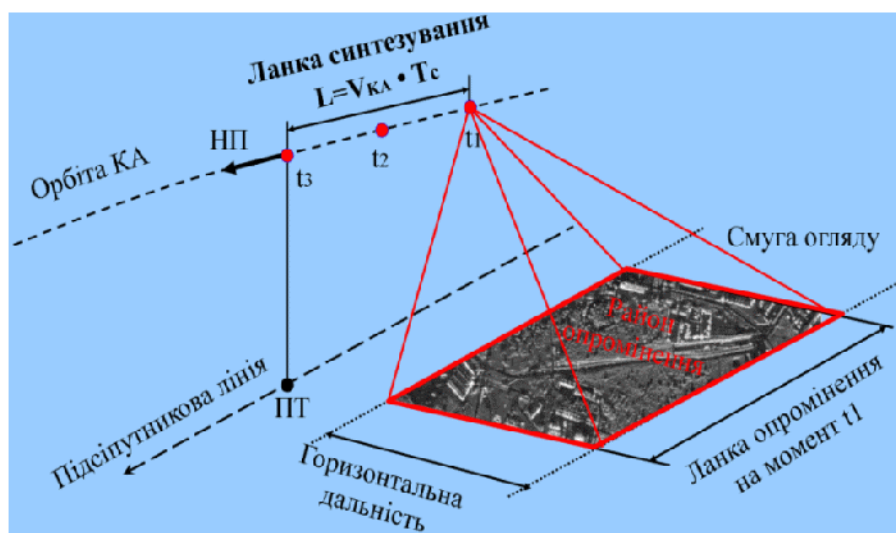


Рис. 1.38 – Принцип синтезування апертури антени в РСА

Когерентно випромінюючи та приймаючи сигнали та запам'ятовуючи їх амплітуди і фази в різні моменти часу по мірі руху КА вздовж траєкторії на деякій ланці довжиною L , можна мати повну картину амплітуд і фаз відбитих сигналів вздовж цієї ланки. Ця ланка називається ланкою синтезування апертури антени, а розподіл амплітуд і фаз сигналів вздовж ланки синтезування – радіоголограмою.

Радіоголограма, яку запам'ятовано на борту КА, має бути оброблена з метою відтворення реального радіолокаційного зображення досліджуваного району. В основу обробки записаної в ОЗП радіоголограми покладений алгоритм швидкого перетворення Фур'є (ШПФ) кожного рядка радіоголограми.

Склад РСА відрізняється від складу простої РЛСБО наявністю високостабільного базового генератора, фазового детектора, двох АЦП для комплексних каналів Im та Re (рис. 1.39). У разі обробки радіоголограм на борту в склад РСА додається спеціальний обчислювач ШПФ.

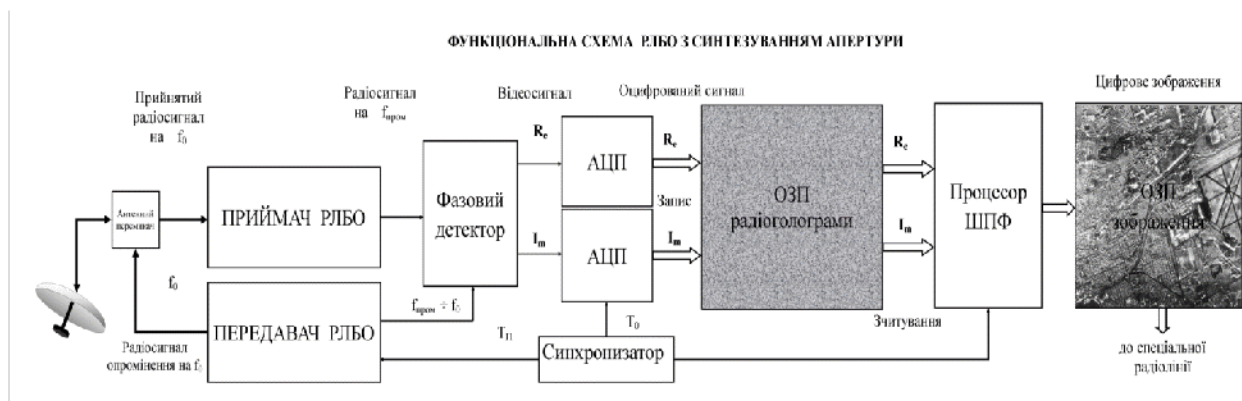


Рис. 1.39 – Функціональна схема РСА

Прикладом сучасного РСА може бути РСА, що встановлений на фінському КА *ICEYE* (рис. 1.40).



Рис. 1.40 – КА *ICEYE* з РСА

Супутник робить 15 обертів навколо Землі за добу на сонячно-синхронній орбіті заввишки 500—600 км (над Україною пролітає двічі за добу). Використовує радар із синтезованою апертурою для спостереження за поверхнею Землі крізь хмарний покрив (також туман, дим), незалежно від рівня освітленості. Він дозволяє виявляти цілі розміром від 1 м (0,25 м за меншої площі фільмування). Один знімок може охоплювати територію до 15x15 км. Приклад радіолокаційного зображення великого міста, яке сформоване з даних РСА КА *ICEYE* показаний на рисунку 1.41.

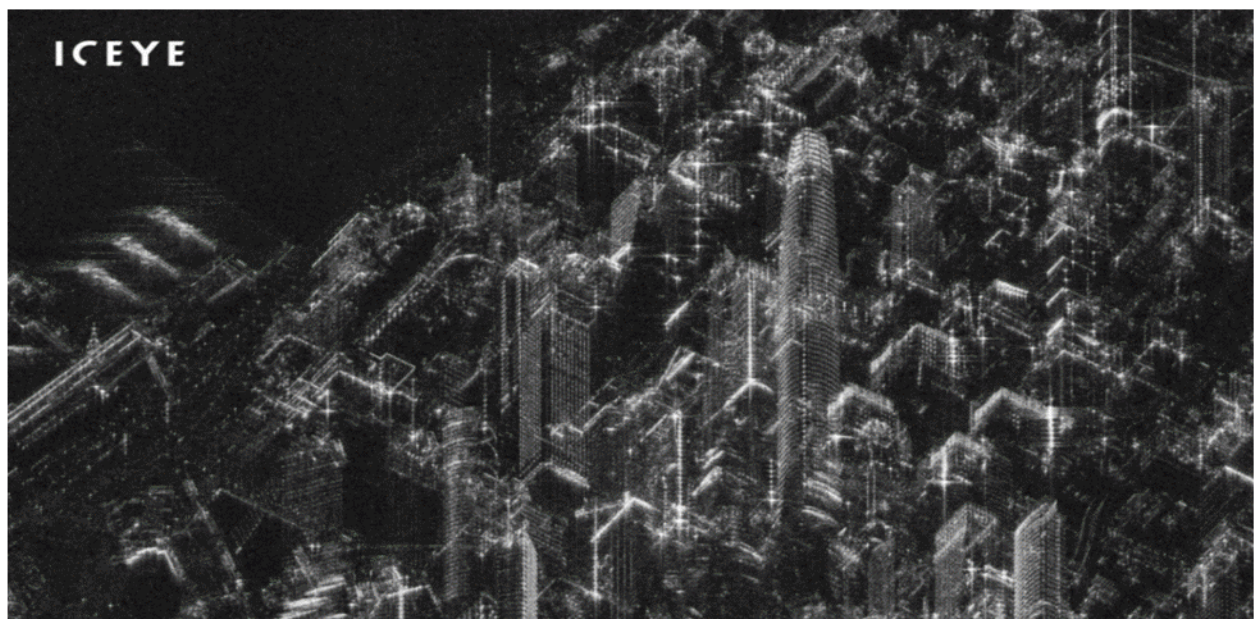


Рис. 1.41 – Приклад зображення з РСА – забудова великого міста

Основні характеристики деяких РСА космічного базування представлені у таблиці 1.4.

Таблиця 1.4 – Основні характеристики типових РСА

Назва КА	Вага КА, кг / висота орбіти, км	Корисне навантаження (тип антени РСА / частота)	Просторове розрізнення, м	Ширина смуги захоплення, км
<i>Radarsat</i>	2280 / 798	РСА з АФАР / 5.405ГГц	3x3...100x100	10...500
<i>Cosmo Skymed</i>	1700 / 620	<i>SAR-2000</i> з АФАР /9.6ГГц	від 0.7 до 30	5x5...100
<i>Terra SAR-X</i>	1209 / 515	<i>PCA XSAR</i> / 9.65ГГц	від 1x1 до 16x16	5x10...100
<i>Terra SAR-L</i>	2400 / 629	<i>PCA LSAR</i> / 1257.5МГц	5x5...50x50	20x20...200
<i>ALOS</i>	3850 / 692	ОЕС, РСА <i>PALSAR</i> з АФАР / 1270МГц	7-14...100	40-70...250-350
<i>TecSAR</i>	300-	РСА з параболічною антенною/ X-діапазон	від 0.7	
<i>SAR-Lupe</i>	770 / 500	РСА з параболічною антенною 3м / X-діапазон	0.7...1	5.5x5.5...8x60
<i>ICEYE</i>	120/ 500- 600	РСА	0.5 або 1 3 15	15x15 30x50 100x100

1.3.4 Основні характеристики оптико-електронних космічних знімків закордонних та вітчизняних супутникових систем

Основними характеристиками оптико-електронних повітряних та космічних знімків є їхні просторова розрізненість (на місцевості), діапазон довжин хвиль зафіксованих на знімку випромінювань, кількість та межі спектральних каналів знімка, просторове охоплення (розміри відображуваної ланки), розрядність даних.

Просторова розрізненість (на місцевості) (*spatial resolution*) – характеристика зображення, створювана видовим технічним засобом ДЗЗ, яку визначає розмір найменшого компактного об'єкта або ширина видовженого об'єкта певного контрасту, якого можна визначити (розрізнити) на цьому зображенні з заданою імовірністю. [5]

Просторова розрізненість знімків визначається в основному **просторовою роздільною здатністю засобу знімання** (датчика, *sensor*). Крім того, на неї впливають умови знімання та процеси передавання та обробки даних знімання. Просторова розрізненість матеріалів космічного знімання помітно впливає на ефективність їх використання. Вимоги до характеристик знімків, що висуваються в різних галузях науки, промисловості та сільського господарства, свідчать, що для вирішення частини тематичних задач ДЗЗ необхідні матеріали космічного знімання з просторовою розрізненістю до 5,0 м. Але більшість задач потребує використання даних спостереження з просторовим розрізненням 30 м та менш. Для задач спостереження, які потребують аналізу форм малорозмірних об'єктів та точного вимірювання їх просторового положення потрібні знімки з надвисоким просторовим розрізненням – менш 1 м.

Прикладом КА, що оснащений датчиками з надвисокою просторовою розрізненістю є французькі КА *Pléiades 1A (1B)*. Датчики КА знімають земну поверхню з смугою захоплення 20 км. Просторова розрізненість у панхроматичному діапазоні (0,48–0,83 мкм) – 0,5 м, у багатоспектральному – 2 м. У багатоспектральному режимі є 4 спектральних канали: 0,43 – 0,55 – «синій», 0,49 – 0,61 – «зелений», 0,6 – 0,72 мкм – «червоний» та 0,75 – 0,95 мкм – «ближній інфрачервоний».

Іншими прикладом КА для знімання з надвисоким розрізненням може бути КА *World View – 3*, якій здатний отримувати знімки з розрізненням 0,31 м в панхроматичному режимі (0,45 – 0,8 мкм).

Кількість та межі спектральних каналів визначають спектральну розрізненість даних знімання. **Спектральна розрізненість** (*spectral resolution*) – найменша різниця частот сигналів електромагнітного випромінювання, що надходить від об'єкта зондування, яку може визначити (розрізнити) технічний засіб ДЗЗ. [5]

Усі типи знімків мають загальні визначення кількості спектральних діапазонів. Геологічна служба США (USGS) розподіляє спектральні діапазони (смуги) та типи знімків як показано у таблиці 1.5.

Таблиця 1.5 – Типи знімків по числу спектральних діапазонів

Тип знімка	Кількість спектральних діапазонів
Панхроматичний	1-2 (зазвичай)
Видимий та ближній інфрачервоний діапазон	3-4 (червоний, зелений, синій та ближній інфрачервоний діапазон)
Багатоспектральний	5-36
Гіперспектральний	37+

Багатоспектральне подання розбиває діапазон довжин хвиль випромінювання на 4 – 36 ланок (смуг). Цим смугам присвоюються назви, такі як «червоний», «зелений», «синій» та «ближній інфрачервоний діапазон». Аналогічно, **гіперспектральне подання** так саме розділяє світло але на сотні вузьких спектральних смуг.

Приклад поділу діапазону на рисунку 1.42 показує 5 спектральних смуг багатоспектрального знімка. Він має три смуги у видимій частині діапазону, які позначені як червоний(1), зелений (2) та синій (3). Також є 2 смуги, виділені в інфрачервоної частині спектру (Band 4, 5). Зазвичай багатоспектральне зображення має смуги в ближньому інфрачервоному (NIR) та короткохвильовому інфрачервоному (SWIR) діапазонах.

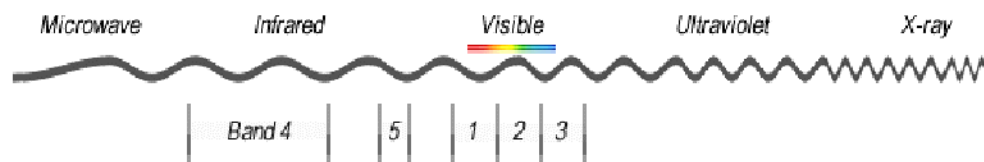


Рис. 1.42 – Призначення ланок спектру каналам багатоспектрального знімка

На рисунку 1.43 показаний приклад поділу діапазону для гіперспектрального знімка. Тут діапазон випромінювань поділений на вузькі смуги. Ці смуги є дуже вузькими порівняно із смугами багатоспектрального знімка.

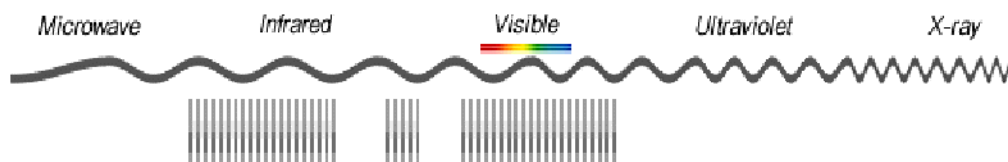


Рис. 1.43 – Призначення ланок спектру каналам гіперспектрального знімка

Зазвичай у гіперспектральному знімку є сотні смуг. Гіперспектральний знімок подається сотнями файлів. Кожен файл представляє одну вузьку смугу діапазону. Керування та обробка такої величезної кількості даних може бути складним завданням, що вимагає спеціалізованого програмного забезпечення та методів для вилучення цінної інформації з файлів цих численних спектральних каналів.

Розрядність даних визначає динамічний діапазон зафіксованих на знімку даних та радіометричну розрізненість. **Радіометрична розрізненість** (*radiometric resolution*) – найменша різниця інтенсивностей сигналів, що надходять від об'єкта зондування, яку може визначити (розрізнити) технічний засіб ДЗЗ. [5]

Інформаційні характеристики знімків деяких КА оптико-електронного спостереження подані у таблиці 1 та розглянуті нижче.

Програма **Landsat** – найтриваліший проєкт з отримання супутникових знімків планети Земля. Програма виконується *U.S. Geological Survey (USGS)* та *National Aeronautics and Space Administration (NASA)*. Перший з супутників у рамках цієї космічної програми був запущений ще в 1972 році; останній, на цей момент, *Landsat 9* – у 2021 році. Знімки КА *Landsat* є унікальним ресурсом для проведення безлічі наукових досліджень у галузі сільського господарства, картографії, геології, лісівництва, водного господарства, освіти, безпеки тощо. Наприклад, КА *Landsat 7* зробив знімки у 8 спектральних діапазонах з просторовою роздільною здатністю від 15 до 60 метрів з всієї планети з періодичністю збору даних 16–18 діб.

Таблиця 1.6 – Інформаційні характеристики знімків КА оптико-електронного спостереження

Супутник (датчик)	Спектральна розрізненість, мкм	Просторова розрізненість, м	Просторове охоплення, км
<i>Landsat 9</i>	0,02 – 0,5	15 (<i>PAN</i>) та 30 (<i>MS</i>)	185
<i>SPOT 5</i>	0,48 – 0,71	2,5(<i>PAN</i>) та 5 (<i>MS</i>)	60
<i>SPOT 7</i>	0,48 – 0,71	1,5 (<i>PAN</i>) та 6 (<i>MS</i>)	60 і 120
<i>Sentinel 2</i>	0,43 – 2,3	10	100
<i>EO-1 (Hyperion)</i>	0,01	30	7,7
<i>EnMap</i>	0,0065 та 0,01	30	30
<i>Pléiades 1</i>	0,12 – 0,2	0,5 (<i>PAN</i>) та 2 (<i>4MS</i>)	20
<i>World View - 3</i>	0,35 0,05 – 0,18 0,03 – 0,07 0,015 – 0,14	0,31 (<i>PAN</i>) 1,24 (8 <i>MS VNIR</i>) 3,7 (8 <i>MS SWIR</i>) 30 (12 <i>MS CAVIS</i>)	13,1

Останні КА *Landsat 8* та *9* мають датчик *OLI (Operational Land Imager)* з 9 спектральними каналами та просторовим розрізненням 30 м. Панхроматичний канал датчика має роздільну здатність 15 м. Датчик має діапазони спектральних каналів, що показані в таблиці 1.7.

Датчик *TIRS (Thermal Infrared Sensor)* має 2 канали дальнього ІЧ діапазону – (0.6 – 11.19 мкм) та (11.5 – 12.51 мкм). Обидва канали мають просторову роздільну здатність 100 м при зніманні в надир.

Таблиця 1.7 – Спектральні канали знімальної апаратури *OLI*

Номер каналу	Назва каналу	Діапазон, мкм	Просторова роздільна здатність, м
1.	<i>Visible Coastal Aerosol</i>	0,43 – 0,45	30
2.	<i>Visible Blue</i>	0,450 – 0,51	30
3.	<i>Visible Green</i>	0,53 – 0,59	30
4.	<i>Red</i>	0,64 – 0,67	30
5.	<i>Near – Infrared</i>	0,85 – 0,88	30
6.	<i>SWIR</i>	1,57 – 1,65	30
7.	<i>SWIR</i>	2,11 – 2,29	30
8.	<i>Panchromatic (PAN)</i>	0,50 – 0,68	15
9.	<i>Cirrus</i>	1.36 – 1.38	30

Супутник *SPOT (Satellite Pour L' – observation de la Terre)* був розроблений Французьким національним космічним центром. На супутнику *SPOT 5* була встановлена апаратура *VEGETATION* для виконання зйомок у 4 – х

спектральних зонах з розділенням близько 1 км. В оптико – електронному скануючому пристрої високої роздільної здатності *HRV* була додаткова ІЧ зона зі спектральним розділенням 1,58...1,75 мкм. Просторова роздільна здатність *HRV*: 5 м – розрізнення при панхроматичній зйомці, 10 м – при багатозональній (20 м у – ІЧ діапазоні). Найновіші супутники серії, *SPOT 6* та *SPOT 7*, є комерційними супутниками, що належать *Airbus Defence and Space*, і забезпечували безперервність передачі даних до 2024 року. Характеристики знімальної апаратури КА *SPOT 7* представлені в таблиці 1.8.

Таблиця 1.8 – Характеристики знімальної апаратури КА *SPOT 7*

Тип датчика	Оптико – електронний скануючий пристрій
Просторова роздільна здатність	Панхроматична – 1,5 м (в надирі) Багатоканальна – 6 м (в надирі)
Ширина смуги захоплення	60 км
Максимальне відхилення оптичної осі	$\pm 30^\circ$
Спектральні діапазони	<i>PAN</i> – 0.45 – 0.75 мкм
	<i>Blue</i> – 0.45 – 0.52 мкм
	<i>Green</i> – 0.53 – 0.59 мкм
	<i>Red</i> – 0.62 – 0.69 мкм
	<i>NIR (Near Infrared)</i> – 0.76 – 0.89 мкм

Програма Європейського Союзу *Copernicus*, глобального моніторингу за навколишнім середовищем і безпекою, пропонує інформаційні послуги на основі супутникової системи спостереження Землі – *Sentinel*, яка охоплює п'ять сімейств супутників: *Sentinel-1*, що призначений для отримання радіолокаційних даних, оптико – електронні *Sentinel -2* (рис. 1.38) і *Sentinel -3* – забезпечують



Copyright © ESA and AIRBUS Defence & Space. All rights reserved

Рис. 1.38 – КА *Sentinel -2*

моніторинг суші й океану, а *Sentinel-4* і *Sentinel-5* – розроблені для метеорологічних і кліматичних досліджень. *Sentinel-6* несе радіолокаційний альтиметр для вимірювання висоти поверхні моря, головним чином для оперативної океанографії та кліматичних досліджень. Супутник *Sentinel-2A* має спектральні канали, подібні до *Landsat 8* (табл. 1.9).

КА *World View* – 3 крім панхроматичного знімання з надвисоким розрізненням здатний знімати у кількох багатоспектральних режимах: 8 каналів видимого та ближнього ІЧ діапазонів (VNIR – 0,4 – 1,04 мкм) , 8 каналів у короткохвильовому ІЧ діапазоні (SWIR – 1,195 – 2,365 мкм) та 12 каналів датчика CAVIS (Clouds, Aerosols, Vapors, Ice, & Snow – 0,405 – 1,68 мкм).

Головна мета гіперспектрального знімання полягає в тому, що воне дає вищу спектральну деталізацію на знімках. Якщо у знімку є сотні вузьких спектральних смуг, є більша кількість спектральних деталей для аналізу. Можна виявити нову інформацію, яка була не доступна у разі знімання у широких смугах спектру. Це покращує вірогідність та точність класифікації елементів земної

Таблиця 1.9 – Спектральні канали КА *Sentinel-2*

Діапазони <i>Sentinel-2</i>	Центральна довжина хвилі, (мкм)	Роздільна здатність, (м)
Діапазон 1 – Прибережний аерозоль	0,443	60
Діапазон 2 – Синій	0,490	10
Діапазон 3 – Зелений	0,560	10
Діапазон 4 – Червоний	0,665	10
Діапазон 5 – Червоний край рослинності	0,705	20
Діапазон 6 – Червоний край рослинності	0,740	20
Діапазон 7 – Червоний край рослинності	0,783	20
Діапазон 8 – Ближній інфрачервоний	0,842	10
Діапазон 8А – Червоний край рослинності	0,865	20
Діапазон 9 – Водяна пара	0,945	60
Діапазон 10 – <i>SWIR</i> – Циррус	1,375	60
Діапазон 11 – <i>SWIR</i>	1,610	20
Діапазон 12 – <i>SWIR</i>	2,190	20

поверхні. Основні галузі використання гіперспектральних знімків – рослинність, сільське господарство, геологія, ґрунти, водні ресурси, стихійні лиха та землекористування. Можна отримати більше деталей щодо геологічного складу поверхні. Те саме стосується типів рослинності, класів ґрунтів тощо. Гіперспектральні знімки допомагають виявляти шкідників та забруднення на сільськогосподарських угіддях, аналізувати якість води та повітря і визначати їх хімічний склад. Поки що гіперспектральні знімки не застосовують широко з-за складності їх обробки та великого обсягу даних.

Прикладами КА, які проводили гіперспектральне знімання є КА *EO-1* та КА *EnMap*. У 2000 році *NASA* запустило КА *EO-1*, який мав гіперспектральний датчик «*Hyperion*». «*Hyperion*» створив зображення з просторовим розрізненням 30 метрів у 242 спектральних діапазонах від 0,357 до 2,576 мкм. Спектральне розрізнення знімків «*Hyperion*» – 10 нм. Ширина смуги захоплення – 7,7 км. Стандартна довжина смуги – 42 км. Наразі дані з «*Hyperion*» доступні безкоштовно на *USGS Earth Explorer*.

У 2022 році Німеччина запустила КА *EnMap* у рамках програми екологічного картографування та аналізу. Гіперспектральні знімки з цього супутника мають 246 діапазонів в двох під діапазонах: 0,42 – 1,0 мкм з спектральним розрізненням 6,5 нм та 0,9 – 2,45 мкм з спектральним розрізненням 10 нм. Просторове розрізнення – 30 м (в надир). Ширина смуги захоплення – 30 км.

1.4 Наземні засоби приймання, збереження та обробки даних аерокосмічних спостережень

1.4.1 Радіолінії передачі спеціальної інформації

В системах аерокосмічного спостереження спеціальні радіолінії використовують для передачі даних знімання (знімків і відеопотоків) з носія знімальної апаратури (КА або БпЛА) на пункт приймання і попередньої обробки інформації (ПППОІ). У загальному випадку під **радіолінією (РЛ)** розуміють сукупність радіопередавача (РПРД), передавальної антени, середовища розповсюдження радіохвиль, приймальної антени і радіоприймача (РПРМ), що забезпечують радіозв'язок між рознесеними технічними об'єктами (рис. 1.39). Іноді РПРД разом з передавальною антеною називають радіопередавальною системою (РПС), а РПРМ разом із приймальною антеною – радіоприймальною системою (РПРС). [8]

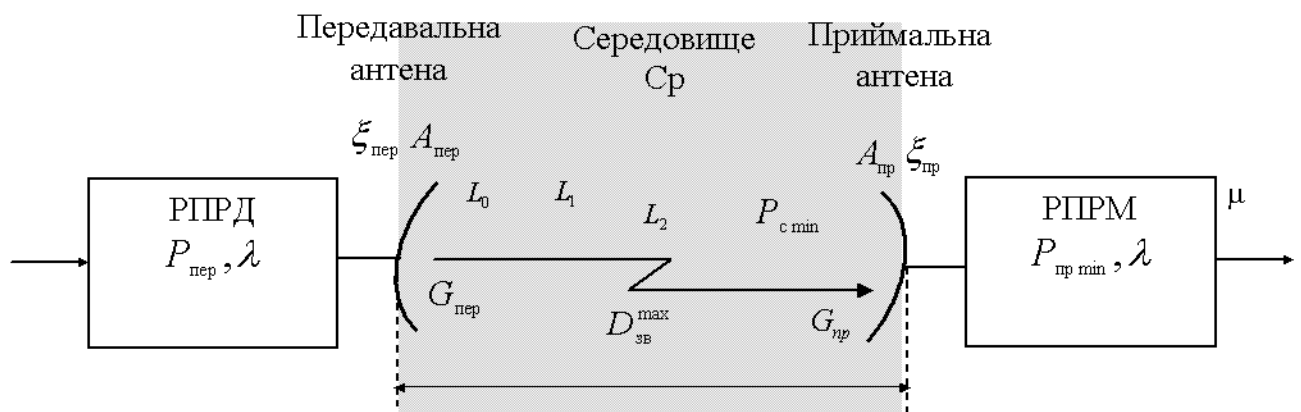


Рис. 1.39 – Узагальнена функціональна схема радіолінії [8]

Через РЛ Борт - ПППОІ здійснюється передача на ПППОІ спеціальної інформації із знімальної апаратури: знімків або відеопотоків. На рисунку 1.40 показана функціональна схема спеціальної радіолінії КА – ПППОІ. Широке розповсюдження мають РЛ передавання спеціальної інформації у наступних

виділених для космічних систем діапазонах – 137 МГц, 456 МГц, 1,7 ГГц, 8,2 ГГц тощо; для БПЛА найчастіше використовують діапазони стандартів *WiFi*.

Крім спеціальної інформації з борта на ПППОІ необхідно передавати й інші види бортової інформації, наприклад **телеметричну інформацію** про стан бортових систем. Зазвичай обсяг та потрібна швидкість передачі такої інформації нижчі за спеціальну інформацію. Це дозволяє об'єднувати процеси передачі різної інформації по одній (об'єднаній) РЛ. Для розділення різних видів інформації, що передаються по об'єднаній РЛ, можуть використовуватися різні підходи: різний бортовий час передачі, частотний рознос сигналів, різне кодування видів інформації, різні позиції (адреси) в інформаційних кадрах (пакетах), різні типи модуляції радіосигналів тощо.

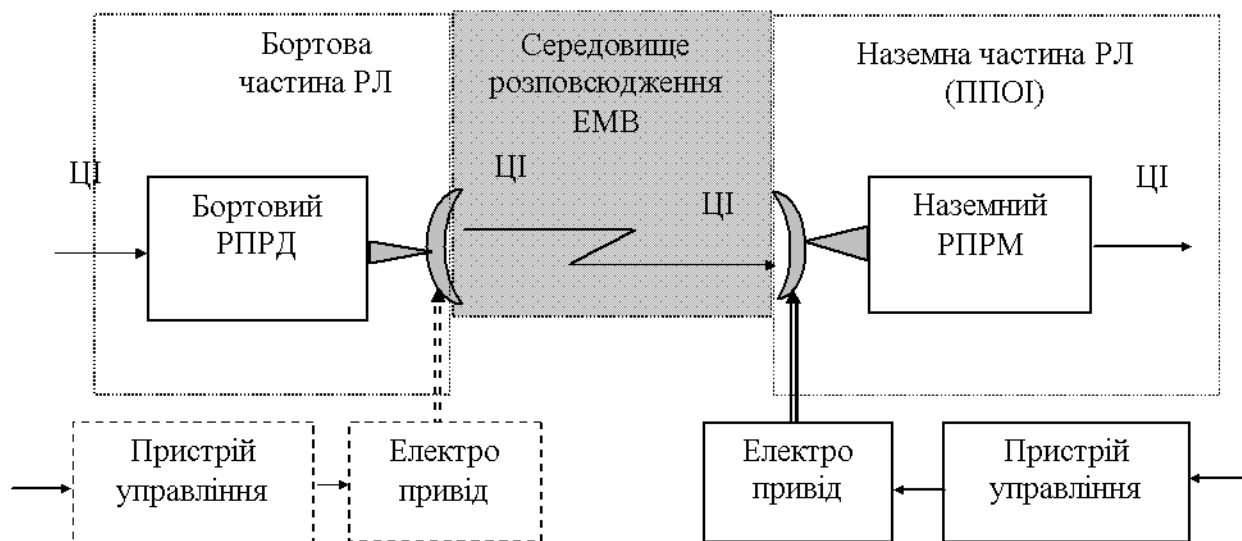


Рис. 1.40 – Функціональна схема спеціальної радіолінії КА – ПППОІ [8]

Бортова частина РЛ КА-ПППОІ має наступні особливості та обмеження: обмежені габарити і маса антен; потрібна спеціальна форма і конструкція антен; обмежена рухомість антен (нерухомі або малорухомі); антени мають широкую діаграму спрямованості (слабкоспрямовані або не спрямовані антени); бортова частини РЛ має низький енергетичний потенціал та РПРД має обмежену потужність. Для забезпечення рухомості спрямованим бортовим антенам застосовують систему керування антенами у складі пристрою управління та електроприводу.

Наземна частина РЛ КА-ПППОІ також має свої особливості. Габарити, маса, форма і конструкція антен майже не мають обмежень. Тому наземні антени мають високі коефіцієнти підсилення та вузькі діаграми спрямованості, які можна навести в будь-якій напрям. Такі антени мають електроприводи у двох площинах – по азимуту і по куту місця (ОПП). Наземні РПРМ мають високу чутливість та низький коефіцієнт шуму.

1.4.2. Станції приймання спеціальної інформації

Пункт прийому та обробки інформації здійснює прийом інформації від КА, розділення її по датчикам, смугам і кадрам, її перетворення для формування растрів зображень, оперативний перегляд, конвертування та

зв'язку. Швидкість надходження інформації від КА – 16, 32, 64, 128, 256, 512 Мбіт/с. Вид модуляції сигналів що приймаються – ВФМ, ВФМ (QPSK, SQPSK тощо). За добу забезпечується прийом, обробка та реєстрація до трьох сеансів знімання одного КА. Мінімальний проміжок часу між сеансами зв'язку з різними КА – 10 хвилин. Цей час потрібний для розпакування даних сеансу та підготовки обладнання до наступного сеансу. Попередня обробка одного сеансу займає 10-30 хвилин. Вибірково проводиться реєстрація даних сеансу на постійні носії для тривалого зберігання (архівування). [7]

Національний Центр Управління і Випробування Космічних Засобів на цей час є єдиною в Україні організацією, що забезпечує весь спектр заходів з експлуатації космічних систем різного призначення, зокрема дистанційного зондування Землі. Після проведеної у 2018 році у філії НЦУВКЗ – Центрі прийому та обробки спеціальної інформації та контролю навігаційного поля (ЦПОСІ та КНП) модернізації **універсальної наземної станції прийому інформації УНСП-8,2** (розташована у с. Залісці, Дунаєвецького р-ну, Хмельницької обл.) з'явилась можливість отримувати інформацію ДЗЗ від супутників серії «SuperView-1» (01, 02, 03, 04) та інших супутників типу SuperView. Встановлене у станції УНСП-8,2 нове програмне забезпечення дозволяє здійснювати декодування, розпаковку прийнятих станцією даних ДЗЗ з радіометричною корекцією та системною геометричною корекцією отриманих даних. [9]

Станція прийому інформації УНСП-8.2 призначена для здійснення прийому, демодуляції, реєстрації і передачі для подальшої обробки сигналів з КА ДЗЗ «SuperView-1» в X- діапазоні та виконання наступних функцій:

- наведення антени на КА і супровід його під час сеансу зв'язку;
- приймод радіосигналу КА і перетворення його в сигнал проміжної частоти;
- демодуляція прийнятого інформаційного сигналу проміжної частоти та перетворення його в бітовий потік;
- реєстрація інформації в темпі прийому;
- оперативне керування режимами роботи станції та документування результатів контролю і якісних показників прийому інформації. [9]

Основні технічні характеристики станції УНСП-8.2 наведені у табл. 1.10, а зовнішній вигляд станції УНСП-8.2 та її апаратного залу наведено на рис. 1.42, 1.43. [9]



Рис. 1.42 – Зовнішній вигляд станції УНСП-8.2



Рис. 1.43 – Зовнішній вигляд апаратного залу станції УНСПІ-8.2 [9]

Таблиця 1.10 – Основні технічні характеристики станції УНСПІ-8.2

Найменування характеристики	Значення
Тип антени	Дзеркальна параболічна
Діаметр дзеркала антени, м	12
Діапазон робочий частот, ГГц	7,700-8,500
Поляризація вхідного сигналу	крутова права, крутова ліва
Кількість каналів прийому даних корисного навантаження	5
Тип модуляції, швидкість прийому інформації	BPSK, QPSK, OQPSK, UQPSK, AQPSK, 8PSK
Швидкість прийому даних, Мб/с	до 500
Ширина діаграми спрямованості, кут. хв.	13,5±1,5
Управління АС	програмне, ручне
Тип опорно-поворотного пристрою	азимутально-кутомісна
Діапазон обертання по азимуту, град.	0±270
Діапазон обертання по куту місця, град.	7-85
Максимальна швидкість наведення по азимуту, град/с.	10
Максимальна швидкість наведення по куту місця, град/с.	5
ПППОІ має наступні основні функції:	прийом сигналів, що поступають по широкосмуговій радіолінії зв'язку безпосередньо з борта, перетворення їх у цифрову форму;
Максимальна динамічна похибка наведення при супроводженні за цілевказанням, кут. хв.	2
Максимально допустима швидкість вітру, м/сек.	25
Мінімальний час між сеансами, хв.	10

Таблиця 1.10 – Основні технічні характеристики станції УНСП-8.2 (продовження)

Посилення антенної системи, Дб	50
Чутливість приймального тракту, Дб	105
Кількість каналів прийому даних корисного навантаження	2
Енергоспоживання, кВт	2
Маса антенної системи, т	1,5

У Центрі космічних технологій Поліського національного університету (Україна, м. Житомир) за сприяння Національного Центру Управління і Випробування Космічних Засобів був створений Наземний інформаційний комплекс призначений для приймання й оброблення інформації (даних) ДЗЗ із закордонних та перспективних вітчизняних КА у метровому (*VHF*), дециметровому (*L*) і сантиметровому (*X*) діапазонах електромагнітного спектра, формування та надання споживачам звітних інформаційних документів за даними космічного знімання. Основними засобами наземного інформаційного комплексу Центру космічних технологій стали навчальна станція приймання інформації ДЗЗ НСПП-137 «Полісянка», наземна станція приймання інформації ДЗЗ НСПП-1.7 «Полісся» та наземна станція приймання інформації ДЗЗ НСПП-8.2 «Полісся». [10]

Наземна станція приймання інформації ДЗЗ НСПП-8.2 «Полісся» призначена для приймання, реєстрації та попереднього оброблення інформації ДЗЗ низької, середньої та високої просторового розрізнення із закордонних та перспективних вітчизняних КА у сантиметровому частотному діапазоні 7,7-8,5 ГГц (середня частота 8,2 ГГц), реєстрації та попереднього оброблення прийнятих даних (рис.1.44).



Рис. 1.44 – Зовнішній вигляд станції НСПП-8.2 [9]

Характеристики НСПП-8.2 «Полісся» представлені у таблиці 1.11. [10]

Таблиця 1.11 – Основні технічні характеристики станції НСПП-8.2 [10]

Діапазон частот	7,7 – 8 5 ГГц
Висота орбіт космічних апаратів ДЗЗ	400 – 36000 км
Діаметр параболічного рефлектора	5 0 м
Сектор повороту антени: за азимутом за кутом місця	0... ± 270 град 0...90 град
Макс. швидкість руху антени: за азимутом за кутом місця	14,0 град/с 4,0 град/с
Наведення антени	ручне, програмне, програмне з корекцією ЦВ
Максимальна похибка наведення антени	≤ 4,0 кут. хв.
Ширина діаграми спрямованості	0,5 град
Поляризація сигналу X- діапазону	кругова права та ліва
Модуляція сигналу X- діапазону	<i>BPSK, QPSK, OQPSK, UQPSK, 8PSK</i>
Швидкість передачі даних у каналі	≥ 75,0 <i>Mbps</i>
Максимальна тривалість сеансу	≤ 15 хв.
Час підготовки станції до сеансу	≤ хв.
Час налаштування станції на інший КА	≤ хв.
Живлення станції	380 В ±10%
Максимальна потужність споживання	≤ 2,0 кВт

Наземна станція приймання інформації ДЗЗ НСПП-1.7 «Полісся» призначена для приймання, реєстрації та попереднього оброблення інформації ДЗЗ низької та середньої просторового розрізнення з метеорологічних і природно-ресурсних закордонних та перспективних вітчизняних КА у дециметровому частотному діапазоні 1,6–1,71 ГГц, реєстрації та попереднього оброблення прийнятих даних(рис.1.45).



Рис. 1.45 – Зовнішній вигляд станції НСПП-1.7

Характеристики НСПП-1.7 «Полісся» представлені у таблиці 1.12. [10]

Таблиця 1.12 – Основні технічні характеристики станції НСПП-1.7 [10]

Діапазон частот	1,6 – ГГц
Висота орбіт космічних апаратів ДЗЗ	400 – 36000 км
Тип антени	Параболічна
Діаметр параболічного рефлектора	2,4 м
Сектор повороту антени: за азимутом за кутом місця	0... ± 180 град 0...85 град
Макс. швидкість руху антени: за азимутом за кутом місця	10,0 град/с 10,0 град/с
Наведення антени	ручне, програмне
Максимальна похибка наведення антени	≤ 6,0 кут. хв.
Ширина діаграми спрямованості	4,0 град
Поляризація сигналу	крутова права
Модуляція сигналу	<i>BPSK, QPSK</i>
Швидкість передачі даних у каналі	≤ 30 <i>Mbps</i>
Максимальна тривалість сеансу	≤ 15 хв.
Час підготовки станції до сеансу	≤ 1 хв.
Час налаштування станції на інший КА	≤ 1 хв.
Живлення станції	220 В ±10%
Максимальна потужність споживання	≤ 2,0 кВт

Навчальна станція приймання інформації ДЗЗ НСПП-137 «Полісянка» призначена для приймання та оброблення метеорологічних даних низької просторової розрізненості (1,0÷4,0 км), що передаються із метеорологічних КА у режимі прямого мовлення в метровому частотному діапазоні 137–138 МГц (рис.1.46). [10]



Рис. 1.46 – Зовнішній вигляд антени станції НСПП-137

Характеристики НСПП-137 «Полісянка» представлені у таблиці 1.13.

Таблиця 1.13 – Основні технічні характеристики станції НСПП-137 [10]

Діапазон частот	137–138 МГц
Висота орбіт космічних апаратів ДЗЗ	400 – 800 км
Тип антени	Турнікетна
Довжина 1/4– хв. вібраторів	538 мм
Довжина 1/2– хв. рефлекторів	1195 мм
Зона радіовидимості: за азимутом за кутом місця	360 град 0 – 90 – 0 град
Діаграма спрямованості	кругова
Кількість каналів приймання даних	1
Поляризація сигналу	кругова
Модуляція сигналу	ЧМ–АМ
Швидкість передачі даних у каналі	Аналоговий сигнал
Максимальна тривалість сеансу	≤ 16,0 хв.
Час підготовки станції до сеансу	≤ 5,0 хв.
Час налаштування станції на інший КА	≤ 2,0 хв.
Живлення станції	220 В; 12 В
Максимальна потужність споживання	≤ 0,5 кВт

Станції використовуються як для забезпечення споживачів інформації космічного спостереження, так і у навчальному процесі.

1.4.3 Оператори продажу космічних знімків та джерела даних аерокосмічних спостережень

Наразі існує багато компаній, які продають космічні знімки. Деякі з них мають власне угруповання космічних засобів, а деякі є суто інтеграторами та дистриб'юторами даних космічного знімання. Далі розглянуті найбільші з них.

Satellite Imaging Corporation (SIK) (<https://www.satimagingcorp.com/>) більше 40 років працює в галузях ДЗЗ та **геоінформаційних систем** (ГІС). На кожному ГІС проєкті забезпечується координація баз даних та даних зовнішніх джерел (таких як геологічні й топографічні карти, атрибути даних та шари ГІС), створюється єдине середовище відображення ГІС. Адреса доступу до ресурсів – <https://www.satimagingcorp.com/services/resources/>.

MAXAR (колишня *DigitalGlobe*, <https://www.maxar.com/>) є найбільшим постачальником даних космічного знімання та оператором супутників дистанційного зондування Землі надвисокого просторового розрізнення *WorldView-1* (розрізнення близько 50 см), *WorldView-2* (46 см), *WorldView-3,4* (31 см), *QuickBird* (61 см) і *IKONOS* (1 м). В 2013 році з корпорацією *DigitalGlobe* об'єдналася *GeoEye*, яка має власне супутникове угруповання, що

складається з апаратів: *OrbView-2*, *Orbview-3*, *OrbView-5*, *GeoEye-1* (41 см) . Має безліч наземних станцій, розташованих по всьому світу.

Airbus Earth Observation Satellite Imagery Services (<https://www.airbus.com/en/space/earth-observation/satellite-imagery/>) – це відділення *Airbus*, яке відповідає за продукти та послуги космічного спостереження. Це єдина компанія, яка надає доступ одночасно до даних радіолокаційних (*Radar Constellation*, *TerraSAR-X*) і оптико-електронних (*Pléiades-1,-2*, *KazEOSat-1*) КА високого розрізнення та даних з БПЛА. Джерелами знімків середнього просторового розрізнення є системи космічного знімання *SPOT*, *Envisat*, *Sentinel-1...6*. Адреса порталу – (<https://oneatlas.airbus.com/service/pleiades-neo>). Адреса пробного доступу до архиву знімків – <https://www.intelligence-airbusds.com/imagery/oneatlas/free-trial/>.

Geoserve (<https://www.geoserve.nl>) – це Нідерландський розповсюджувач супутникових знімків та похідних продуктів та послуг. *Geoserve* є експертом у мультисенсорних рішеннях. Має доступ до знімків понад 150 супутників, серед інших *Worldview-1,-2,-3,-4*, *Pleiades*, *GeoEye*, *SuperView-1*, *Kompsat*, *SPOT* , *Sentinel* тощо.

Planet Labs (<https://www.planet.com/>) – це американська приватна компанія, яку створили колишні співробітники NASA ще у 2010 році. Вона досліджує поверхню Землі за допомогою мініатюрних супутників формату *CubeSat*. Це маленького розміру супутники кубічної форми 10x10x10 см³ не важче 1,33 кг, які виводять на орбіту як попутне навантаження інших космічних об'єктів. Кожен такий супутник має власну назву, але загалом на них кажуть *dove* (англ. голуб). Їхній флот із понад 200 супутників для зйомки Землі є найбільшим в історії за час стеження за нашою планетою. Кожен «голуб» обладнаний потужним телескопом, камерою та сучасним програмним забезпеченням для знімання різних ділянок земної поверхні. Усі КА ведуть безперервне знімання Землі, що дозволяє щодня отримувати зображення поверхні з просторовою розрізненістю до 3,5 метрів.

Браузер екосистеми простору даних **Copernicus** Європейського космічного агентства слугує центральним вузлом для доступу, дослідження та використання величезного обсягу даних спостереження за Землею та навколишнього середовища, що надаються сузір'ями КА *Sentinel Copernicus*, допоміжними інженерними даними, даними на вимогу тощо. За допомогою браузера екосистеми простору даних *Sentinel Hub* користувачі можуть візуалізувати, порівнювати, аналізувати та завантажувати всі ці дані для різних застосувань, від моніторингу навколишнього середовища та ліквідації наслідків стихійних лих до міського планування та сільського господарства. можете отримати Доступ до браузера можна отримати за адресою: <https://browser.dataspace.copernicus.eu/>. Вікно сторінки браузера представлено на рисунку 1.47. Для використання даних космічного спостереження з метою навчання та для завдань, що не потребують високої оперативності та детальності рекомендується використовувати саме дані з КА *Sentinel Copernicus*.

1.4.4 Сервіси космічних знімків та карт

Google Maps (<https://maps.google.com>) – набір програм, побудованих на основі безкоштовного картографічного сервісу й технології, наданих компанією *Google*. Сервіс становить собою карту й супутникові знімки поверхні Землі. Для багатьох регіонів доступні повітряні знімки з високою детальністю (зняті з висоти 250–500 м), для деяких – з можливістю перегляду під кутом 45° з чотирьох сторін світу. Компанія *Google* виконує вимоги спецслужб країн із закриття інформації в районах знаходження об'єктів різного ступеня таємності. Із сервісом також зв'язаний додаток *Google* Планета Земля, що є окремою програмою.

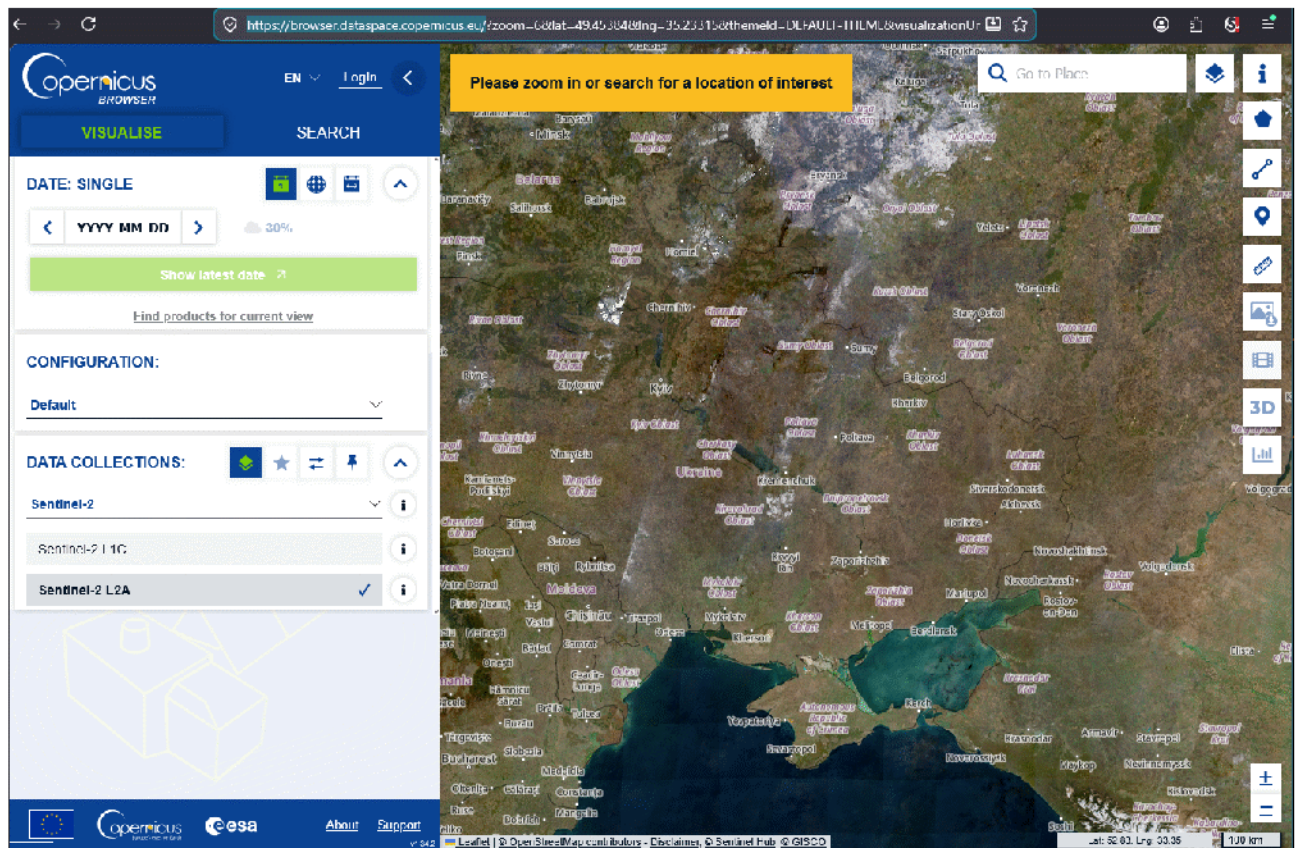


Рис. 1.47 – Сторінка браузера екосистеми простору даних *Copernicus*

Слід звернути увагу на шкалу масштабів, яка використана у цьому сервісі (табл. 1.14). Це так звана «z- шкала» – спеціалізована система подання масштабу і просторової розрізненості (детальності) зображень земної поверхні. Ця шкала з початку була розроблена для даних системи КА оптико-електронної розвідки США *Keyhole*. З появою компаній комерційного продажу знімків високого розрізнення шкала була застосована для визначення масштабу і просторової розрізненості цифрових зображень земної поверхні у багатьох компаніях та в програмному забезпеченні, яке застосовується для оброблення таких зображень. Наразі ця шкала є фактичним стандартом в галузі даних космічного знімання Землі. Вона починається з рівня 0, на якому земна куля вміщується на екрані кілька разів, і закінчується рівнем 23, на якому зображення наближено до детальності в кілька сантиметрів.

Таблиця 1.14 – Діапазон масштабів знімків, що надаються *Google Maps*

№	Шкала масштабу, м	м/піксел	z	Джерела зображень
1	10	0,16	19	Повітряне знімання
3	50	0,63	17	<i>DigitalGlobe/GeoEye</i>
7	1000	10,0	13	
8	2000	20,0	12	<i>LandSat-7</i>
...	...	...	...	...
20	10 000 000	83 333,33	0	

Google Maps API (<https://developers.google.com/maps/apis-by-platform>), дає можливість включити будь-яку карту з *Google Maps* на власному сайті, управляючи цією картою через *JavaScript*.

Google Планета Земля (*Google Earth*) – проєкт компанії *Google*, у рамках якого в мережі Інтернет були розміщені супутникові (або в деяких випадках аеро-) знімки всієї земної поверхні. Фотографії деяких регіонів мають надвисоке розрізнення. На відміну від інших аналогічних сервісів, що показують супутникові знімки у звичайному браузері (наприклад, *Google Maps*), у даному сервісі використовується спеціальна клієнтська програма *Google Earth*. Ця програма була випущена компанією *Keyhole*, а потім куплена *Google* та перероблена під сучасні умови веб- простору. [11]

Google Earth автоматично завантажує з Інтернету необхідні зображення й інші дані, зберігає їх у пам'яті комп'ютера й на жорсткому диску для подальшого використання. Завантажені один раз дані зберігаються на диску, і в наступних запусках програми закачуються тільки нові дані. Практично вся поверхня суші покрита зображеннями, отриманими від компанії *DigitalGlobe*, що мають детальність біля 15 м на **піксель**. Окремі ділянки поверхні мають кращу детальність (до 0,15 м). Наразі є браузерна версія програми *Google Планета Земля* (<https://earth.google.com/web/>), яка також може бути запущена зі сторінки *Google Map*.

Для візуалізації зображення використовується тривимірна модель земної кулі (з урахуванням висоти над рівнем моря). Саме в тривимірності ландшафтів поверхні Землі й полягає головна відмінність подання поверхні в програмі *Google Earth* від браузерного сервісу *Google Maps*. Користувачі можуть створювати свої власні мітки й накладати свої зображення поверх супутникових (це можуть бути карти, або більш детальні знімки, отримані з інших джерел).

Bing Maps (<https://www.bing.com/maps/>) – картографічний сервіс *Microsoft*, частина порталу *Bing*. Сервіси карт *Bing Maps* включають: *Bing Maps Aerial*, *Bing Maps Hybrid*, *Bing Maps Road*. Веб- сервіси карт *Bing Maps* можуть (як і *Google Maps*) використовуватися як джерело даних у ГІС.

Велику колекцію аеро- і космічних знімків надає *U.S. Geological Survey (USGS)* (https://pubs.usgs.gov/gip/AerialPhotos_SatImages/aerial.html).

Wikimapia (wikimapia.org) є картографічним проєктом колективного користування із відкритим змістом, який має на меті позначення всіх на світі

географічних об'єктів із внесенням про них корисної інформації. Він поєднує інтерактивну веб-карту і систему описання зображених об'єктів (рис. 1.48).

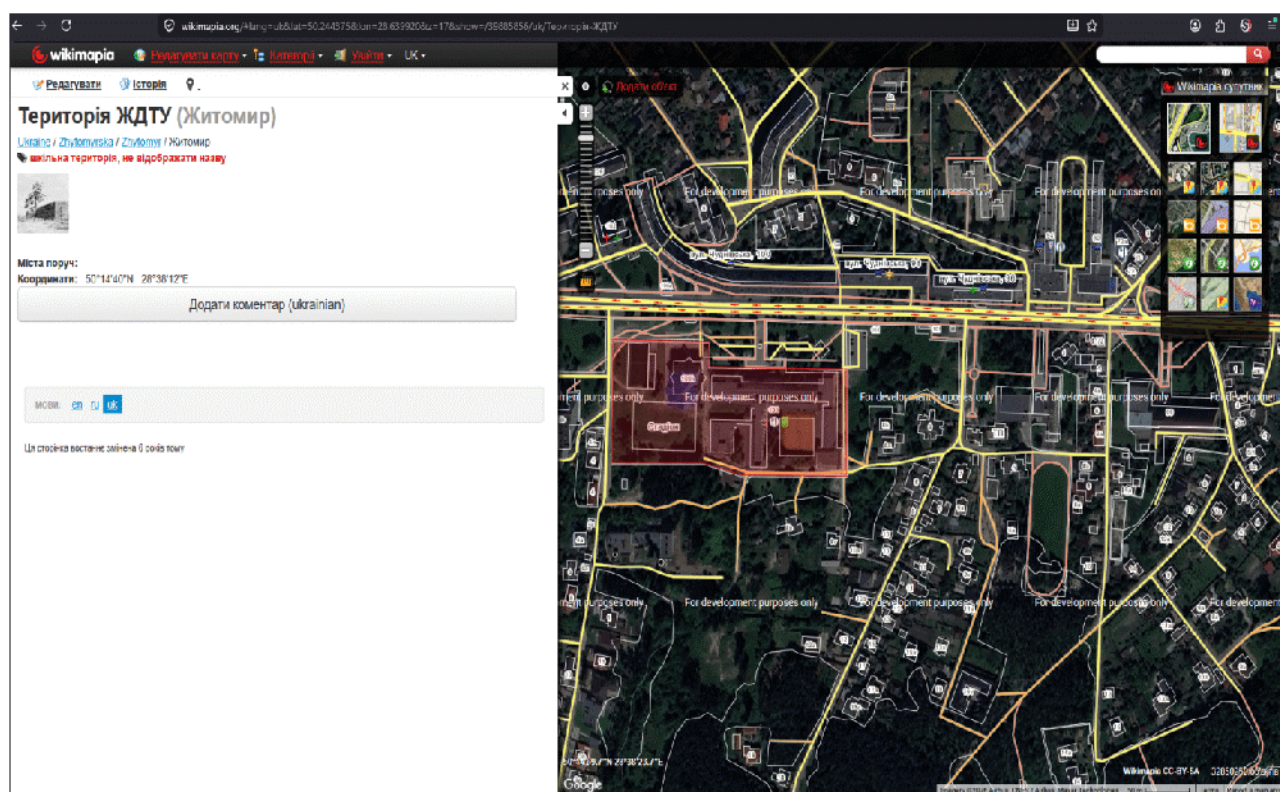


Рис. 1.48 – Вікно сервісу *Wikimapia*

Wikimapia – це інтерактивна карта, яку можна редагувати. Метою *Wikimapia* є створення і підтримання вільної, повної, багатомовної і актуальної карти всього світу. Нейтральна думка автора інформації є першорядною для опису будь-якого об'єкта *Wikimapia*. Різні режими виведення і типи карт забезпечують різні способи подання інформації: можна шукати певне місце, типи об'єктів, отримати інформацію про певний об'єкт, наземні світлини тощо. Шар позначок *WikiMapia* можна підключити до програми *Google Earth*. *Wikimapia* використовує систему масштабування з рівнів. Рівень масштабування зазначено у адресному рядку браузера.

1.4.4 Спеціальне програмне забезпечення для завантаження даних повітряно-космічного спостереження з відкритих джерел

Програма *SAS.Планета* (© 2007-2023), Команда розробників *SAS.Планета*, <http://www.sasgis.org/>) призначена для завантаження супутникових карт високого розрізнення з багатьох різних сервісів, що надають їх. Вона зберігає всі завантажені ділянки карт на локальному комп'ютері на необмежений час. Завдяки цьому стає можливим мати раніше переглянуті карти навіть без підключення до Інтернету. Програма дозволяє працювати з картами високого просторового розрізнення декількох сервісів: карти й супутник *Google*, *ArcGIS*, *Wikimapia*, карти *OSM* тощо. Програма не вимагає інсталяції та реєстрації. [12]

Після встановлення та запуску програма видає інтерфейс, що показаний на рисунку 1.49. Основні елементи управління програмою позначені цифрами.

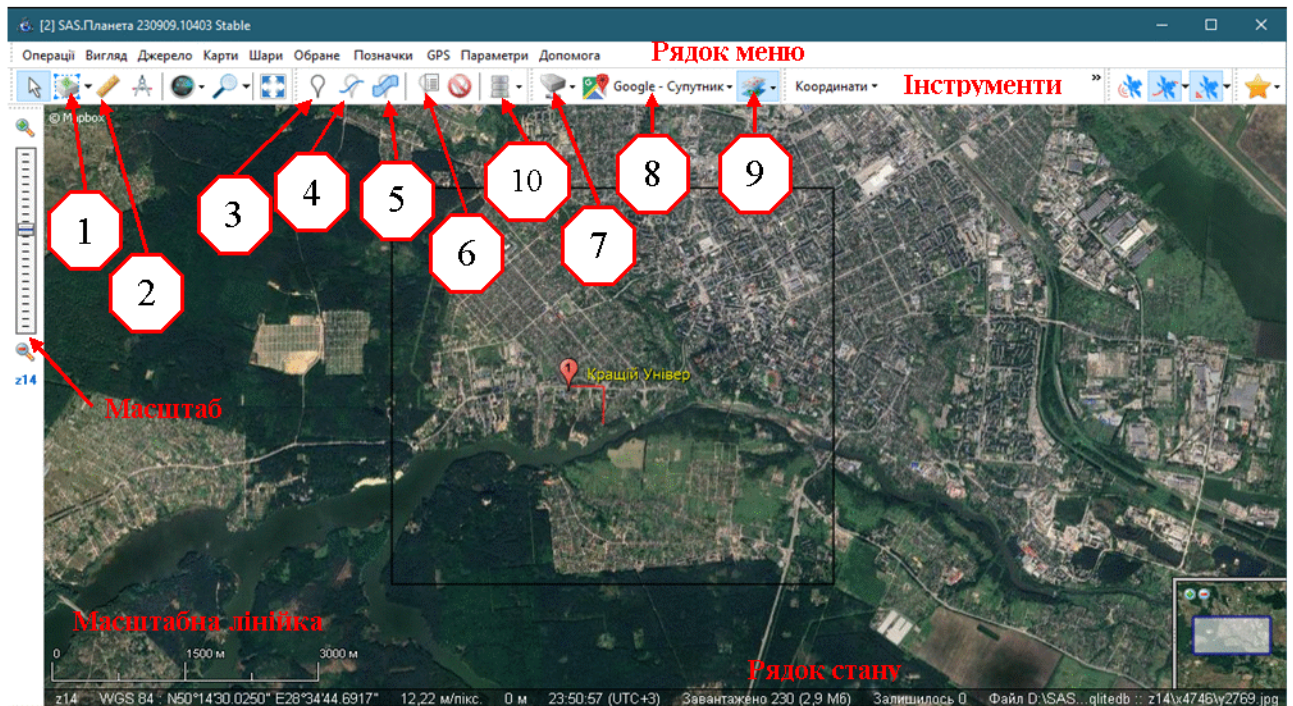


Рис. 1.49 – Вікно програми *SAS.Планета*

1. Операції з виділеною областю. Призначена для визначення і позначення меж потрібного зображення (знімка або карти).

2. Вимірювання відстаней. Дозволяє визначити дві точки на поверхні із зазначенням відстані між ними.

3. Додати мітку. Для додавання позначки та напису з будь-якою інформацією.

4. Додати шлях. Для додавання лінії на карту.

5. Додати полігон. Для додавання меж певної ланки з виміром площ і відображенням на карті.

6. Управління мітками. Відображає всі зроблені мітки, лінії і полігони в програмі. Призначений для групування даних за категоріями, експорту й імпорту даних.

7. Вибір джерела знімків і карт. Вибір джерела звідки буде завантажуватися інформація. Можливі варіанти: з Інтернету – нові дані, з кешу – дані, які вже були переглянуті колись та разом з Інтернету та кешу.

8. Вибір основного шару карти. Основний шар карти (в даному випадку – супутникові знімки *Google*) це той, поверх якого можна накладати додаткові шари інших карт для їх сумісного відображення і аналізу.

9. Вибір додаткових шарів. Для накладання інформації поверх основного шару карти (може бути позначення населених пунктів, межі тощо).

10. Вибір шарів зроблених позначок для їх відображення.

Поточна інформація по карті відображається у рядку стану (рис. 1.50).

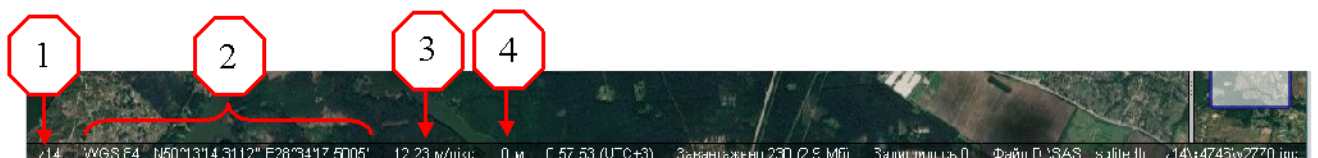


Рис. 1.50 – Рядок стану програми *SAS.Планета*

1. Масштаб завантаженого шару карти. Показує з значення масштабу.
2. Координати курсору в геодезичній системі координат (*WGS-84*) [B,L; град., хв., с]. Потрібна система координат може бути визначена у налаштуваннях.
3. Поточний піксельний масштаб зображення [м/пікс.].
4. Висота точки над рівнем моря [м].

Далі в рядку відображається інформація про завантаження основного шару карти: час, обсяг, стан та джерело завантаження.

SAS.Планета дозволяє працювати в режимі накладення різних тематичних шарів один на одного. Тобто поверх основної карти можна додати будь-який шар із представлених в даному пункті меню. Додавати тій чи інший шар можливо або через меню «Шари» або за допомогою інструменту (див. рис. 1.49, 9). Можливо включати і вимикати шари, комбінувати і накладати один на одного як завгодно.

Програма дозволяє вимірювати відстані між точками на карті або знімку. Розрахувати відстань до будь-якого об'єкта на карті можна використовуючи інструмент «Виміряти відстань» (див. рис. 1.49, 2).

Для пошуку координат, назв, міток, потрібно використати відповідний інструмент. Його за потребою можна включити в меню «Вид» – «Панелі» – «Пошук» (рис.1.51). На панелі інструментів з'явиться інструмент пошуку, в якому можна обрати джерело пошуку та що саме потрібно знайти (рис.1.52). Інший варіант пошуку – скористатися інструментом «Перехід до» на панелі інструментів (рис.1.53).

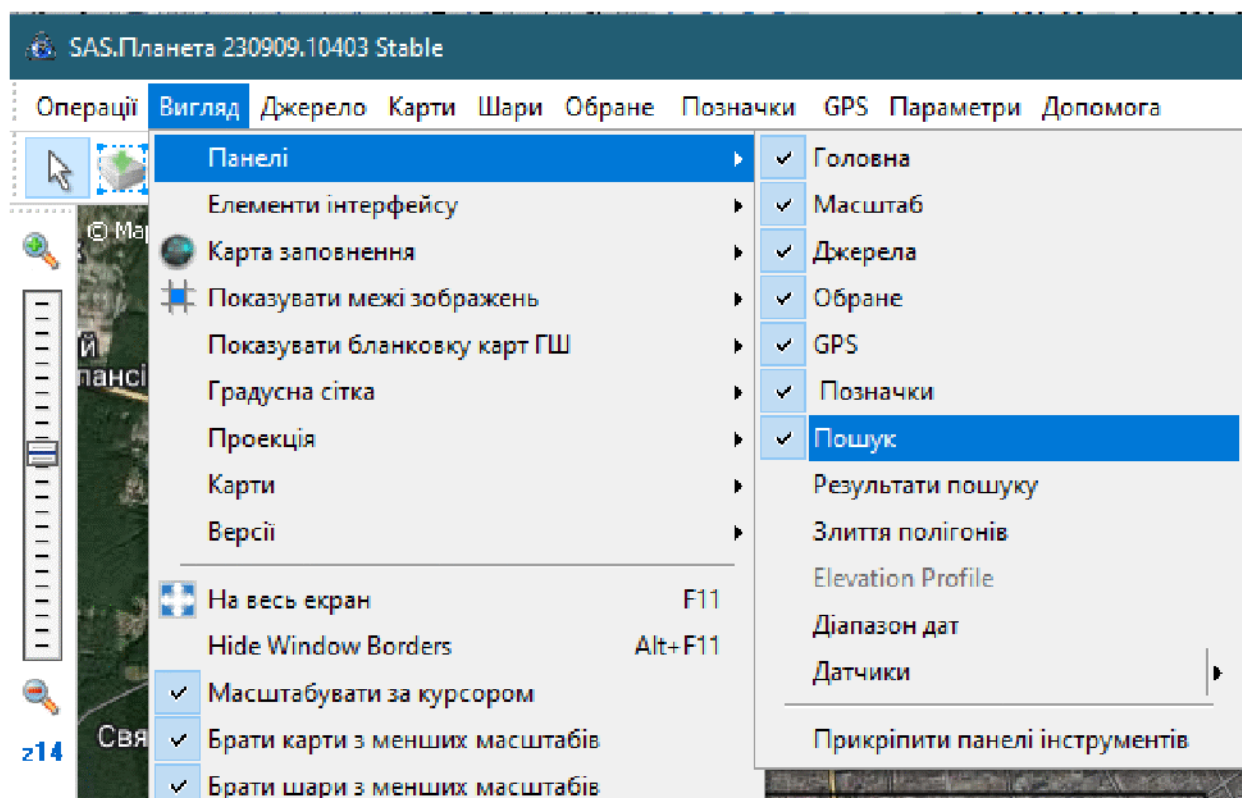


Рис. 1.51 – Підключення інструменту пошуку

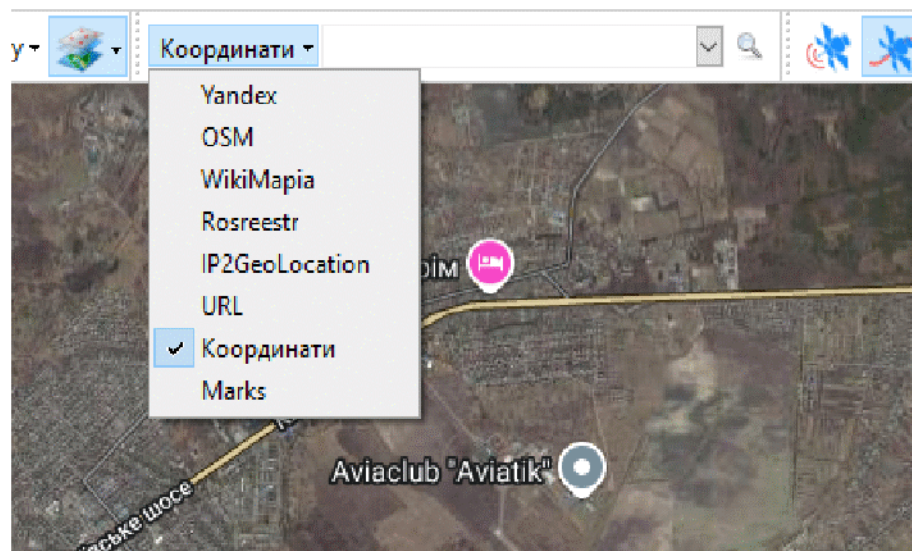


Рис. 1.52 – Меню пошуку

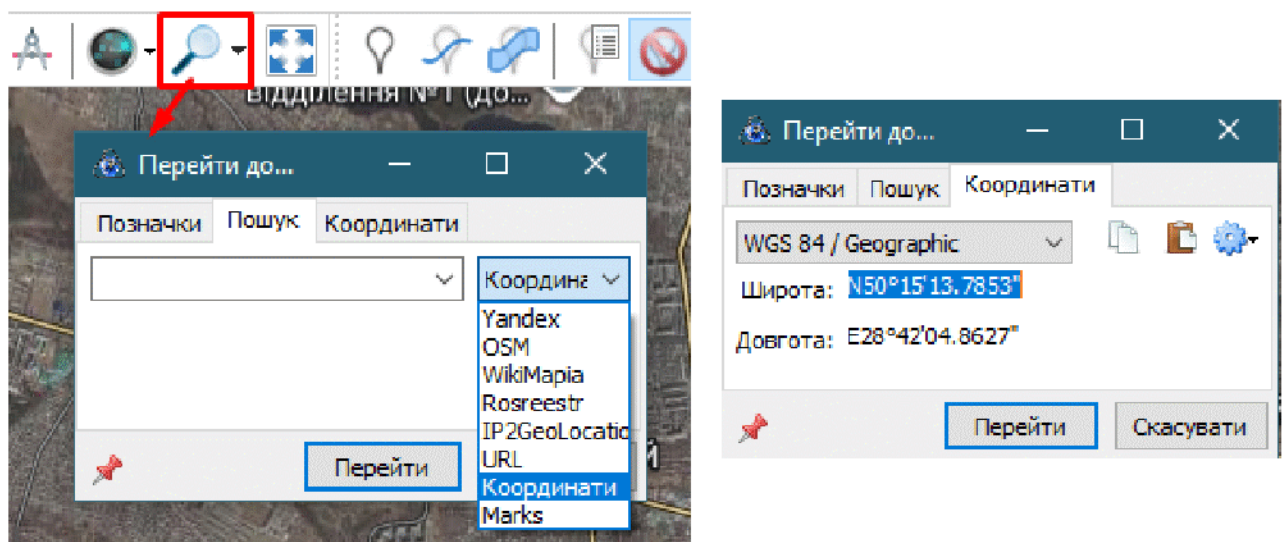


Рис. 1.53 – Меню пошуку з інструменту «Перехід до»

Порядок завантаження потрібних растрів супутникових зображень та карт викладений далі.

Після запуску програми необхідно вибрати джерело (режим), звідки буде відтворюватись інформація: з Інтернету, з або разом з Інтернету та кешу. (див. рис. 1.49, 7)

Далі необхідно вибрати сервіс, що буде джерелом завантаження зображення основного шару – (див. рис. 1.49, 8).

Для завантаження зображення з певного сервісу для початку необхідно виділити потрібну ділянку. Можливо вибрати за декількома варіантами виділення: прямокутною областю, полігональною областю, виділенням за шляхом, виділенням за координатами або за розміром зображення на екрані (рис.1.54).

Для виділення прямокутною областю – потрібно вказати мишкою лівий верхній кут ланки і розтягнути прямокутник до нижнього лівого кута (рис.1.55).

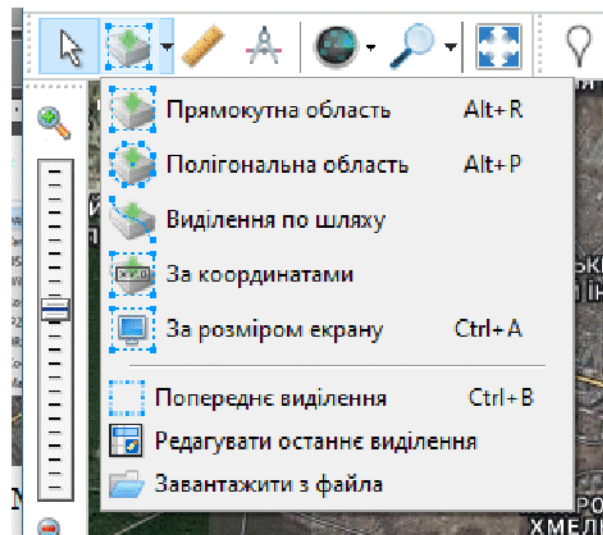


Рис. 1.54 – Меню інструмента виділення ділянки

Полігональний метод виділення дозволяє вибрати зону абсолютно довільного виду. Для цього необхідно зробити клік мишкою на границі майбутнього виділення, потім продовжити кліками виділяти границю потрібної ділянки (рис.1.56). Для корегування вершин фігури можливо скористатись інструментами корегування з маленького віконця.

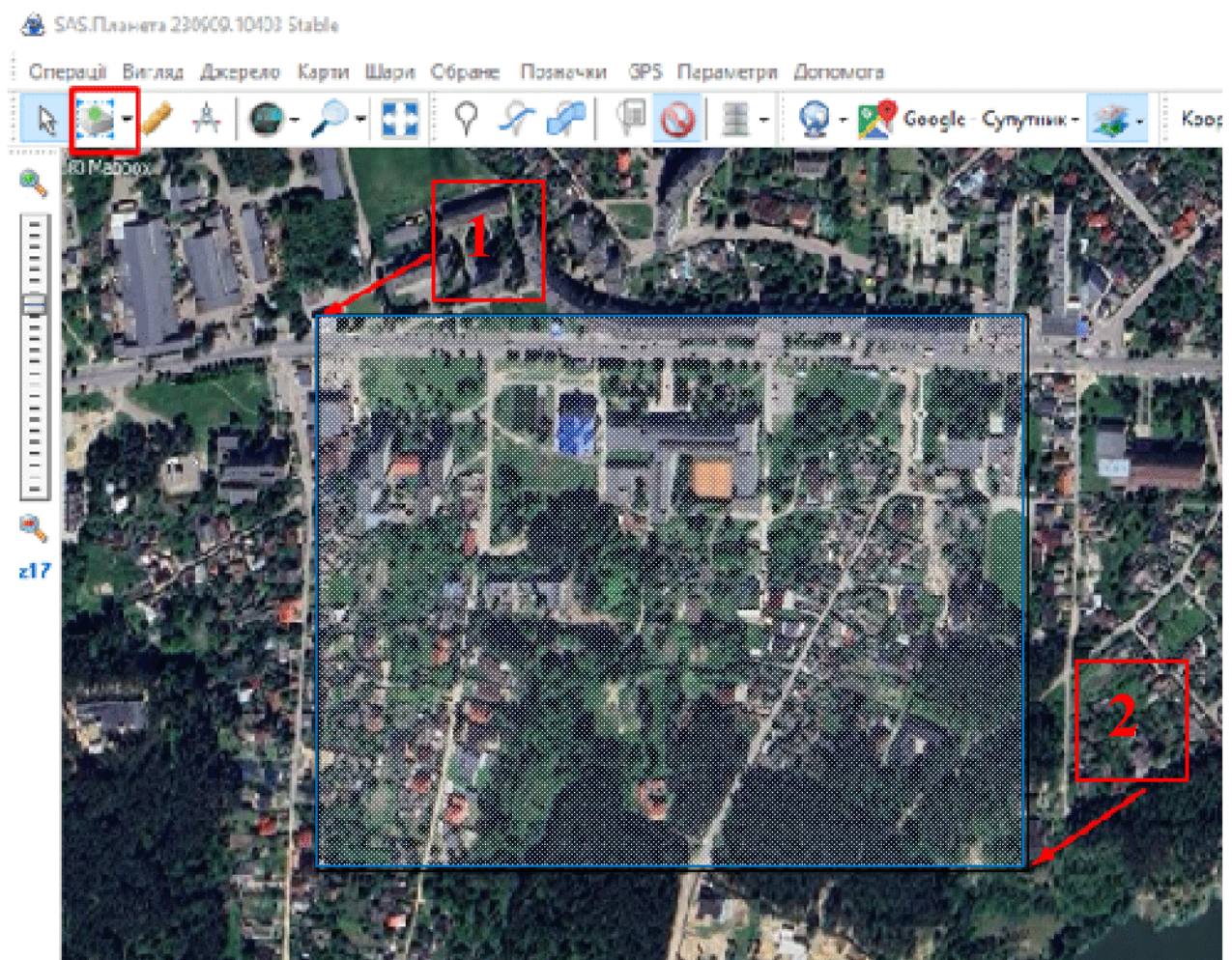


Рис. 1.55 – Виділення прямокутною областю

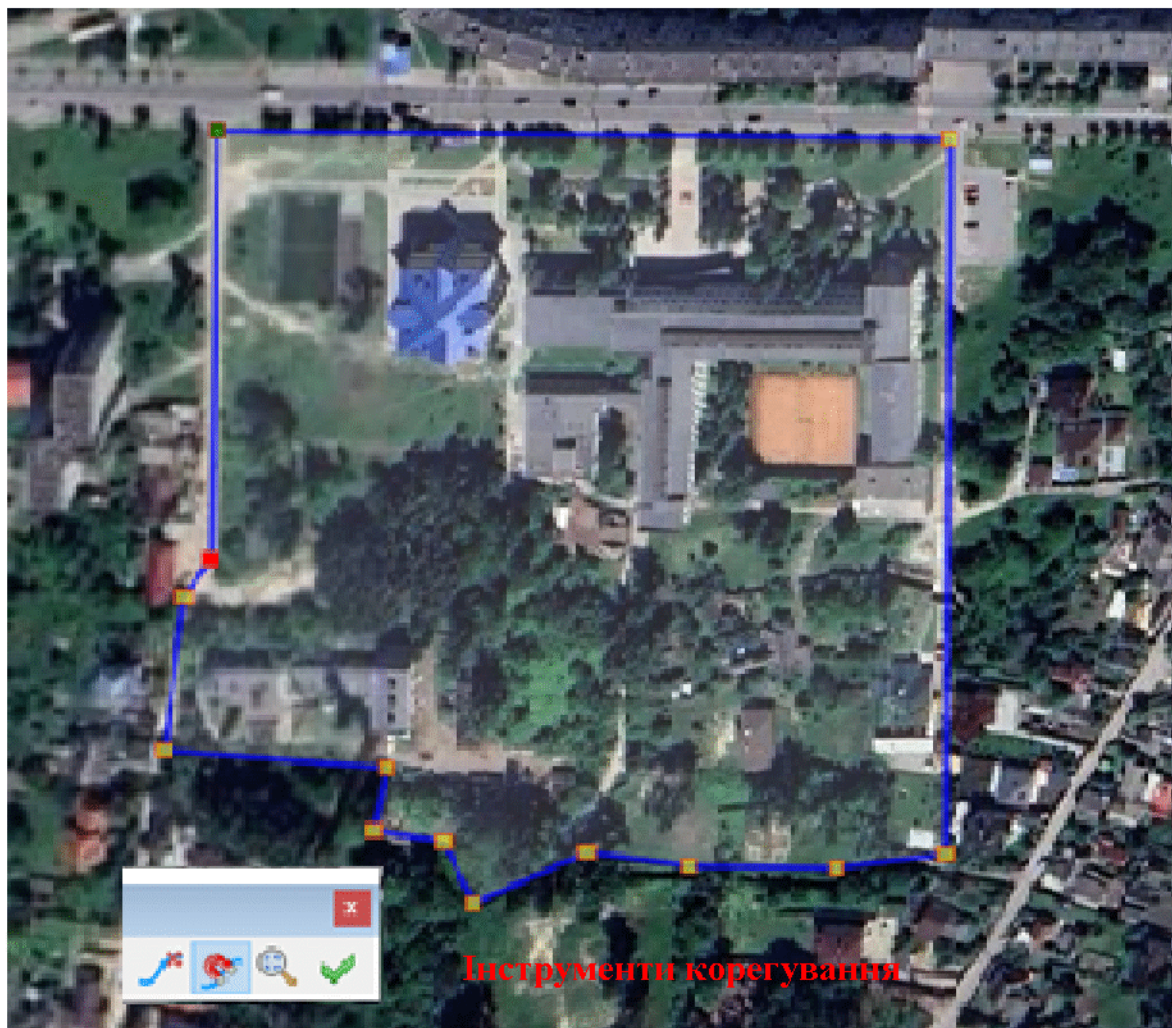


Рис. 1.56 – Виділення полігональною областю

Після формування потрібної фігури, слід натиснути кнопку «Enter». З'явиться діалогове вікно «Операції з виділеною областю» на вкладці «Завантажити». В полях вкладки необхідно проконтролювати джерело постачання зображень, встановити потрібні значення масштабування та інші параметри завантаження за потребою і натиснути кнопку «Почати» (рис.1.57).

Починається процес завантаження тайлів потрібного зображення. **Тайли** – це квадратні маленькі (128x128 або 256x256 пікселів) ланки растру зображення у тому вигляді, як вони зберігаються у базі даних на сервісі. Процес завантаження може тривати відчутно довго у залежності від обсягу даних потрібного зображення та швидкості Інтернету. Хід процесу відображається у спеціальному вікні (рис.1.58). Результатом завантаження буде повідомлення від програми «Обробка файлів завершена».

Завантажені на локальний комп'ютер тайли потрібно зібрати у єдиний растр зображення – «склеїти». Програма це робить автоматично, але потрібно налаштування до певних потреб. Для склеювання завантажених тайлів потрібно у інструменті «Виділення» вибрати «Попереднє виділення» або , якщо ще не закрито вікно контролю завантаження, натиснути у його нижньому лівому куті кнопку  – «Попереднє виділення» (рис. 1.59). Далі у вікні «Операції з виділеною областю» перейти до вкладки «Склеїти»

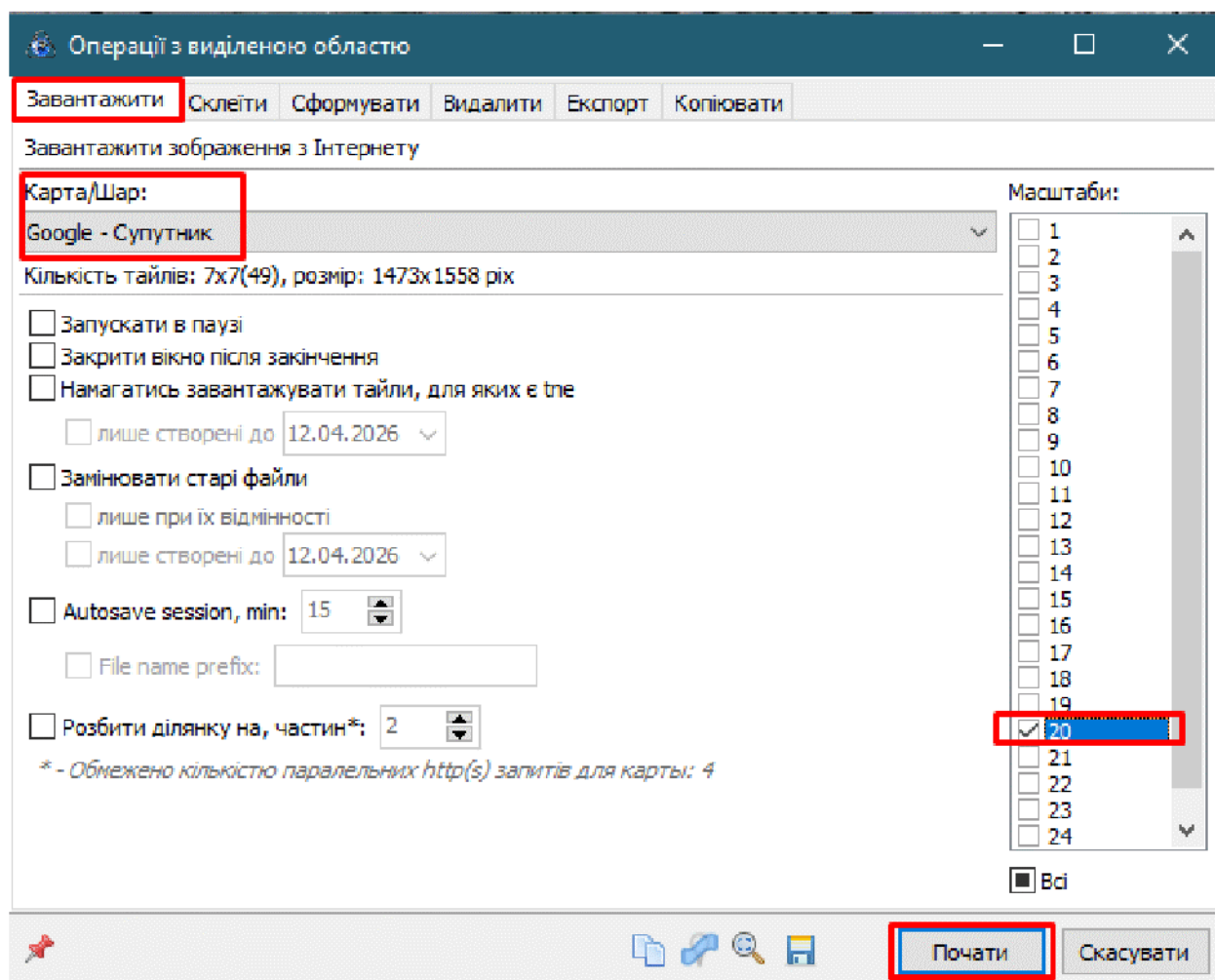


Рис. 1.57 – Встановлення параметрів завантаження

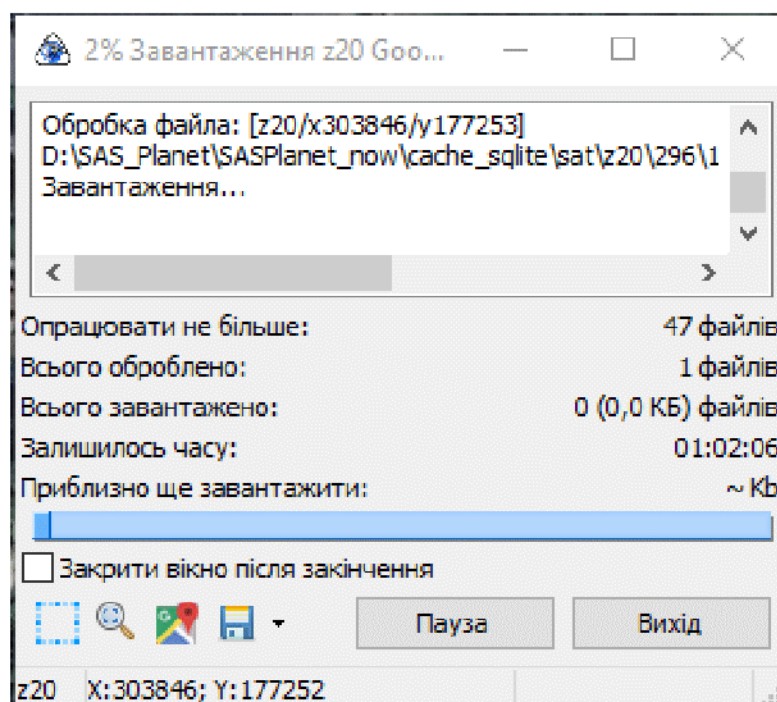


Рис. 1.58 – Вікно контролю процесу завантаження

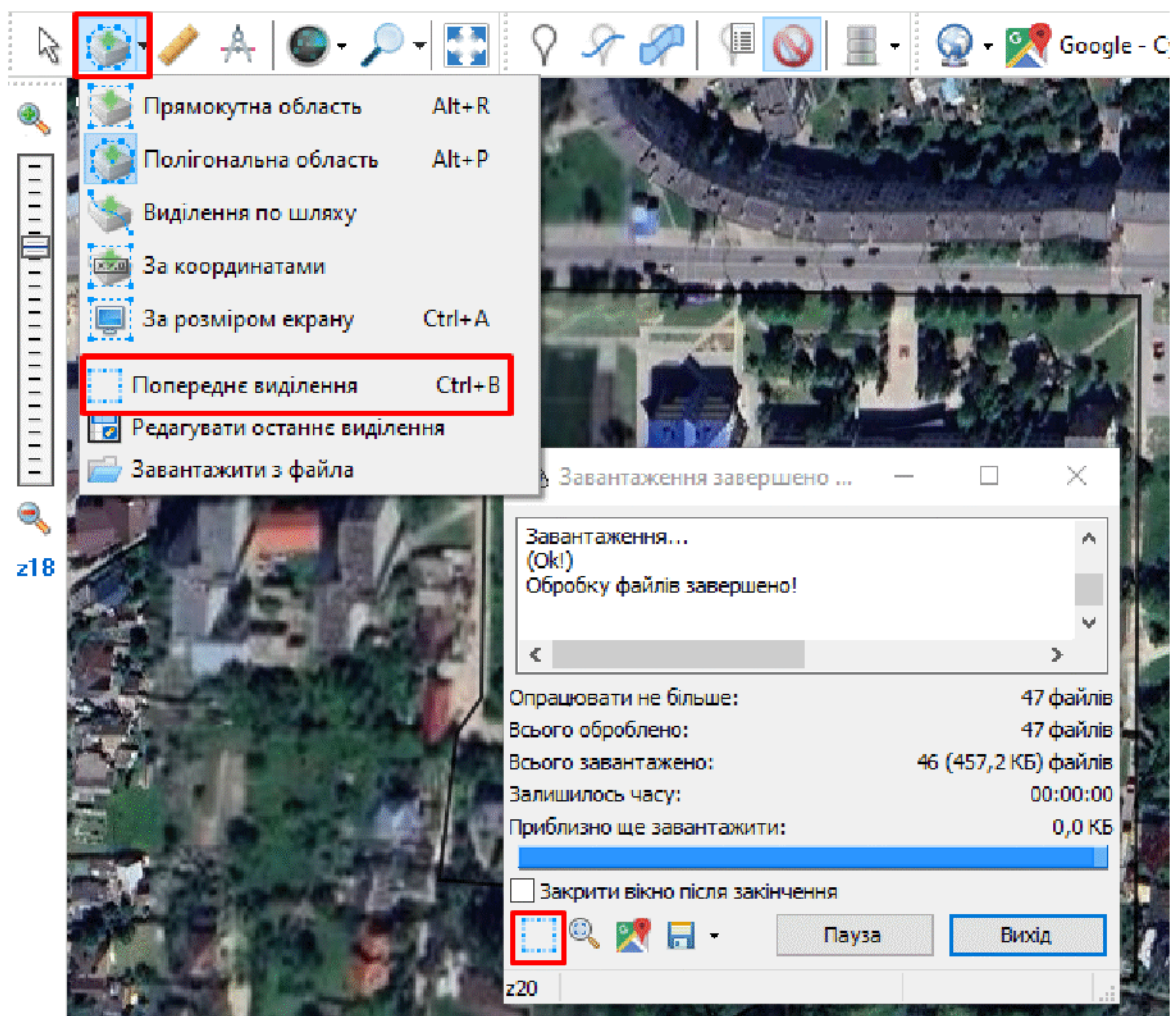


Рис. 1.59 – Перехід до попереднього виділення

На вкладці «Склеїти» потрібно обрати наступні параметри створення єдиного растру зображення (рис. 1.60).

1. Результуючий формат вихідного файлу растру зображення.
2. Директорію для збереження результатів склеювання.
3. Тип карти (джерело завантажених тайлів) – з чого склеювати.
4. Масштаб (z), у якому буде створене зображення (та детальність). Важливо: за замовченням тут встановлене значення масштабу зображення, яке наразі присутнє на екрані, а не масштаб завантажених тайлів!
5. Накласти шар – інформаційний шар, який за потребою можна накласти на зображення (назви місць, кордони, інші позначення тощо).
6. Проекцію зображення, яка потрібна.
7. Файл геоприв'язки – файл, що додається до файлу растру зображення і є необхідним для визначення координат пікселів растру зображення. Він матиме ту саму назву, що і файл растру зображення, але інше розширення. Розширення цього файлу слід обирати відповідно до вимог програми (чи то системи), яка буде обробляти чи візуалізувати це зображення. Розширення «.tab» використовують більшість навігаторів; розширення «.kml» належить універсальному стандарту обміну розмітки

карт і імпортується більшістю картографічних програм; розширення «.w» імпортується усіма програмами обробки аерокосмічних знімків тощо.

8. За потребою можна налаштувати додаткові параметри накладання шарів, попереднього оброблення та збереження геоприв'язки.

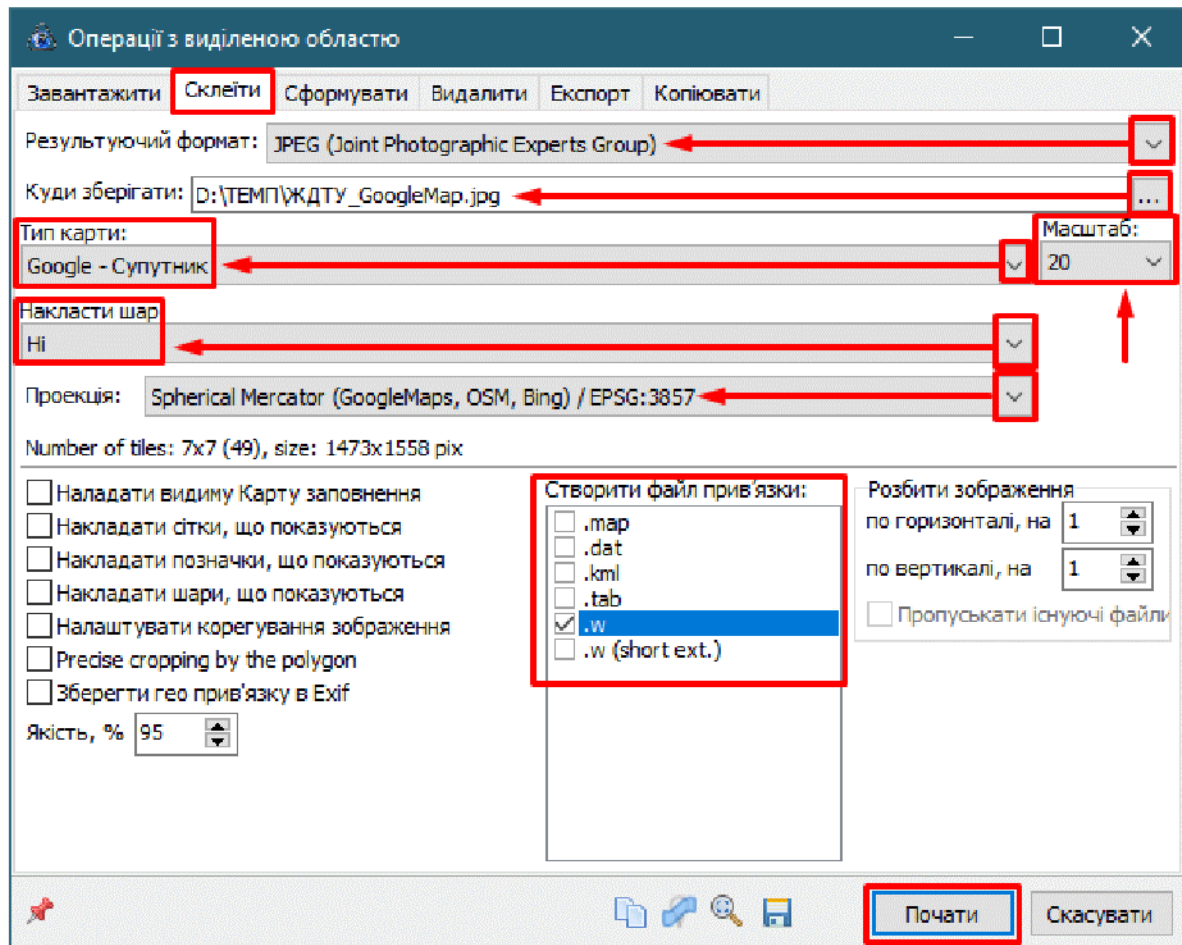


Рис. 1.60 – Налаштування параметрів збирання зображення з тайлів

Після завершення визначення налаштувань слід натиснути кнопку «Почати». Почнеться процес створення єдиного зображення з визначеними параметрами. По закінченню операції склеювання у зазначеній директорії з'явиться результуючий файл растру зображення та файли геоприв'язки.

Для експортування завантаженого зображення у форматах баз даних та інших програм потрібно перейти у вкладку «Експорт» вікна «Операції з виділеною областю» і вибрати потрібні параметри – масштаби, режими накладення, джерело, шлях збереження та формат експорту та натиснути кнопку «Почати» (рис.1 61).

Періодично з різних причин сервіси даних аерокосмічного знімання та карт змінюють параметри доступу до даних. В такому разі сервіс може стати недоступним і знадобиться налаштувати нові параметри завантаження. Для встановлення параметрів завантаження необхідно в меню «Параметри», відкрити вкладку «Налаштування» та відкрити для змін «Параметри карти» (рис. 1.62). Необхідно вказати (чи змінити) наступні параметри завантаження.

1. URL (http://server.arcgisonline.com/ArcGIS/rest/services/World_Imagery/MapServer/tile/) – джерело, картографічної інформації.

2. Версія карти – для завантаження знімків періодично цей параметр необхідно оновлювати. Або він буде оновлений при завантаженні та встановленні поточного оновлення карт з сайту *SASGIS*.

3. Директорія в кеші (*sat*) – директорія на диску де фізично розміщуються ланки растрів (тайли) потрібного сервісу.

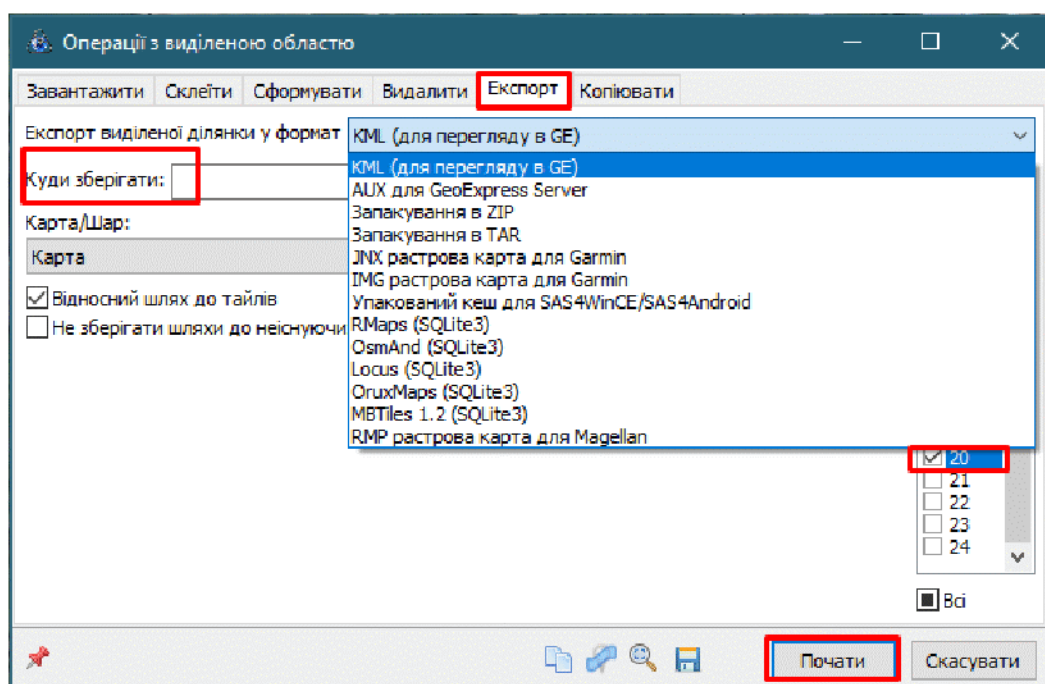


Рис. 1.61 – Експортування зображення у форматах баз даних та інших програм

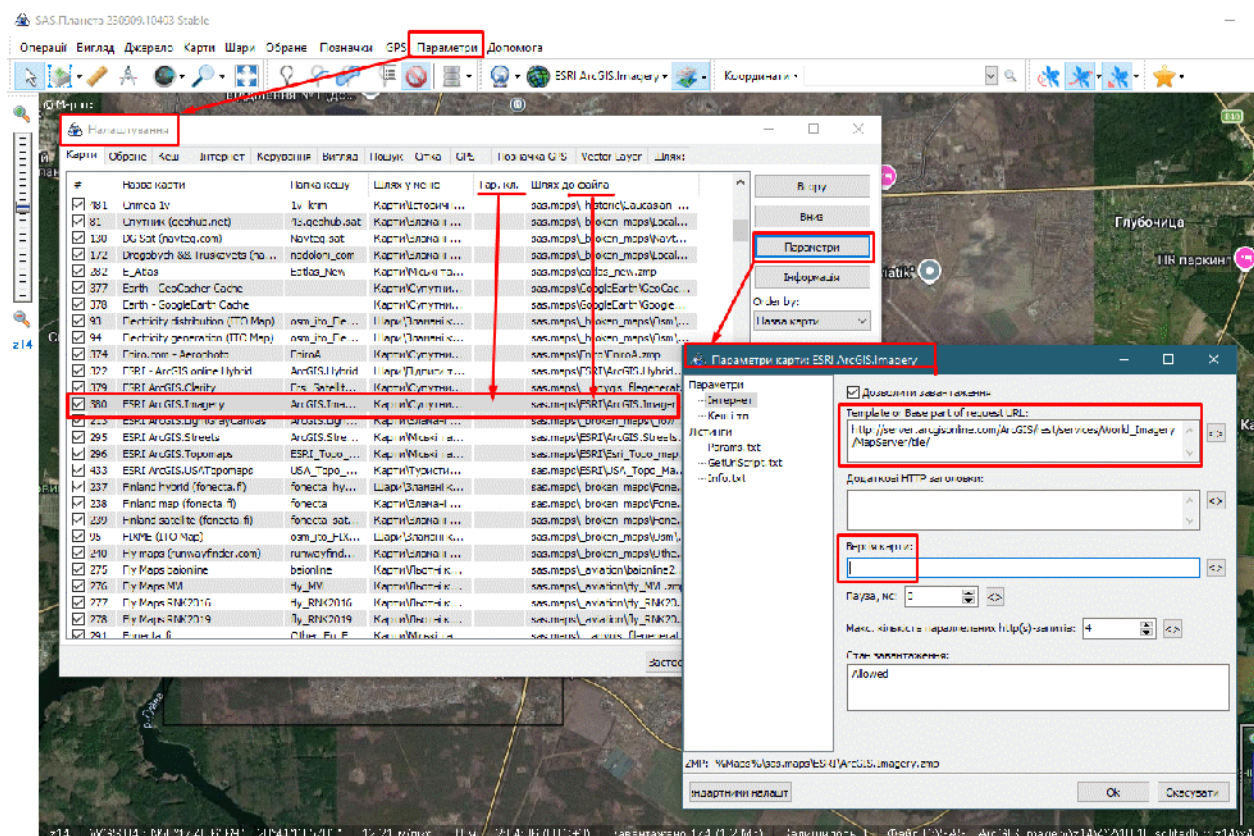


Рис. 1.62 – Налаштування параметрів завантаження даних

При виконанні практичних завдань виникає необхідність підключення до вже завантажених даних на локальному комп'ютері. Вони мають стати новим джерелом. Для цього необхідно зробити наступні кроки.

1. Завантажити директорію з потрібними даними на локальний диск в директорію програми у директорію *cache*.

2. Встановити в параметрах джерела карти шлях до директорії *cache*: в меню «Параметри» відкрити вкладку «Налаштування» та відкрити для змін «Параметри карти»; у рядку нового джерела у стовпці «Папка в кеші» записати шлях до папки *cache*.

Контрольні питання

1. Що розуміють під терміном «Дистанційне зондування Землі (ДЗЗ)»?
2. Як поділяється частотний діапазон випромінювань за довжиною хвилі?
3. Яке територіальне охоплення у глобальних знімків та у локальних космічних знімків?
4. Що розуміють під терміном «растр цифрового зображення»?
5. Що є просторовою розрізненістю аерокосмічного знімка?
6. Які види розрізненості визначають для космічних зображень?
7. Як поділяють знімальну апаратуру залежно від спектральної розрізненості та кількості спектральних каналів?
8. Який проміжок довжин хвиль електромагнітного спектра займає видимий діапазон випромінювань?
9. Скільки спектральних каналів може мати багатоспектральний (мультиспектральний) знімок?
10. Скільки спектральних каналів може мати гіперспектральний знімок?
11. Як класифікують космічні знімки за просторовою розрізненістю?
12. Скільки відтінків сірого можна закодувати за допомогою одного байта?
13. Які сили діють на космічний апарат після виведення його на орбіту?
14. Якою приймається модель Землі для математичного моделювання незбуреного руху космічного апарата?
15. Яку форму має незбурена орбіта КА?
16. Що розуміють під термінами «апогей» та «перигей»?
17. Які значення мають перша і друга космічні швидкості щодо Землі біля її поверхні?
18. Що означає поняття «Сидеричний період обертання КА»?
19. Що означає орбітальний параметр «Нахилення орбіти»?
20. Що означає орбітальний параметр «Велика піввісь орбіти»?
21. Що означає орбітальний параметр «Ексцентриситет орбіти»?
22. Що характеризує параметр «Час проходження КА через перигей»?
23. Яке нахилення мають прямі, зворотні, екваторіальні та полярні орбіти?
24. Які сидеричні періоди обертання навколо Землі мають стаціонарні та синхронні орбіти?
25. Які орбіти називають сонячно-синхронними?
26. Яким є радіус стаціонарної орбіти для Землі?
27. В чому особливість положення КА відносно поверхні Землі якщо він знаходиться на геостаціонарній орбіті?
28. Які потрібні дані для побудови траси КА?
29. На які орбіти запускають комерційні оптико-електронні космічні апарати спостереження?
30. На які орбіти запускають телекомунікаційні космічні апарати ретранслятори зв'язку та телебачення?
31. Як задається орбіта КА в програмі моделювання руху КА «Orbitron»?
32. Які параметри розраховуються в результаті розрахунку положення Сонця в програмі «Orbitron»?
33. Які параметри розраховуються в результаті розрахунку положення КА в програмі моделювання руху КА «Orbitron»?

34. Який вид знімальної апаратури має найкращу просторову розрізненість знімків та дозволяє розрізнити об'єкти на знімках за їх температурою та матеріалом поверхні?
35. Який вид знімальної апаратури має можливість виявляти та досліджувати об'єкти, що закриті поверху непрозорим, але і не електропровідним матеріалом та оцінювати вологість поверхонь?
36. Які функції виконує бортовий забезпечувальний комплекс КА?
37. Які функції виконує бортовий інформаційний комплекс КА?
38. Як визначаються смуга захоплення та смуга огляду знімального засобу КА?
39. Що є основними джерелами випромінювання, яке реєструється пасивними засобами аерокосмічного спостереження?
40. Як за довжинами хвиль визначені діапазони космічного оптико-електронного знімання: видимий, ближній, середній та тепловий інфрачервоні?
41. Які фізичні процеси впливають на потік сонячного світла в процесі його проходження крізь атмосферу?
42. Якими астрономо-географічними факторами визначається величина природної денної освітленості ландшафту?
43. Якими метеорологічними факторами визначається величина природної денної освітленості ландшафту?
44. З яких компонент складається освітленість земної поверхні?
45. Що розуміють під терміном «альbedo»?
46. Яким мав бути тип орбіти КА системи космічного спостереження Січ-2?
47. Як за довжинами хвиль був визначений панхроматичний діапазон знімання для КА системи космічного спостереження Січ-2?
48. Яку проєкцію кроку пікселів у надирі мав датчик МСУ-8 КА системи космічного спостереження Січ-2?
49. Яку ширину смуги огляду в надирі мав датчик МСУ-8 КА системи космічного спостереження Січ-2?
50. В яких межах КА системи космічного спостереження Січ-2 мав відхиляти напрямок полю зору знімальної апаратури?
51. Скільки фотоприймальних елементів мають лінійні ПЗЗ- фотоприймачі багатозональної оптико-електронної апаратури знімання МСУ-8?
52. Яка схема використана в конструкції об'єктиву оптичної системи багатозональної оптико-електронної апаратури знімання МСУ-8?
53. Як спрямовують антени радіолокатора бокового огляду?
54. Чим визначається значення пікселів радіолокаційного знімка земної поверхні?
55. Як на радіолокаційному знімку відображається спокійна водна поверхня?
56. Як на радіолокаційному знімку відображаються металеві споруди?
57. Як можна досягти покращення детальності радіолокаційних знімків поперек напрямку польоту?
58. Як можна досягти покращення детальності радіолокаційних знімків уздовж напрямку польоту?
59. Яка інформація передається з КА на землю по спеціальній радіолінії в системах аерокосмічного спостереження?
60. Які діапазони несучих частот використовують спеціальні радіолінії «Борт – ПППОІ» в системах аерокосмічного спостереження?
61. Якою може бути швидкість передачі інформації по спеціальній радіолінії «Борт – ПППОІ»?
62. Які види модуляції сигналу використовують в спеціальній радіолінії «Борт – ПППОІ»?
63. Якою є максимальна швидкість приймання інформації по спеціальній радіолінії для станції УНСПІ-8.2?
64. Який вид поляризації використовують антени спеціальній радіолінії «Борт – ПППОІ»?
65. Звідки програма SAS.Планета завантажує ланки карт та космічних зображень?
66. В якій послідовності відбувається процес отримання геоприв'язаного знімка земної поверхні за допомогою програми SAS.Планета?

2 ПРИНЦИПИ, МЕТОДИ І ЗАСОБИ ОБРОБКИ ДАНИХ ПОВІТРЯНО-КОСМІЧНИХ СПОСТЕРЕЖЕНЬ

2.1 Зміст та принципи первинної обробки даних повітряно-космічних спостережень

2.1.1 Зміст первинної обробки даних повітряно-космічних спостережень

У загальному випадку обробка даних космічного знімання включає три основних етапи: попередню обробку; первинну обробку; вторинну (тематичну) обробку.

В процесі попередньої обробки відбувається перетворення даних космічного знімання (записаного під час сеансу зв'язку цифрового потоку) безпосередньо в зображення, а також перетворення їх у формати, зручні для подальших видів обробки.

Первинна обробка призначена для підготовки знімків до тематичної обробки і поділяється в загальному випадку на радіометричну та геометричну.

Радіометрична обробка пов'язана з перетворенням значень яскравості пікселів зображення. Вона може включати радіометричну корекцію, атмосферну корекцію, поліпшення візуальної якості зображень (гістограмні операції, зміна яскравості контрасту, фільтрація тощо).

Радіометрична корекція – усуває розбіжності значень яскравості пікселів, яке відбувається в результаті неоднакових характеристик фотоприймальних елементів знімального обладнання (лінійок ПЗЗ).

Атмосферна корекція – корекція впливу атмосфери на значення (яскравість) пікселів у кожному спектральному каналі.

Гістограмні операції, зміна яскравості та контрасту – зміна вигляду гістограми зображення, з метою зміни контрастів та яскравостей на зображенні у різних діапазонах значень.

Радіометрична, атмосферна корекція, зміна яскравості та контрасту, гістограмні операції, здійснюються за допомогою яскравістних поелементних перетворень.

Яскравістні поелементні перетворення оперують з **окремими пікселями зображення** з метою корегування нелінійності фотоприймальних елементів та дисплеїв (радіометрична корекція), управління контрастом, яскравістю зображення тощо.

Фільтрація – призначена для виділення об'єктів, усунення шумів, підкреслення структурних ліній, згладжування зображення тощо. Фільтрація поділяється на два класи: фільтрація в просторовій області та фільтрація з використанням спектральних перетворень (Фур'є, Адамара, Хаара, косинусне, вейвлет- перетворення тощо).

Методи фільтрації в просторовій області засновані на прямих операціях з значеннями (яскравостями) пікселів зображення в певному околі простру зображення. Просторова фільтрація, оперуючи над ділянкою зображення навколо кожного пікселя здійснює виконання таких операцій, як підвищення різкості зображення, підкреслення меж об'єктів на зображеннях, згладжування (розмазування) тощо.

2.1.2 Радіометричні спотворення оптико-електронних знімків та їх корегування

Зазвичай фотодетектори (елементи фотоприймальної лінійки ПЗЗ знімальної апаратури) що створюють зображення мають нелінійні та неоднакові характеристики передачі яскравості. Тому перша задача первинної обробки – це проведення корегування на зображенні яскравісної поелементної нелінійності фотоприймачів (радіометричне корегування).

Модель цифрової системи оптико-електронного знімання з корегуванням нелінійності цифрового датчика може бути представлена наступною схемою (рис.2. 1).

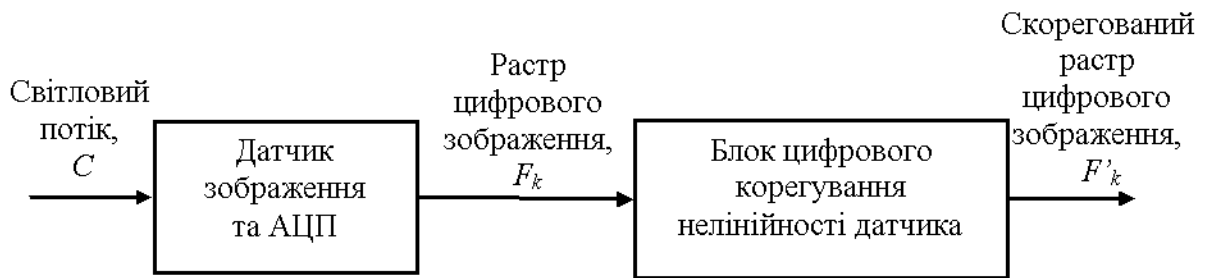


Рис. 2.1 – Модель цифрової системи оптико-електронного знімання з корегуванням нелінійності цифрового датчика

На рисунку:

C – вхідна яскравість (енергія) світлового потоку що приходить на датчик,
 F_k – цифрове значення сигналу що сформоване фотоприймачем після АЦП,
 F'_k – скореговане цифрове значення сигналу.

Процес формування зображення фотоприймачем описуються функціоналом $F=Q_R(C)$, де Q_R – характеристика перетворення енергії світлового потоку C в цифрове значення F фотоприймачем. Типова характеристика передавання енергії світла відеодатчиком Q_R наведена на рисунку 2.2, а. Необхідно знайти функцію Q_R для перетворення значень $F'=Q_R(F)$, яке має виконувати блок цифрового коригування, щоб загальна (наскрізна) характеристика корегованої системи була лінійною (рис. 2.2, б). Типові зони викривлень радіометричної характеристики датчика та приклади зображень з відповідними викривленнями показані на рисунку 2.3. [13]

Ще до встановлення знімальної апаратури на КА проводять випробування характеристики передачі яскравості для кожного фотоприймача у лінійці ПЗЗ Q_R . У наслідок для кожного фотоприймача отримують залежність цифрованого значення сигналу зображення F від значень енергії потоку випромінювання C , що падає на фотоприймачі (рис. 2.4, а). На основі отриманій в результаті іспитів дискретну функцію передачі рівнів детектора будують зворотну дискретну функцію, що відображає F в C (рис. 2.4, б). Далі методами поліноміальної апроксимації будують гладку аналітичну зворотну функцію (рис 2.4, в).

Зазвичай корегувальна функція розраховується заздалегідь і закладається в пам'ятовуючий пристрій коригувального блоку у вигляді таблиці відповідності, в якій кожному дискретному вхідному значенню сигналу F_k ставиться у відповідність вихідне значення F'_k .

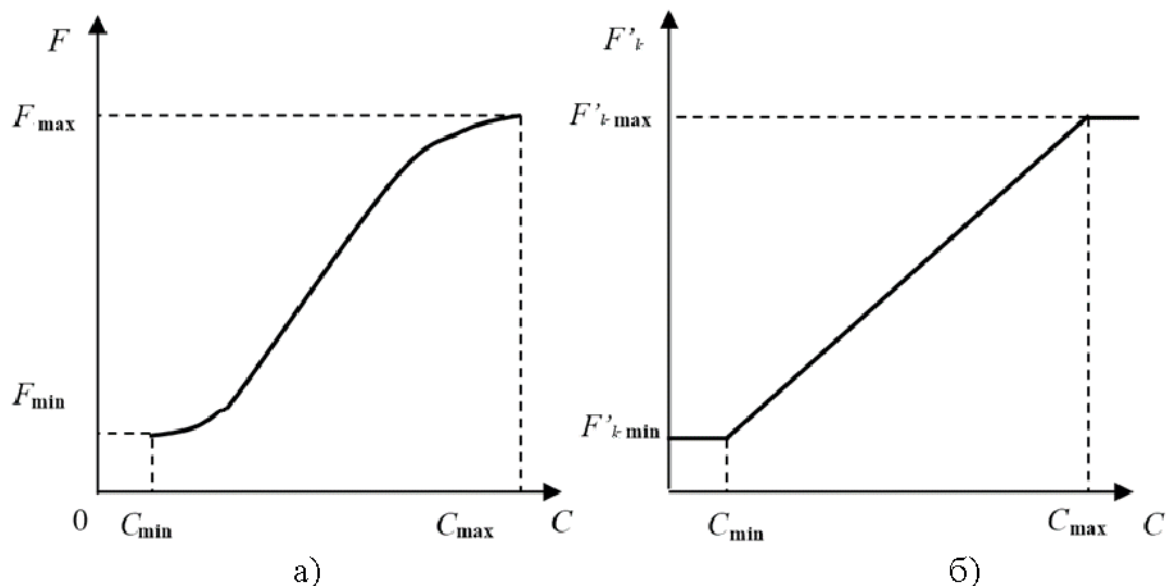


Рис. 2.2 – Характеристики представлення енергії світла C в цифрове значення F : а – типова характеристика передавання рівнів C відеодатчика; б – загальна характеристика корегованої системи знімання

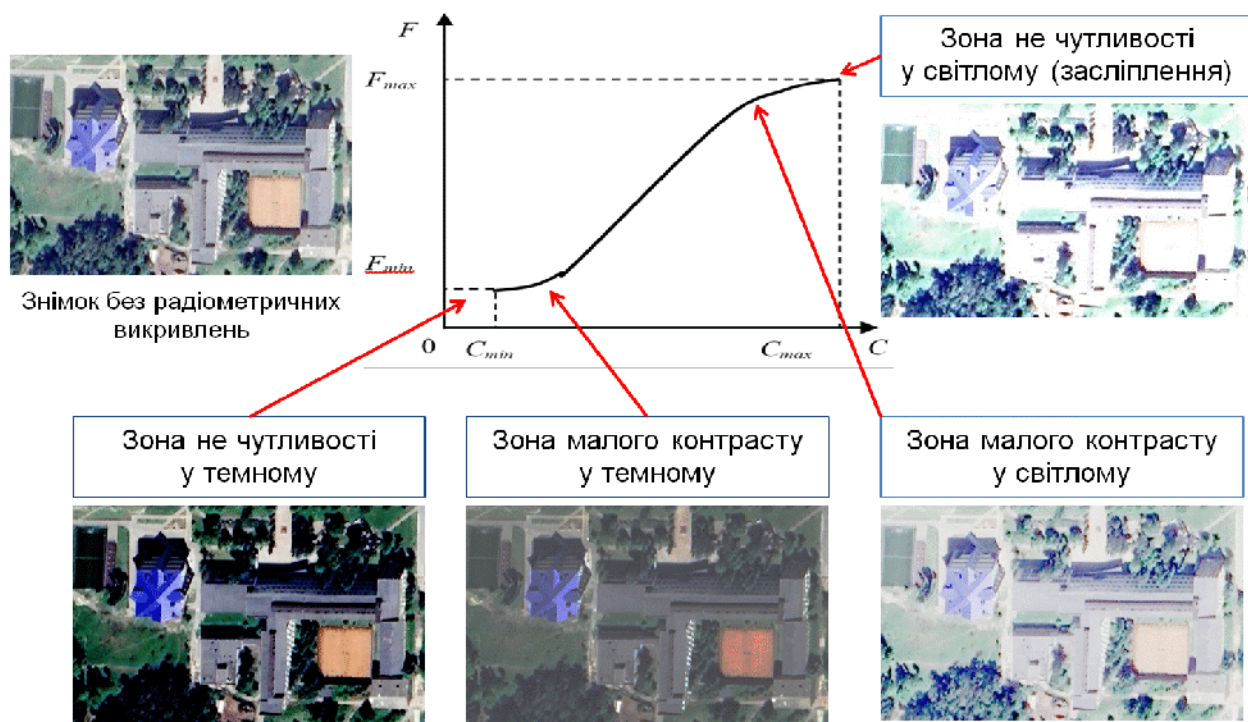


Рис. 2.3 – Типова характеристика передавання енергії світла фотоприймачем та зображення з типовими радіометричними викривленнями

В разі застосування будь-яких нелінійних перетворень значень слід пам'ятати, що вони завжди призводять до появи хибних контурів на місцях повільних тонових переходів та до втрати об'єктів з малим контрастом. [13]

Сучасні цифрові системи знімання використовують ПЗЗ фотоприймачі, характеристика передачі рівнів яких дуже близька до лінійної. В такому разі потреби в корегуванні нелінійності немає: потрібно лише скорегувати відмінності у порозі чутливості у темному та динамічному діапазоні (підсиленні) для елементів лінійки ПЗЗ. Функція корегування буде мати вигляд: $F' = \alpha \cdot F + \beta$. За

рахунок додавання постійного рівня β у сигнал корегується порогова чутливість у темному. Шляхом регулювання підсилення α встановлюється відповідність динамічного діапазону вхідного потоку випромінювань $[C_{\min} - C_{\max}]$ динамічному діапазону фотоприймача та АЦП $[0 - F_k]$.

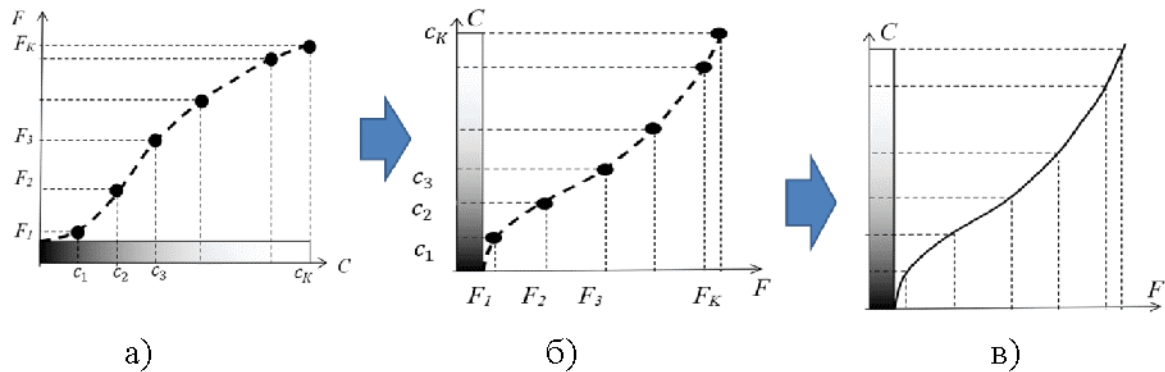


Рис. 2.4 – Створення коригувальної функції: а – виміряна залежність цифрованого значення сигналу зображення F від енергії потоку випромінювання; б – зворотна дискретна функція для корегування; в – побудова аналітичної функції корегування

Засоби візуалізації (монітори, принтери, проектори тощо) також вносять нелінійні викривлення у подання яскравості елементів зображення (пікселів). Найтиповішою характеристикою що описує викривлення дисплеїв є степенева функція з показником степеню, що дорівнює 2,2 (рис. 2.5).

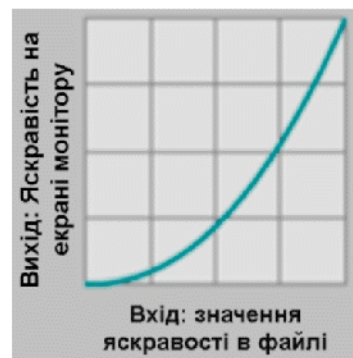


Рис. 2.5 – Типова характеристика передавання значень пікселів у рівні яскравості на моніторі

Це призводить до зменшення контрастів в темних тонах та збільшення контрастів в світлих тонах. Для усунення таких викривлень зображення перед записом в файл піддають гамма-корекції. **Гамма-корекція** – процес візуалізації зображення на моніторі це процес корегування зображення з метою адаптації до зорового сприйняття людиною зображення, а також компенсації яскравісних нелінійностей засобів відновлення зображень. Наскрізний процес гама-корегування в процесі отримання зображення на моніторі показаний на рисунку 2.6. Криві на графіках – функції передавання яскравостей елементів і системи разом. Процес складається з двох наступних кроків.

1. Гамма-корегування датчика та системи реєстрування (гама файлу). Це перетворення застосовується знімальною системою або програмним

забезпеченням при запису файлу зображення. Показник степеневі функції перетворення при запису файлу із зображенням звичайно дорівнює $1/2,2$.



Рис. 2.6 – Процес гама-корекції в процесі візуалізації зображення на моніторі

2. Гамма-корегування дисплея усуває викривлення, що відображає сумарний вплив відеокарти і монітора.

Сумарний вплив двох гамма-перетворень зображення (гамма-корегування системи) не рідко називають «гаммою перегляду». Для точного відображення наскрізна характеристика подання рівнів у системі в ідеалі має бути близька до прямої лінії.

Найбільш характерними радіометричними спотвореннями сучасних оптико-електронних цифрових знімків є слабкий контраст та надмірна або занижена яскравість. Втрата піктонових рівнів у «чорному» (у найтемнішій частині діапазону яскравостей) та у «світлому» (у світліших піктонах) також є суттєвими радіометричними спотвореннями, але вини не можуть бути кореговані у процесі обробки. Їх появі можна тільки запобігти під час попереднього налаштування параметрів експозиції знімальної апаратури для конкретних умов знімання.

Нелінійні радіометричні викривлення не є суттєвими для сучасних засобів знімання, що побудовані на матрицях або лінійках ПЗЗ світлочутливих елементів. Їх характеристики передавання яскравості в цифрові значення є лінійними на значній ланці діапазону яскравості і перед зніманням оператори налаштовують параметри апаратури саме на цю ланку.

Усування спотворень контрасту і яскравості на знімках здійснюється шляхом застосування спеціальних корегувальних функцій, які є у більшості професійних растрових редакторів на кшталт *Photoshop* (комерційний програмний продукт) *GIMP* (вільна ліцензія). Надалі усунення спотворень контрасту і яскравості на цифрових знімках розглянуто саме у *GIMP*.

Слабкий контраст – найбільш розповсюджений дефект аерокосмічних зображень. Рисунок 2.7 ілюструє типову корегувальну характеристику передачі рівнів, що потрібна для підвищення контрасту малокоонтрастних зображень, у яких весь діапазон значень пікселів сконцентрований в світлих тонах.

Величину контрасту вихідного зображення задає кут нахилу δ характеристики перетворення (кут від вертикалі). При зменшенні цього кута контрасти збільшуються, при збільшенні кута – зменшуються (рис. 2.8).

Слід зауважити, що в процесі збільшення контрасту в діапазоні яскравостей вихідного зображення деякі рівні яскравості можуть не використовуватися. Унаслідок цього можуть виникнути помітні хибні контури (постеризація зображення).

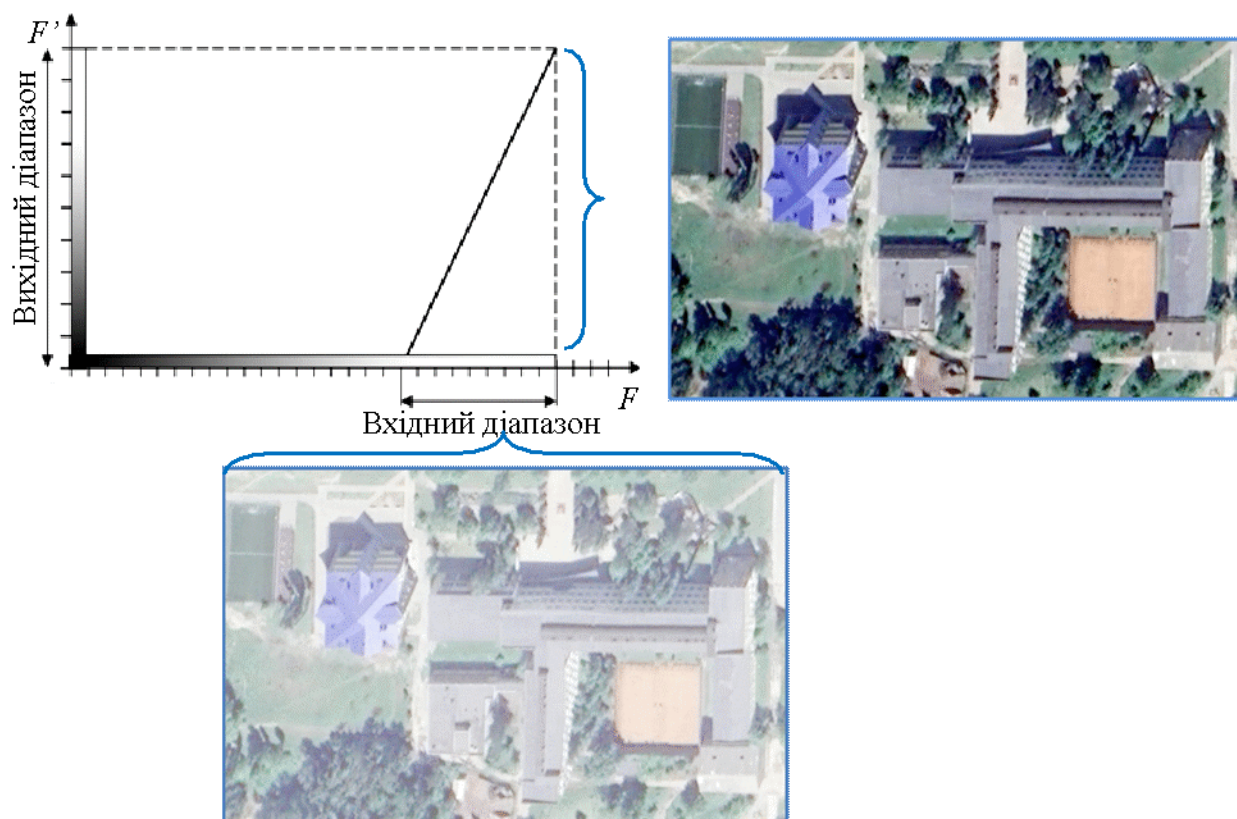


Рис. 2.7 – Процес гама-корекції в процесі візуалізації зображення на моніторі

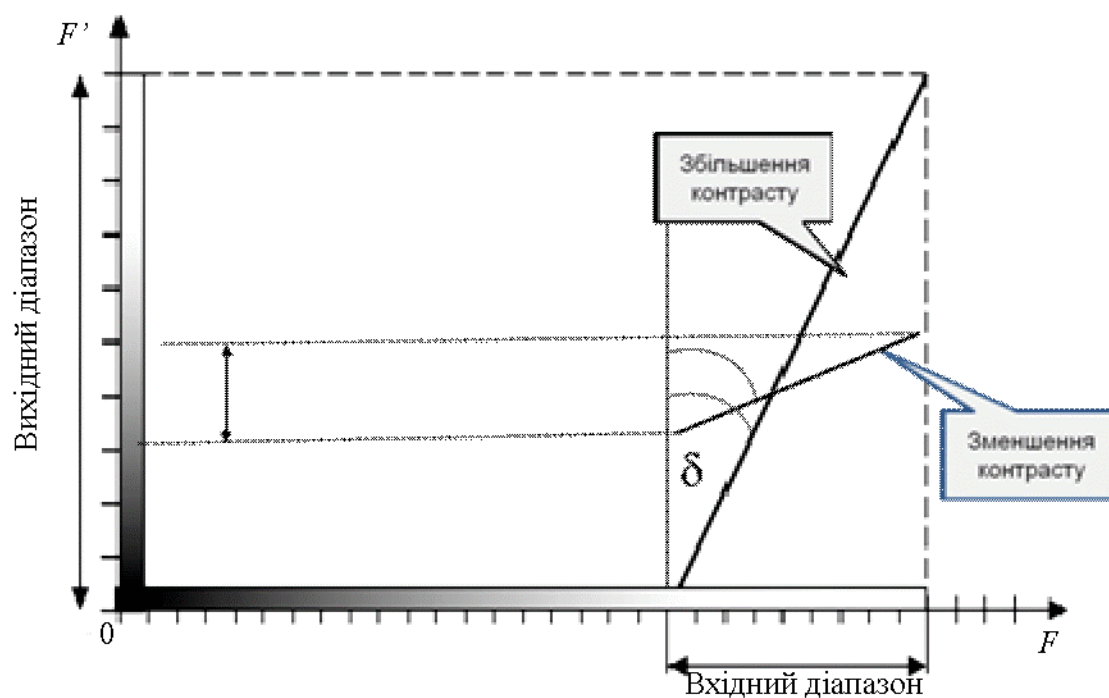
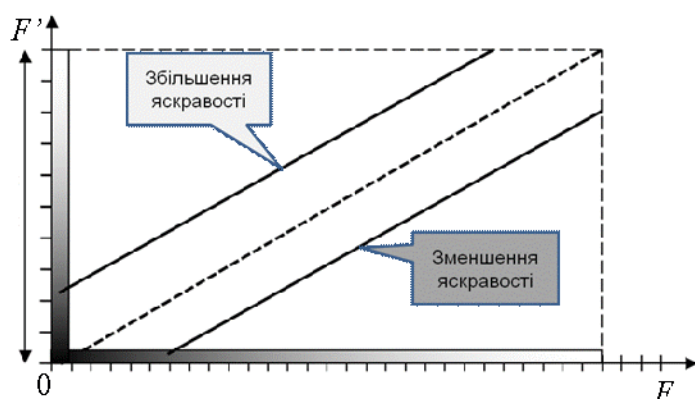


Рис. 2.8 – Перетворення контрасту (у світлому)

Збільшення або зменшення яскравості зображення – це одночасне поелементне підняття (зменшення) яскравості кожного елементу зображення. Типові характеристики передачі рівнів при поелементному збільшенні (зменшенні) яскравості наведені сполосними лініями на рисунку 2.9.

В процесі обробки повітряно-космічних знімків використовують спеціальні функції перетворення рівнів яскравості з певною метою. Прикладами таких перетворень є **обернене контрастне масштабування** (інверсія), **яскравісний зріз** та **спеціальні перетворення гістограм** зображень.



Нормальне зображення



Надмірна яскравість



Мала яскравість

Рис. 2.9 – Корегувальні функції передачі рівнів для змінення яскравості зображення та їх дія на зображення

До перетворень що мають лінійну монотонну характеристику крім зміни контрасту та яскравості відносять перетворення з оберненням контрастів – створення негативу (рис. 2.10). Воно також може бути застосоване або з підвищенням контрасту або з підвищенням яскравості. [13]

Гістограма – це графік статистичного розподілу елементів цифрового зображення з різною яскравістю, в якому по горизонтальній осі представлена яскравість, а по вертикалі – відносна кількість пікселів з конкретним значенням яскравості. Вивчивши гістограму, можна оцінити правильність радіометричного представлення зображення, оцінити необхідну корекцію. Значення нормованої гістограми є оцінкою ймовірності появи пікселя зі значенням яскравості F_k на зображенні, а сам графік гістограми – це оцінка щільності ймовірності значень яскравості на зображенні. Сума всіх значень нормованої гістограми дорівнює одиниці.

На рисунку 2.11 представлена гістограма нормального півтонового зображення з рисунку 2.10. З її вигляду можна стверджувати, що усі півтонові рівні використані (немає розривів) та більшість пікселів на цьому зображенні

мають середні значення яскравості. Гістограма обчислена та представлена за допомогою графічного редактора *GIMP*.

Одним з методів поліпшення зображень є видозміна гістограми. Такі методи передбачають перетворення яскравостей вихідного зображення таким чином щоб гістограма розподілу яскравостей зображення прийняла бажану форму. Зображення, у якого розподіл значень елементів гістограми близький до рівномірного і займає весь діапазон можливих значень яскравості, буде максимально висококонтрастним і буде мати найбільшу кількість півтонів.

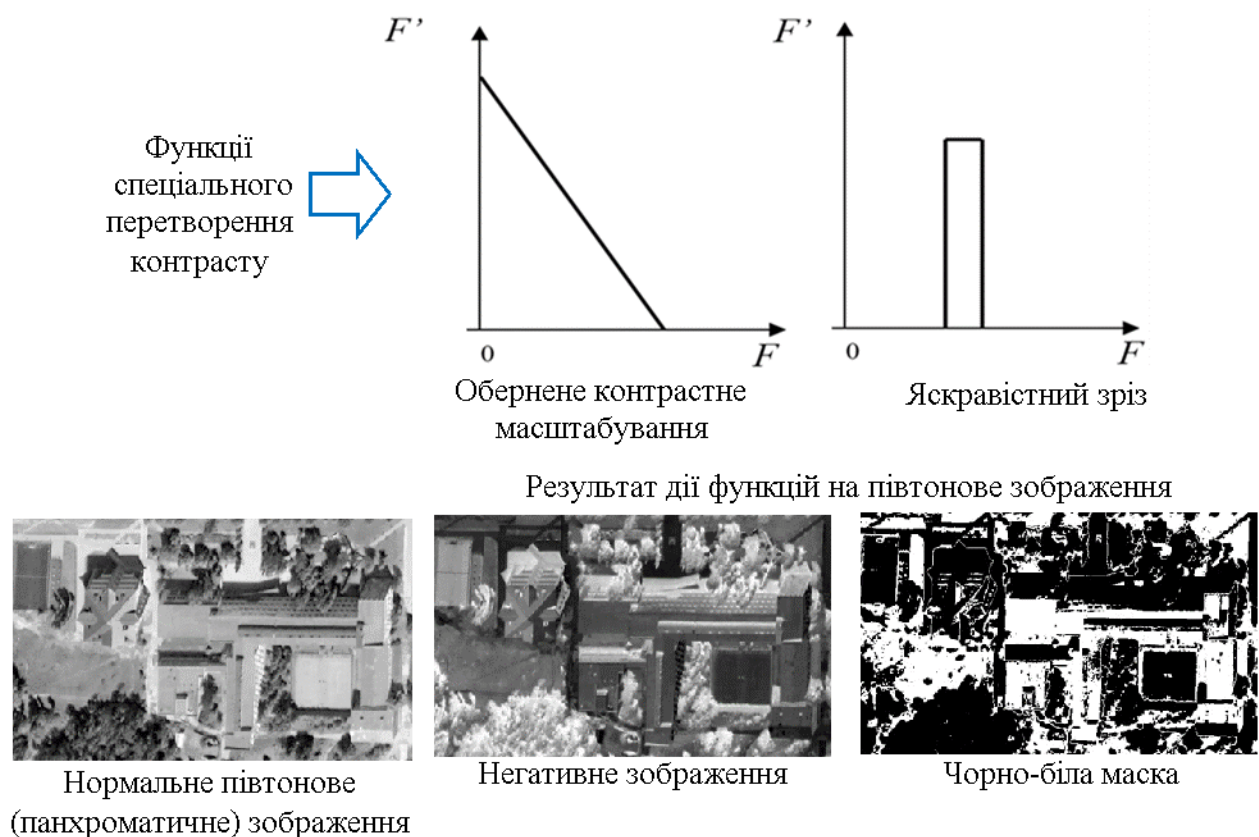


Рис. 2.10 – Функції спеціального перетворення контрасту та їх дія на зображення

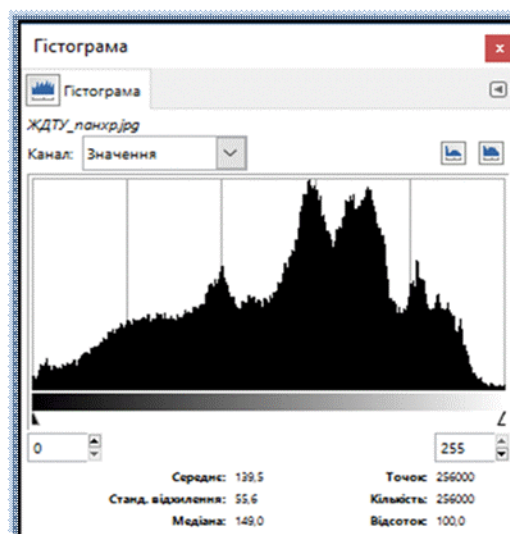


Рис. 2.11 – Гістограма півтонового зображення

В зв'язку з цим вважається, що візуально більш прийнятним є зображення, що має гістограму близьку до рівномірної. З цією ціллю проводиться процедура вирівнювання гістограми або **еквалізація гістограми** (рис. 2.12).

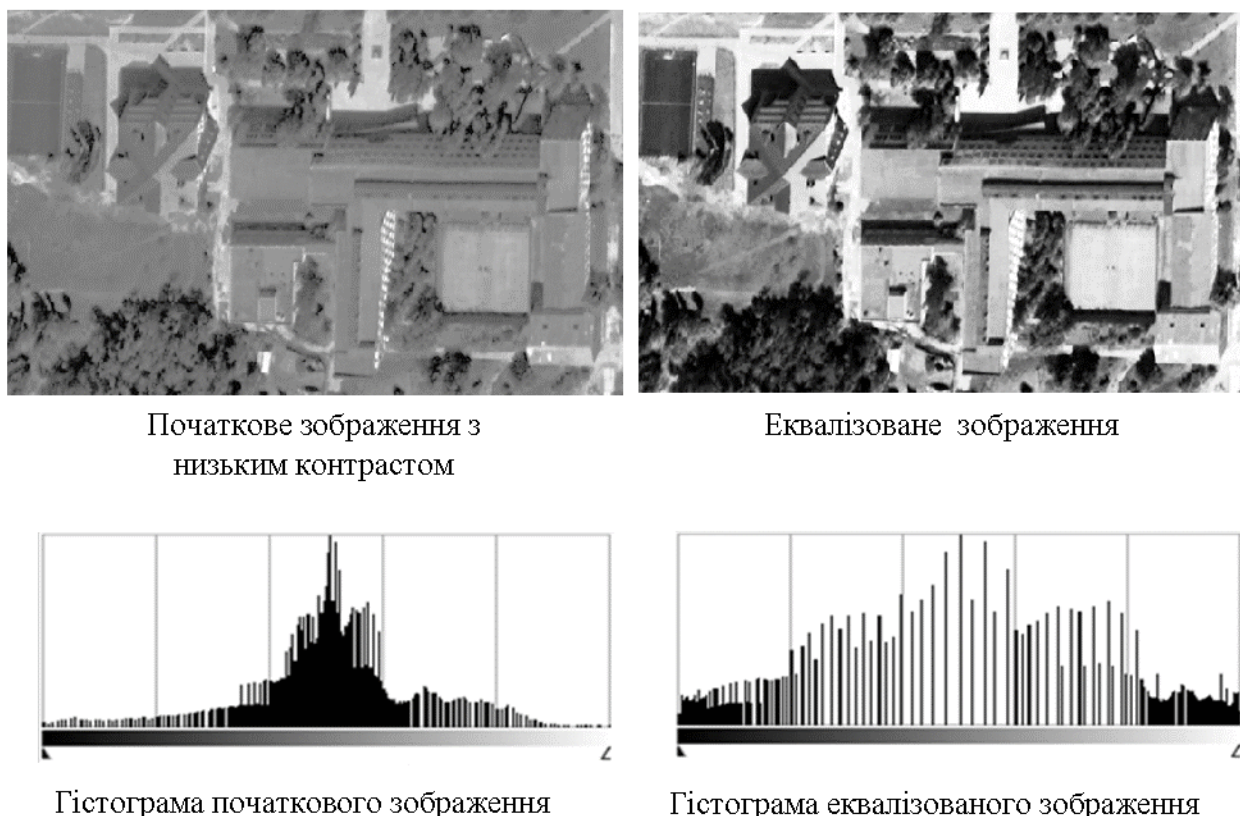


Рис. 2.12 – Еквалізація гістограми

Дуже часто буває, що яскравість пікселів зображення сконцентрована у вузькому діапазоні рівнів квантування. В такому випадку застосовують алгоритми розтягання гістограми. Звичайно застосовують наступні способи розтягання гістограми.

1. Лінійне розтягання у діапазоні рівнів яскравості вхідного зображення (рис. 2.13).

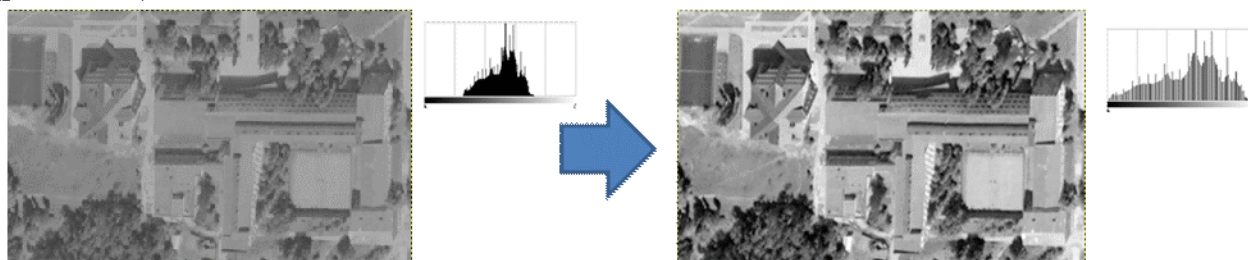


Рис. 2.13 – Лінійне розтягання гістограми у діапазоні рівнів яскравості вхідного зображення

2. Лінійне розтягання з двохвідсотковим відсіканням в темних та світлих тонах (рис. 2.14).

3. Гаусівське розтягання у діапазоні рівнів яскравості вхідного зображення – функція перетворення максимально приводить гістограму до гаусівського вигляду – нормалізація гістограми (рис. 2.15).

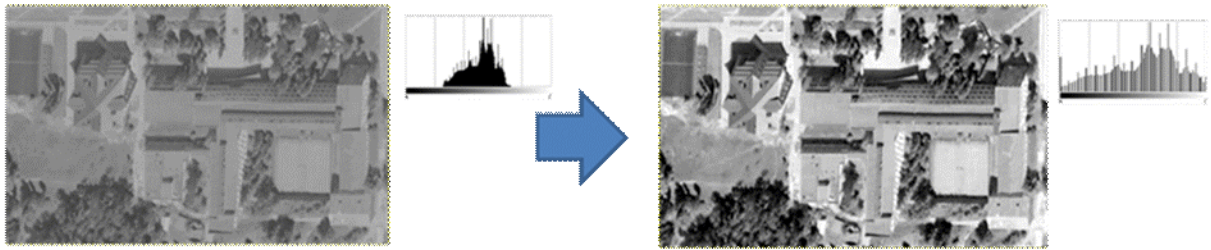


Рис. 2.14 – Лінійне розтягання гістограми з двохвідсотковим відсіканням в темних та світлих тонах

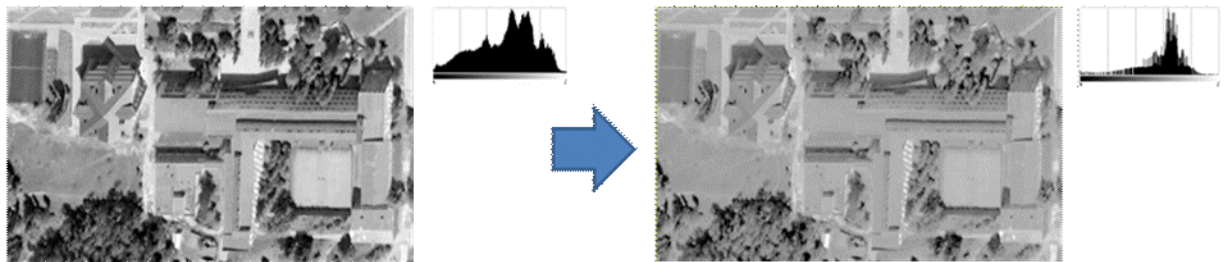


Рис. 2.15 – Нормалізація гістограми

4. Розтягання «квадратний корінь» у діапазоні рівнів яскравості вхідного зображення – функція перетворення відповідає степеневій функції зі степенем, що дорівнює $\frac{1}{2}$ (по суті гама-корекція з гамою $=\frac{1}{2}$), призводить до зміщення гістограми в світлі тони – степенева інтенсифікація гістограми (рис. 2.16).

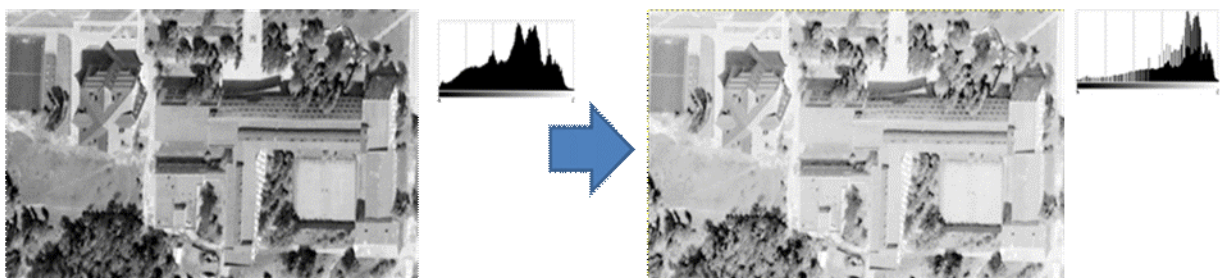


Рис. 2.16 – Степенева інтенсифікація гістограми

Під час застосування операцій перетворення гістограм слід пам'ятати, що вони проводяться тільки з метою покращення візуального сприйняття певних об'єктів на знімках і їх використання часто спотворює початкові дані: кількість інформації на знімку зменшується. Це може зробити зображення непридатним для обробки іншими методами, тому слід використовувати їх обережно та завжди залишати копії початкових даних. [13]

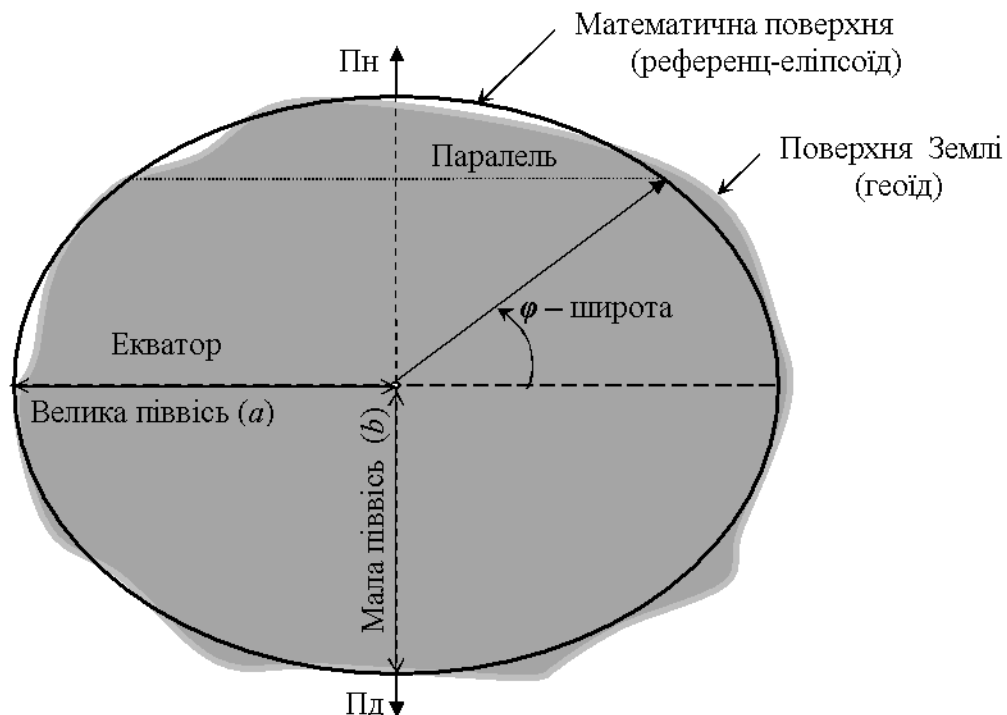
2.1.3 Системи координат, що використовуються в обробці даних повітряно-космічних спостережень

Землі називають геоїдом. **Геоїд** – це форма Землі, визначена з використанням рівня моря та уявним його продовженням під земною поверхнею, за умови збереження рівня гравітаційного потенціалу. Поверхня геоїда повторює вільну, не збуджену поверхню води у Світовому океані, яка

уявно продовжена під материками так, що вона скрізь перпендикулярна до напрямку сили тяжіння.

На поверхню геоїда (неправильної форми) проєціюють точки реальної земної поверхні для наступного їх перенесення на математичну поверхню (тіло обертання). За математичну поверхню звичайно приймається так називаний референц-еліпсоїд (тривимірне тіло обертання еліпсу) (рис. 2.17, 2.18).

Референц-еліпсоїд – земний еліпсоїд обертання (сфероїд) визначених розмірів і форми, орієнтований у тілі Землі, прийнятий для віднесення на нього результатів усіх геодезичних вимірювань при обчисленні координат геодезичних пунктів. Параметрами, що визначають форму референц-еліпсоїда є: a , b – велика та маленька піввісі, e – ексцентриситет та α – полярне стиснення. Параметри референц-еліпсоїда обирають так, щоб мінімізувати середню похибку цього проєціювання або для всієї Землі, або для певної країни. На старих топографічних картах СРСР та на сучасних картах України за математичну поверхню обраний так називаний еліпсоїд Красовського. В більшості сучасних систем позиціонування та ГІС за математичну поверхню обирають Загальноземний еліпсоїд WGS-84.



Параметри еліпсоїда Красовського:

$a = 6\,378\,245$ м
 $b = 6\,356\,863$ м
 $\alpha = 1:298,3$
 $e^2 = 0,006\,693\,421$

Параметри загально земного еліпсоїда WGS-84:

$a = 6\,378\,137$ м
 $b = 6\,356\,752$ м
 $\alpha = 1:298,257\,223\,563$
 $e^2 = 0,006\,694\,380$

Рис. 2.17 – Переріз геоїду і референц-еліпсоїду площиною, в якій лежить вісь обертання Землі

З причини невеликої різниці у величинах півосей (близько 21км) у деяких випадках форму Землі приймають за кулю (сферою) з радіусом, рівним 6371км. Так можна вважати тільки для оглядових карт Землі і материків.

Надалі математичну поверхню всієї Землі чи її окремої частини зображують на площині. З цією метою на площині будують по тому чи іншому математичному законі лінії паралелей і меридіанів, що представляють собою картографічну сітку, на яку переносять окремі об'єкти і контури земної поверхні. Умовне зображення на поверхні сітки меридіанів і паралелей називають **картографічною проекцією**.

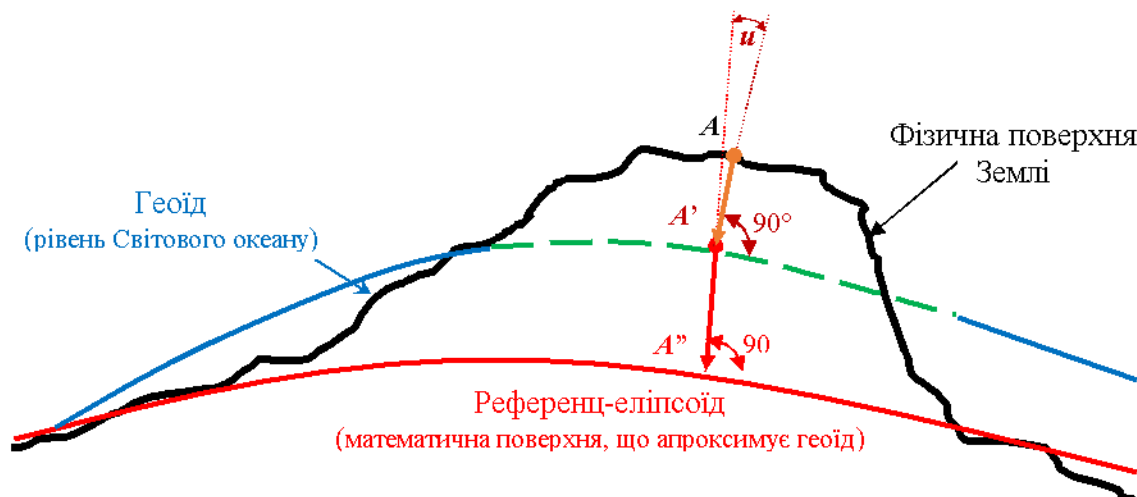


Рис. 2.18 – Проеціювання точки з поверхні Землі на геоїд та на референц-еліпсоїд

За способом визначення положення об'єктів на поверхні Землі існують такі основні типи систем координат (СК): географічна, геодезична і системи координат проекцій.

Географічна система координат використовує широту і довготу моделі земної поверхні. Координатами є кутові величини: географічна широта B й географічна довгота L (рис. 2.19). Вони визначають положення точок земної поверхні відносно екватора й початкового (нульового) меридіану.

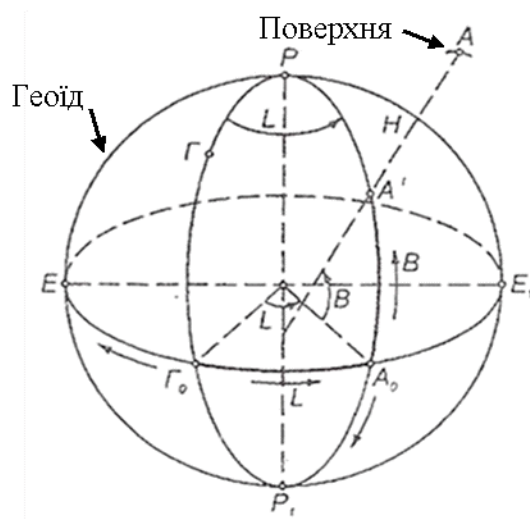


Рис. 2.19 – Географічна система координат

Довгота – кут між площиною меридіану в точці спостереження та нульовим (Гринвіч) меридіаном. Довгота змінюється від -180° до 0° на захід та від 0° до 180° на схід від Гринвіча.

Широта – кут між прямовисною (до геоїда) лінією та площиною екватора. Широта змінюється від 0° до 90° на північ, від 0° до -90° на південь від екватора.

Географічні координати, що їх визначають астрономічними методами, вимірюються відносно місцевої вертикалі – нормалі до референц-еліпсоїда, називаються **геодезичними координатами**. Тобто, у геодезичній СК поверхня Землі апроксимується певним референц-еліпсоїдом (моделлю геоїда). На відміну від географічних координат геодезичні координати ще визначають висоту фізичної поверхні над поверхнею певного референц-еліпсоїда.

Геодезичні системи координат містять наступні параметри:

параметри референц-еліпсоїда (величина великої піввісі a , малої b , стиснення α , ексцентриситет e);

висоту геоїду над референц-еліпсоїдом в початковому пункті;

вихідні геодезичні дати (геодезична широта та довгота початкового пункту, азимут на орієнтирний пункт).

Положення об'єктів у геодезичній СК визначається геодезичною довготою (λ), геодезичною широтою (φ) і висотою (h). Змінюються геодезичні довгота і широта так само, як географічні. Геодезична висота h характеризує відстань по нормалі даної точки від її проєкції на поверхні референц-еліпсоїда.

Приклад такої системи – *WGS-84*. З метою інтеграції України в світову та європейську економічні системи, запровадження сучасних систем навігації транспортних засобів, участі в міжнародних наукових дослідженнях глобальних екологічних і геодинамічних процесів, вивчення фігури Землі та картографування території України з використанням супутникових технологій Кабінет Міністрів України постановою № 2359 від 22 грудня 1999 р. запровадив для використання на території України Світову геодезичну систему координат *World Geodetic System 1984 (WGS-84)*.

Світова геодезична система координат *WGS-84* є геоцентричною, правосторонньою, ортогональною, початок якої (точка O) суміщений з центром мас Землі (рис. 2.20).

Можна помітити, що поняття широти та довготи для *WGS-84* співпадає із визначеннями для географічної системи координат. Але, слід пам'ятати, що меридіан із нульовою довготою (початковий меридіан) в системі *WGS-84* – це Міжнародний опорний меридіан, що перебуває за 5,3 кутових секунд на схід від Гринвіцького меридіану (102 метри на широті Гринвіцької королівської обсерваторії). Це пов'язано з розбіжностями в параметрах референц-еліпсоїдів для різних систем координат. Ці розбіжності примушують вносити поправки в значення довготи і широти у процесі перерахунку з однієї СК в іншу.

У колишньому Радянському Союзі та східноєвропейських країнах для складання карт широко застосовувалась система координат СК-42 (на еліпсоїді Красовського), поправки до географічних координат у *WGS-84* для цих систем обчислюють за спеціальними формулами. Це слід враховувати за умови точного оцінювання координат за випадком використання так названих «карт Генерального штабу СРСР».

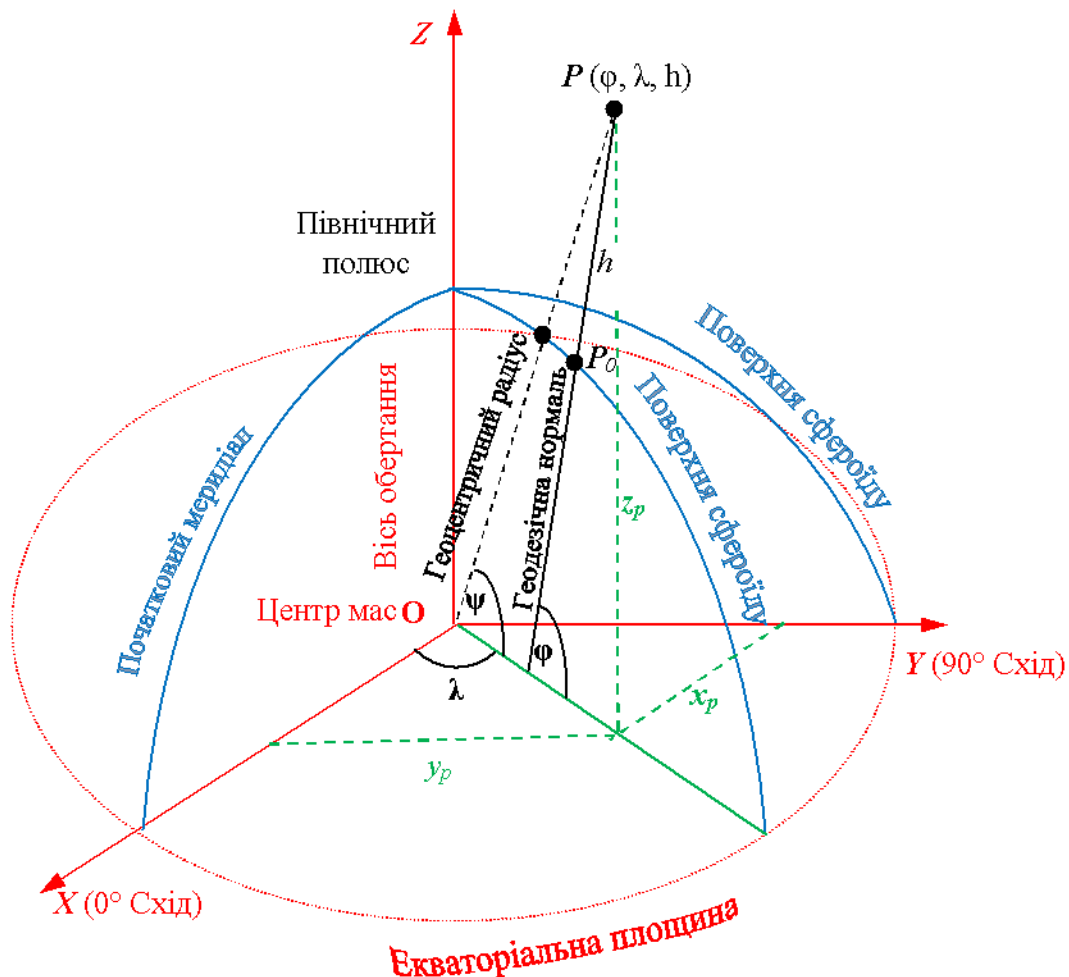


Рис. 2.20 – Система координат *WGS-84*

Для виконання топографо-геодезичних та картографічних робіт в Україні використовують Державну геодезичну референцну систему координат України, УСК-2000, яка заснована на еліпсоїді Красовського та має Балтійську систему висот як в СК-42. Вона побудована для прямокутної ланки, що охоплює кордони України. Система координат УСК-2000 встановлена за умови паралельності її осей просторовим осям Міжнародної загальноземної

референцної системи координат ITRS. Це дозволяє користуватися GPS без складних перерахунків.

Координати діагонально протилежних точок прямокутної зони дії УСК-2000 у Світовій геодезичній системі координат WGS-84 наступні: нижній лівий кут (довгота, широта) – $22^{\circ}15'$, $43^{\circ}18'$; верхній правий кут – $40^{\circ}18'$, $52^{\circ}38'$ (рис. 2. 21). Центр координат зони дії УСК-2000 – $31^{\circ}.17'$, $47^{\circ}78'$.

Картографічна проєкція – це математичний спосіб зображення поверхні Землі на площині при складанні карт. Система координат проєкцій є похідною від геодезичної системи координат, заснованої на референц-еліпсоїді. Системи координат проєкцій (проєкційні системи координат) перетворюють значення широти і довготи, що описують положення на земній поверхні, в значення координат на площині.

Існує велика кількість різних видів картографічних проєкцій, що розрізняються по способі геометричної побудови, а також по характері їх перекручувань. Зображення земної поверхні без перекручувань можна

одержати тільки на глобусі. Сферичні поверхні не розгортаються на площині без складок і розривів, тому на картах неминучі спотворення довжин, кутів і площ. При цьому, чим більша частина поверхні Землі зображується на карті, тим більші виходять перекачування на ній.

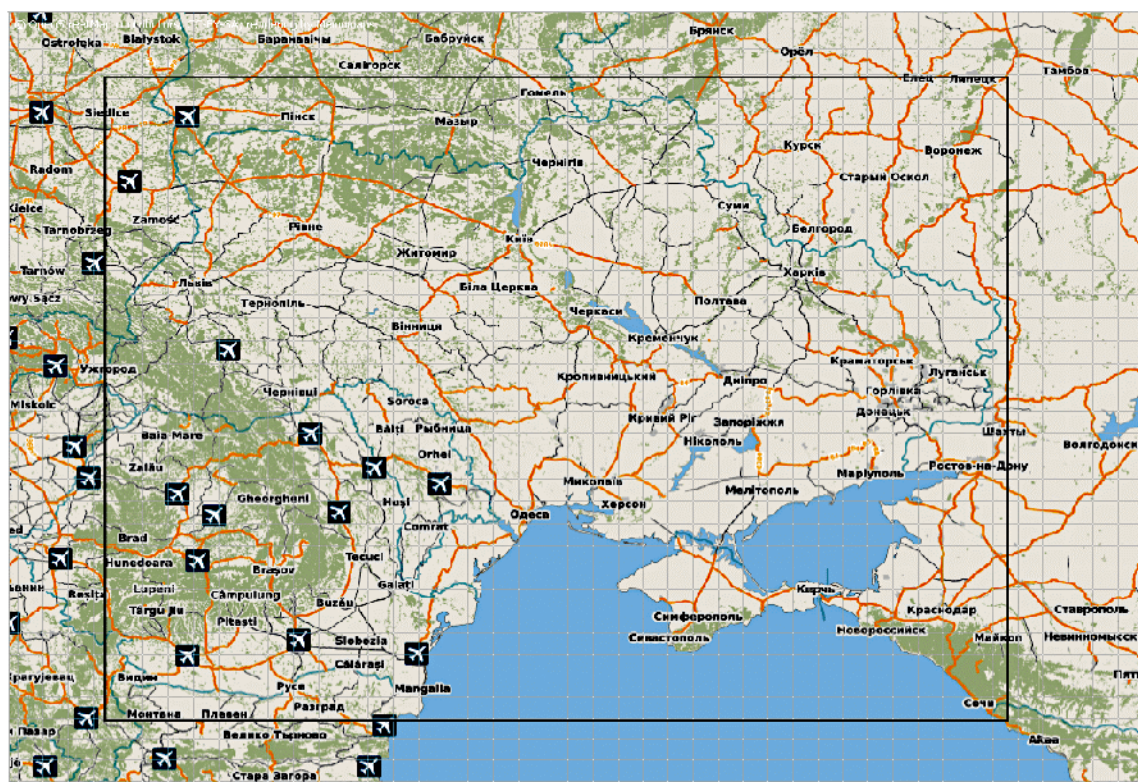


Рис. 2.21 – Прямокутна зона дії УСК-2000

Основними видами перекачувань картографічних проєкцій є перекачування довжин, площ, кутів і форм об'єктів. Лише в деяких проєкціях зберігається рівність кутів, але через це значно спотворюються довжини і площі або зберігається рівність площ, але значно спотворюються кути і довжини. Немає таких картографічних проєкцій, у яких збереглися б одночасно і рівність площ, і подоба фігур, і масштаб ліній.

Проєкції розрізняють по способу побудови. Зображення сітки меридіанів і паралелей спочатку одержують на допоміжній математичній поверхні, а потім з неї переносять на площину. Від способу побудови залежить вигляд картографічних сіток, тобто форма паралелей і меридіанів і величина проміжків між паралелями і меридіанами. Допоміжними поверхнями можуть бути (рис. 2.22): дотичні до кулі чи січні його площини; бокова поверхня дотичного чи січного циліндра в циліндричних проєкціях; бокова поверхня дотичного чи січного конуса – у конічних чи поліконічних проєкціях.

Головний масштаб у проєкціях зберігається тільки в точках (лініях) торкання чи перетину. Такі місця на картах називаються точками чи лініями нульових перекачувань. В інших місцях карти застосовують приватні масштаби, що виражають у частках до головного. У кожній точці карти існують два взаємно перпендикулярних напрямки, по одному з яких масштаб найбільший, по іншому – найменший. Вони називаються головними напрямками.

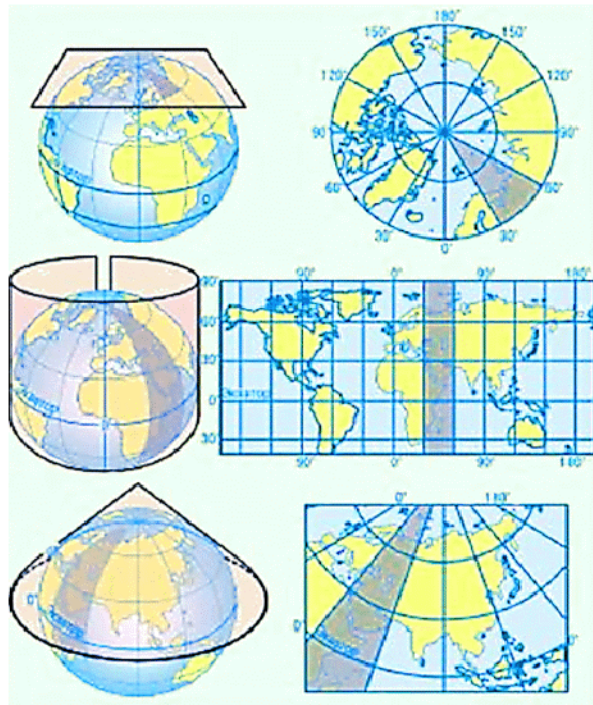


Рис. 2.22 – Дотичні допоміжні поверхні і вигляд картографічних сіток для них

Топографічні карти складають в основному в конформній поперечно-циліндричній **проекції Гауса**. Сутність цієї проекції полягає в наступному.

Поверхня земного еліпсоїда меридіанами поділяють на шостиградусні зони (рис. 2.23), рахунок яких в СК-42 ведеться від початкового (нульового) меридіана з заходу на схід з 1 по 30 – у східній півкулі і з 31 по 60 у західній. Середній меридіан кожної зони називається осьовим. Для планів масштабу 1:5000 і крупніше, з метою зменшення перекручувань, беруть триградусні зони.

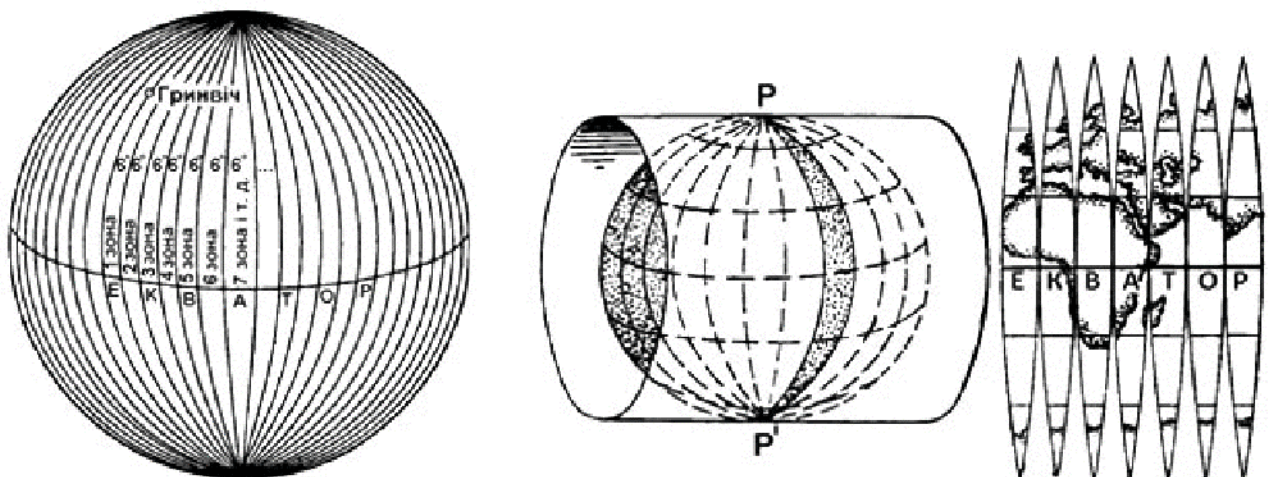


Рис. 2.23 – Поділення земного еліпсоїда на шість градусні зони

Кожну зону у визначеній закономірності проєктують на свій циліндр, що торкається математичної поверхні Землі по осьовому меридіані (рис. 2.24). Розгортаючи потім бокову поверхню циліндра на площину (рис. 2.25), одержують на ній зображення зони. Осьовий меридіан і екватор у проєкції

зображуються взаємно перпендикулярними прямими лініями, а інші меридіани – кривими лініями, що сходяться на полюсах. Паралелі зображуються кривими лініями, опуклостями зверненими до екватора.

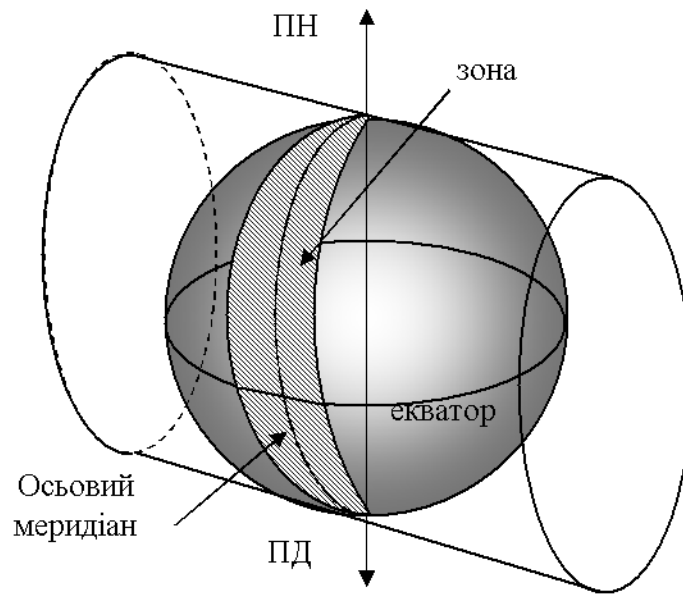


Рис. 2.24 – Схема переносу зони на поперечний дотичний циліндр

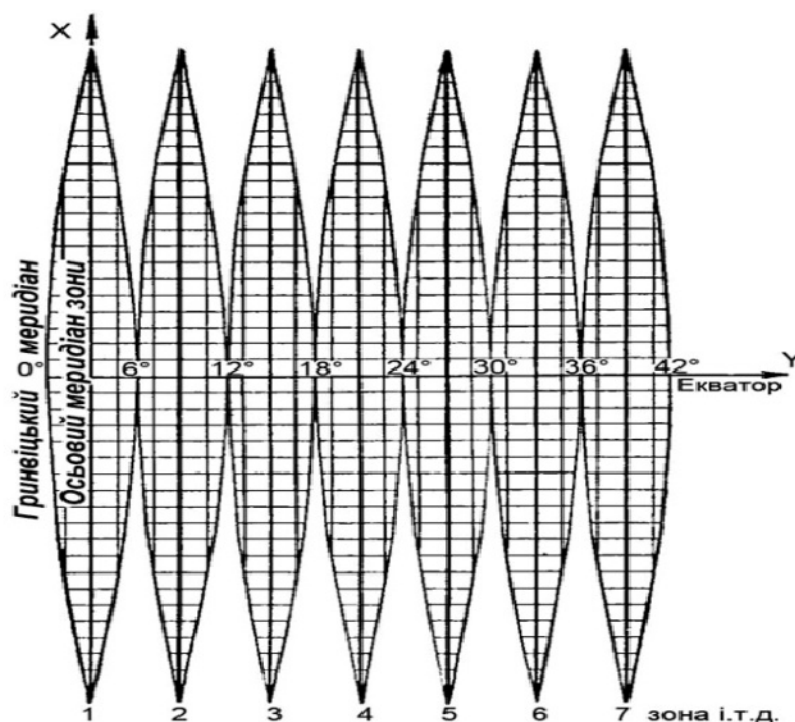


Рис. 2.25 – Розгортка поверхні циліндра із зображенням зон

В УСК-2000 територія України розділена на 6-градусні зони, але для зменшення спотворень часто використовують 3-градусні зони або місцеві системи координат (МСК), що базуються на УСК-2000. Проекція МСК-2000 – це місцева система координат, що базується на проєкції УСК-2000 і створена для більш зручної роботи з УСК-2000. Характеризується тим, що для кожної області створена своя МСК з осьовим меридіаном в центрі області.

Проекція Гауса є конформною, на якій зберігаються подоби фігур і головний масштаб на осьовому меридіані. Приватні масштаби поступово зростають від осьового меридіана до країв зони. Перекручування довжин, кутів і площ на топографічних планах і картах великого масштабу, що відбуваються від кривизни Землі, настільки малі, що не мають практичного значення. На таких картах можна робити будь – яки виміри так, начебто перекручувань немає зовсім.

Сітка **прямокутних координат** для систем координат УСК-2000 та СК-42 будується для кожної зони окремо. Вісь X розташована паралельно осьовому меридіану зони, починається з екватора і йде на північний або південний географічний полюс (рис. 2.26). У північній частині кожної зони вісь спрямована на північний географічний полюс і координати X додатні. Тобто, координата X певної точки на поверхні земного еліпсоїда вказує відстань від неї до екватора по поверхні еліпсоїда.

Вісь Y кожної зони лежить у площині екватора і є перпендикуляром до центрального меридіана зони. Ширина будь – якої шостіградусної координатної зони на екваторі складає приблизно 670 км. Для того, щоб не було від’ємних значень координати Y , в точці початку координат кожної зони значення Y_0 приймається рівним 500 км. Тобто, початок координат кожної зони лежить на екваторі, але він зсунутий від осьового меридіана зони ліворуч по осі Y на 500 км. Для зв’язку координат Y між зонами, ліворуч від запису координати Y точки приписують номер зони.

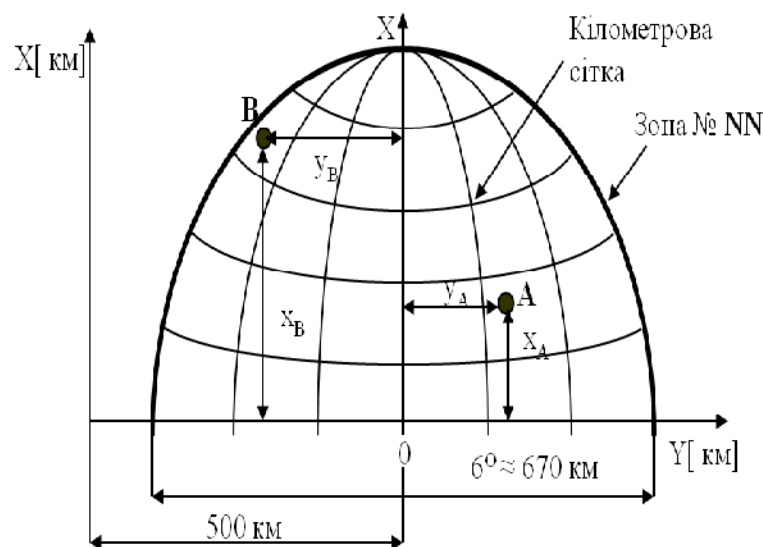


Рис. 2.26 – Система прямокутних координат для УСК-2000 та СК-42

Для показаних на рисунку 2.27 точок А і В повні координати в СК-42 визначаються наступним чином: $Y_A = (NN)500 \text{ км} + y_A$, $X_A = x_A$; $Y_B = (NN)500 \text{ км} - y_B$, $X_B = x_B$, де NN – номер зони. Для конвертації координат СК-42 та СК-63 в координати УСК-2000 і навпаки розроблено спеціальні математичні формули та програмне забезпечення у вигляді геодезичних калькуляторів, при цьому під час перетворення можуть виникати певні похибки.

2.1.4 Геометричні особливості оптико-електронних космічних знімків

Оптична система відхиляє промені відбитого від землі випромінювання так, що вони формують рядок пікселів на фотоприймачі, який є перпендикулярним до напрямку польоту (рис. 2.27). Наступний рядок отримують за рахунок польоту, переміщення носія (літака, супутника) в нову позицію. У такий спосіб формується безперервне зображення смуги захоплення, яке записується у пам'яті бортового комп'ютера. [13]

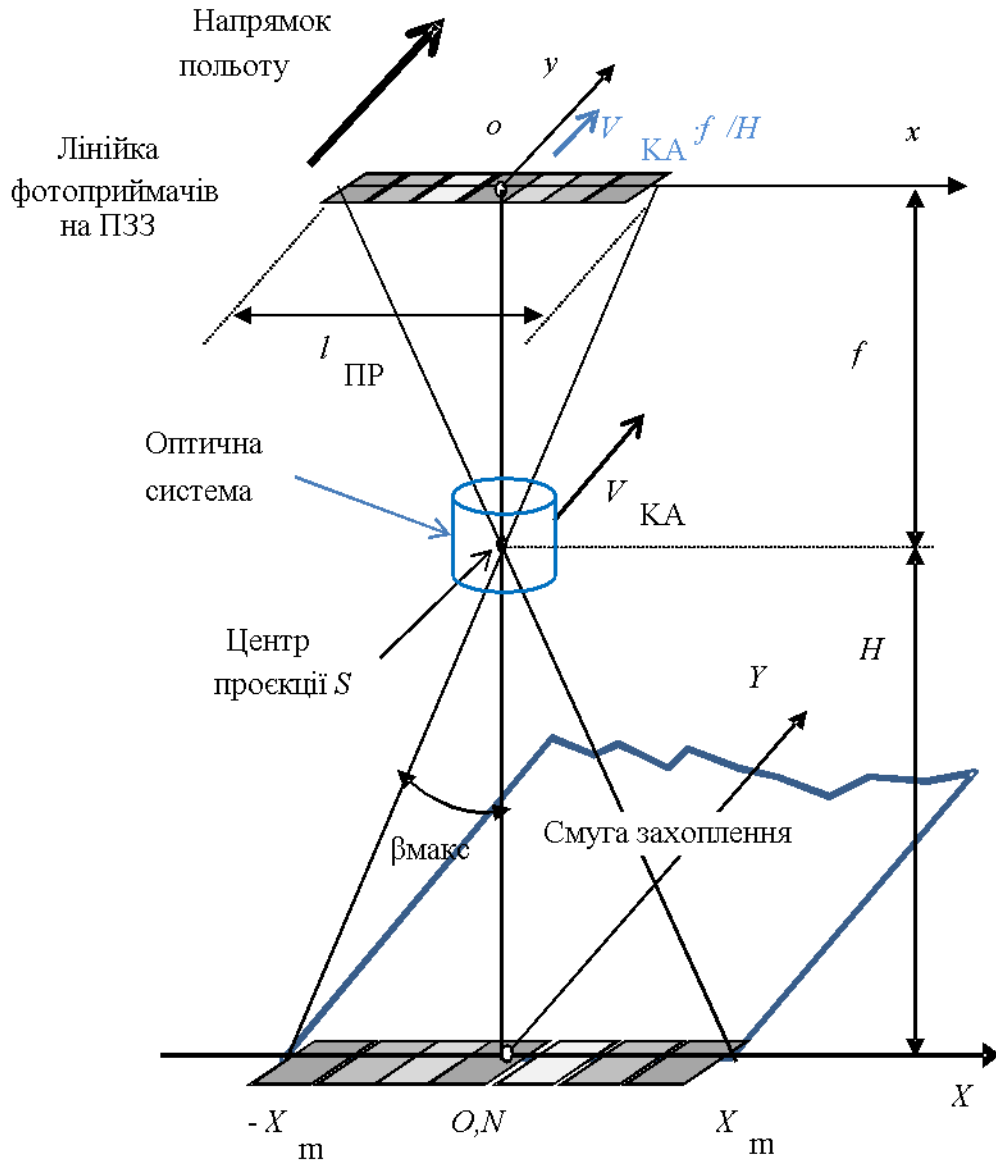


Рис. 2.27 – Схема знімання з ПЗЗ - лінійкою

Огляд місцевості в напрямку, перпендикулярному напрямку польоту носія, здійснюється одночасно всією лінійкою фотоприймачів за правилами центральної проєкції, а сканування місцевості уздовж напрямку польоту забезпечується власним рухом системи разом з носієм за паралельним проєктуванням.

За початок координат на знімку виберемо точку o , а на місцевості - точку N , що відповідає положенню проєктуючого променя в надирі. Повна довжина рядка сканування місцевості дорівнює $2X_m$, його кутовий розмір складає $2\beta_{\text{макс}}$.

Координата x такого знімка

$$x = \frac{H}{m_{0x}} \operatorname{arctg} \frac{X}{H},$$

де m_{0x} – масштабний коефіцієнт, що визначає масштаб горизонтального знімка по рядку уздовж осі X ,

H – висота носія (літака або КА) над площиною що знімається.

$$\frac{1}{m_{0x}} = \frac{f}{H},$$

де f – фокусна відстань об'єктива.

Координата x є нелінійною функцією відстані на місцевості X . Отже, масштаб сканерного знімка уздовж рядка не постійний.

Аналіз формул показує що, по-перше, у центральній зоні рядка, де значення x досить малі, викривлення мінімальні; по-друге, за рухом по рядку зображення до його країв відбувається монотонне зменшення довжин відрізків у порівнянні з плановим зображенням місцевості у центрі рядків. Для математичного описування зв'язку координат на знімку і на земній поверхні використовують поліноміальні моделі залежностей. Якщо використовується кілька ПЗЗ- лінійок у фокальній площині об'єктиву, геометричний зв'язок між різними частинами рядка зображення і земною поверхнею буде різним. Фактично для кожній лінійки будуть свої формули перерахунків.

2.1.5 Геометричне корегування та географічна прив'язка знімків

З причини складності математичного зв'язку положення пікселів зображення з поверхнею Землі використовують підхід, що названий геометричною корекцією космічних знімків. Задача полягає у знаходженні взаємозв'язку між точками на зображенні та точками земній поверхні за невідомого орієнтування знімальної апаратури.

Можна вказати наступні класи задач у практиці обробки космічних і аерознімків, що вимагають геометричних перетворень зображень:

складання фотокарт і мозаїк знімків по аерознімках і космічних знімках поверхні Землі;

корекція геометричних викривлень, внесених датчиками зображень (дисторсіями об'єктивів, положенням матриць фоточутливих елементів тощо);

зіставлення знімків тривимірних об'єктів, знятих при різному положенні знімальної апаратури;

сполучення різних знімків того самого об'єкта, знятих у різних спектральних діапазонах чи у різний час, для одержання псевдокольорових зображень чи з метою виявлення змін у часі.

Задача геометричних перетворень зводиться до тому щоб по заданому зображенню $F(x,y)$ визначити значення сигналу (яскравості) в кожній точці зображення в нових координатах $u(x,y)$, $v(x,y)$ (рис. 2.28). Оскільки мова йде про зображення на безперервній площині, закон перетворення координат $u(x,y)$ і $v(x,y)$ задається звичайно в безперервному поданні.

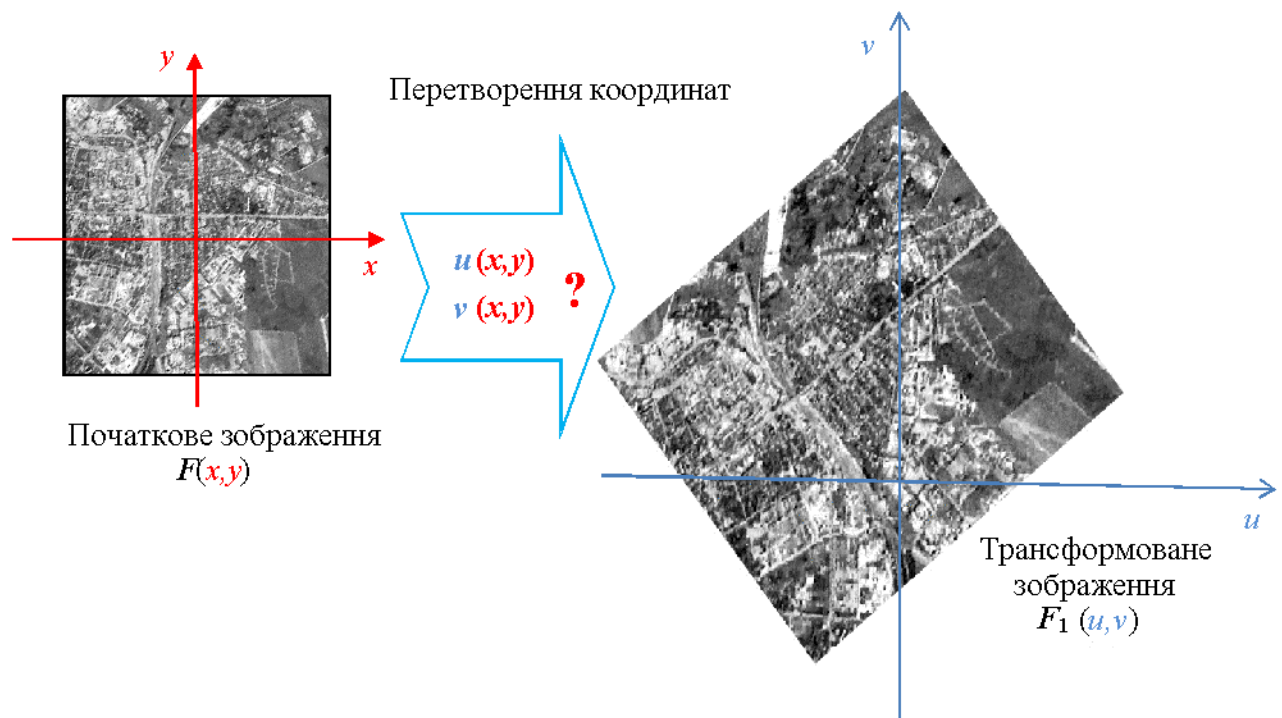


Рис. 2.28 – Задача геометричних перетворень зображень

Для цифрових (дискретних) зображень при прямому перетворенні координат дискретні координати k, l первинного масиву цифрового зображення $F(k, l)$ спочатку переводяться (відновлюється) у безперервні координати $x = x_0 + k \cdot \Delta x$, $y = y_0 + l \cdot \Delta y$ аналітичного зображення $F(x, y)$ (рис. 2.29).

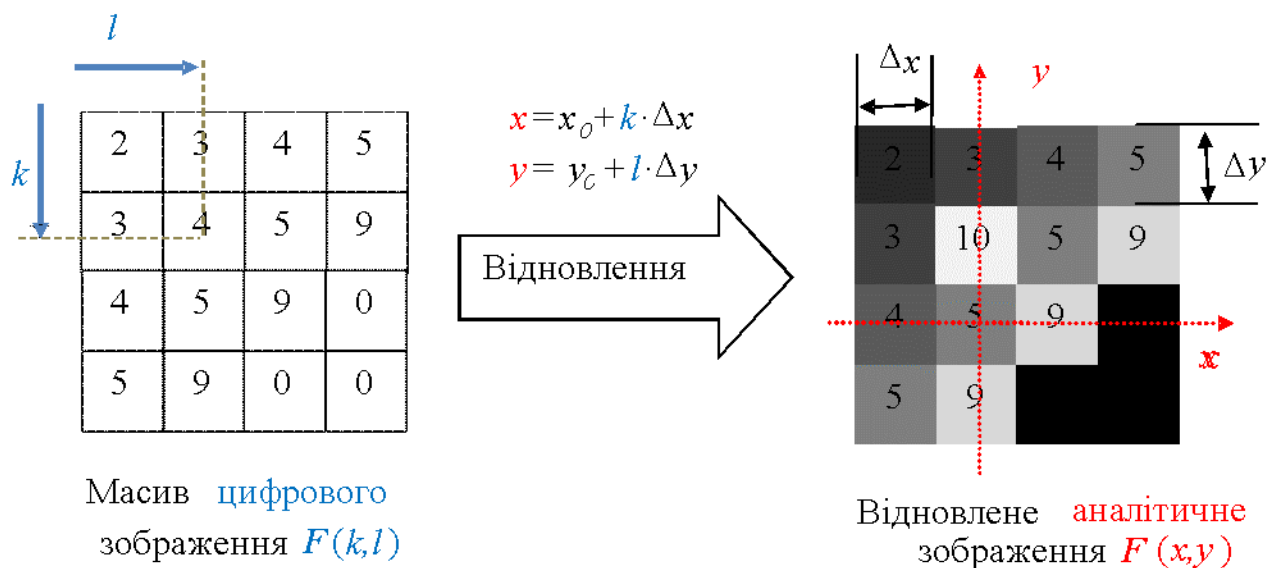


Рис. 2.29 – Відновлення масиву цифрового зображення у безперервні координати аналітичного зображення

Далі формується порожній масив для нового перетвореного зображення $F_1(m, n)$. Кожний елемент (m, n) цього масиву має відповідні координати заданої системи координат (u, v) (рис. 2.30).

Масив заповнюється за допомогою зворотного перетворення координат $x(u, v)$, $y(u, v)$. Для кожного елемента $F_1(m, n)$ цифрового перетвореного

зображення з цифровими координатами (m,n) за допомогою деякої відомої функції $x(m\Delta u, n\Delta v)$ та $y(m\Delta u, n\Delta v)$ знаходяться відповідні координати (x,y) у початковому зображенні і цьому елементу привласнюється значення сигналу знайденого елементу $F(x,y)$ аналітичного початкового зображення (рис. 2.31).

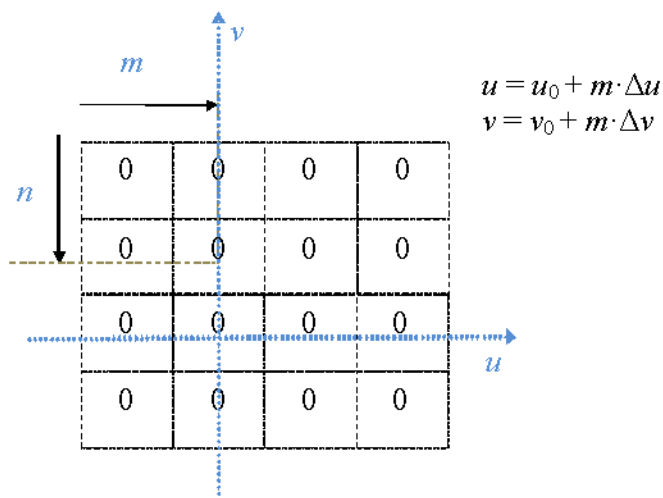


Рис. 2.30 – Порожній масив для нового перетвореного зображення

Для побудови моделі викривлень на кожному конкретному знімку використовують підхід, що заснований на апіорній інформації, що міститься у самому зображенні. За таку інформацію приймають так звані «**характерні точки місцевості**» – стаціонарні об'єкти на місцевості, які гарно відображені на знімку та їх координати апіорно відомі з достатньою точністю (наприклад, з топографічної карти або з картографічного сервісу). Такими об'єктами можуть бути перетинання доріг, вулиць, залізниць, каналів з обладнаними берегами, стаціонарні мости, великі димарі, капітальні будівлі та споруди тощо.

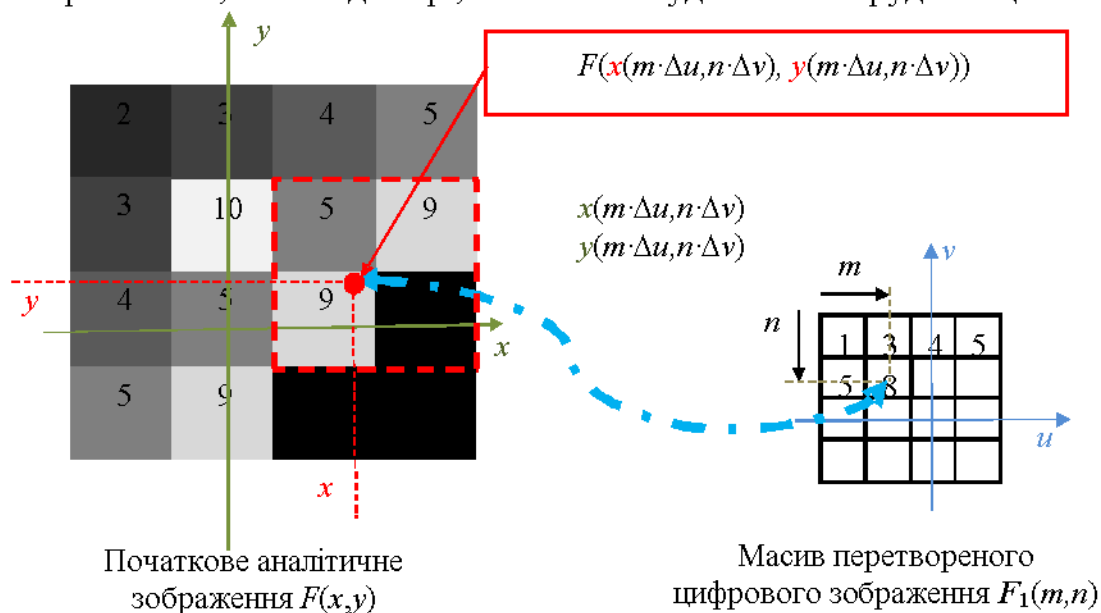


Рис. 2.31 – Заповнення масиву перетвореного зображення за допомогою зворотного перетворення координат

Математична модель геометричних викривлень знімка будується на основі їх подання поліноміальними функціями залежності координат. Вважається, що в ідеальне зображення вноситься просторове геометричне викривлення, яке можна описати відображенням точки (j,k) ідеального (без викривлень) зображення в точку (p,q) зображення, що реально спостерігається, відповідно до виразів $p = Q_p\{i, j\}$, $q = Q_q\{i, j\}$, де $Q_p\{*\}$ і $Q_q\{*\}$ – монотонні функції. Ці функції оцінюють як коефіцієнти певних поліномів на основі аналізу положення однойменних точок, просторове положення яких добре відомо і вони гарно відображені на знімку – характерних точок місцевості.

Процедуру коригувального скривлення можна розбити на два етапи (рис. 2.32).

1. Спочатку визначають координати точки (p,q) , що відображається в точку розміщення скоректованого елемента зображення.

2. Потім знаходять оцінку яскравості зображення в точці (p,q) , інтерполюючи значення яскравості сусідніх елементів, що спостерігаються, і приписують отриману оцінку скоректованому елементу зображення.

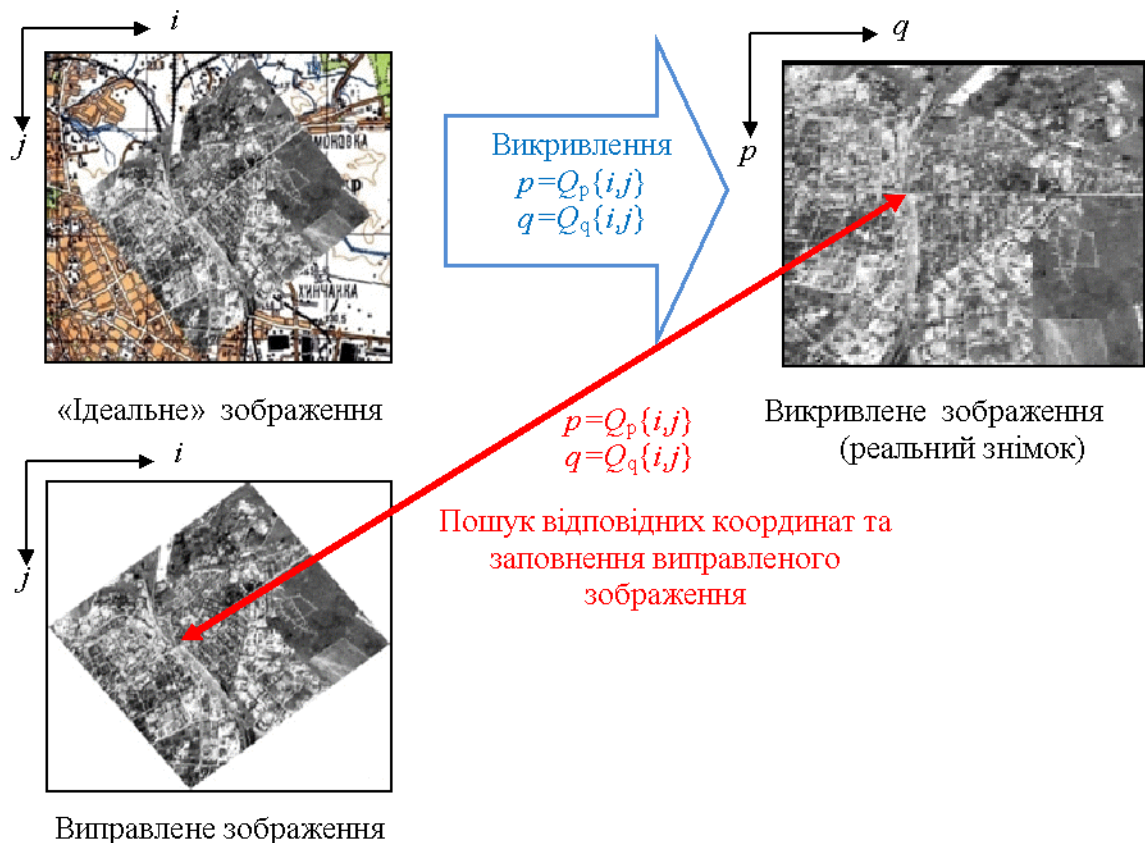


Рис. 2.32 – Процедура коригувального скривлення знімка

Визначення характерних точок місцевості на знімку і на карті показаний на рисунку 2.33. Під час вибору об'єктів за характерні точки слід враховувати наступні особливості роботи алгоритмів перетворень. По-перше – слід пам'ятати, що будь-які три визначені точки не мають лежати на одній прямої. По-друге – для досягнення однакової по площині зображення точності перетворення координат бажано розташовувати точки рівномірно по знімку,

починаючи з його кутів. По-третє – задля підвищення точності перетворення координат певної ланки або об'єкта, слід розташовувати додаткові точки ближче до цього об'єкта або ланки (робити «загущення»); більшість точок має бути розташовано поблизу і навколо такого об'єкту. Для визначення достатньої кількості точок слід пам'ятати, що вона залежить від порядку поліному трансформування координат (ступені викривлення): для трансформування «площина в площину» (афінні перетворення – зсув, масштаб, повертання) потрібно якнайменше 4 точки ближче до країв знімка); для трансформування на сферичну поверхню (або з поверхні другого порядку) потрібно якнайменш 6 опорних точок тощо.

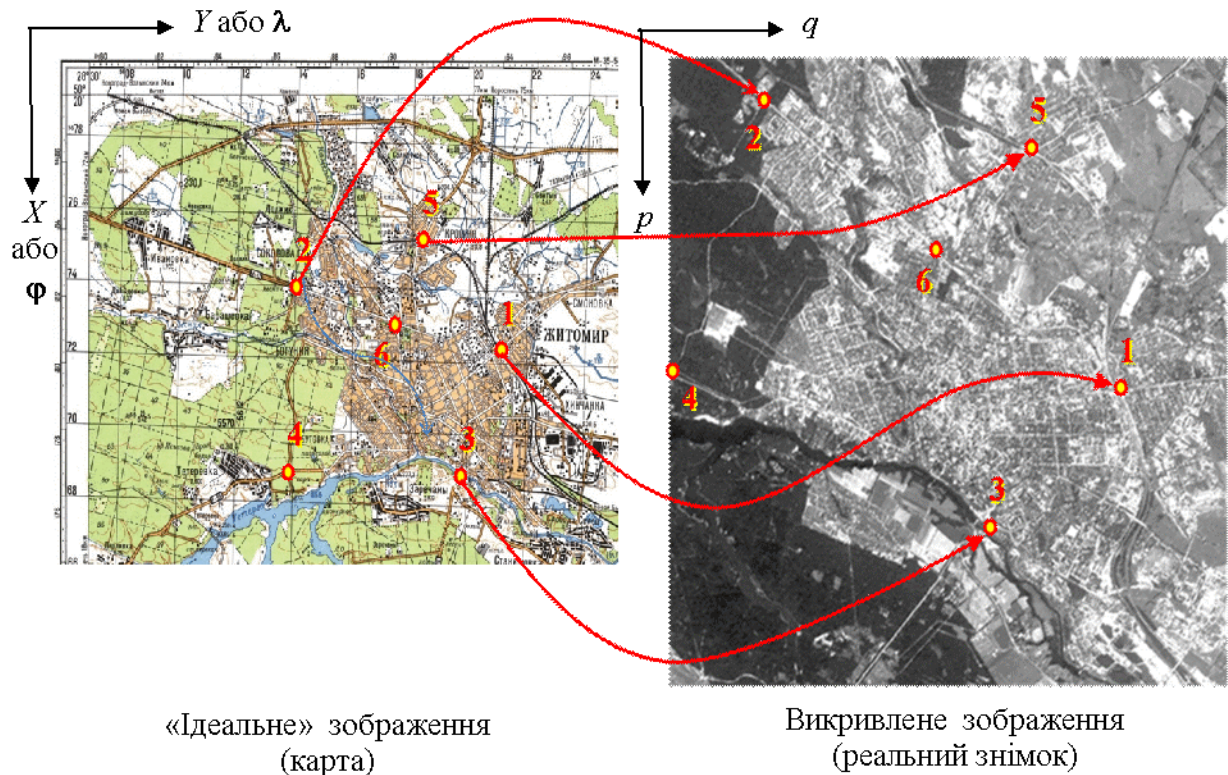


Рис. 2.33 – Визначення характерних точок місцевості на знімку і на карті

Метод зворотних коригувальних функцій може усувати геометричні викривлення знімка отримані як за рахунок перспективної проекції, так і за рахунок нелінійних викривлень зв'язаних з рельєфом місцевості і вадами об'єктиву знімальної системи. Аналогічно можна трансформувати один знімок в координати іншого для їх подальшого накладання один на один з метою аналізу.[13]

2.2 Зміст та основні принципи тематичної обробки даних повітряно-космічних спостережень

Тематична обробка даних повітряно-космічних спостережень проводиться на основі підготовлених попередньою обробкою зображень земної поверхні. Її зміст сильно залежить від галузі застосування та поставленого завдання і має суттєві розбіжності для різних галузей застосування спостережень. Але для усіх напрямків тематичної обробки є один загальний етап: візуальний аналіз знімків

(візуальне дешифрування). У межах обсягу цього навчального посібника немає можливості розглянути усі можливі методи і прийоми тематичної обробки повітряно-космічних знімків за усіма можливими напрямками, тому основна увага буде приділена саме візуальному дешифруванню з метою одержання узагальненої інформації про зняту ланку земної поверхні та об'єкти, що на неї розташовані.

2.2.1 Особливості сприйняття людиною повітряно-космічних зображень

Людський зір – це можливість розпізнавання відмінностей у навколишньому середовищі за допомогою відчуттів, створюваних випромінюванням із довжинами хвиль $\lambda = (0,38 - 0,78)$ мкм (світлом), що потрапляє в око.

Візуальний аналіз (дешифрування) знімків є фізіологічним процесом, що безпосередньо пов'язаний із роботою зорового аналізатора людини який складається з трьох відділів: ока з фоторецепторами – кінцівками зорового нерва, розташованими в сітківці ока, що сприймають світлові сигнали та перетворюють їх у збудження; провідника – зорових нервів, що передають подразнення в кору головного мозку – центр сприйняття; коркового центру зорового аналізатора – тут нервові збудження перетворюється в зорове відчуття та формується образ.

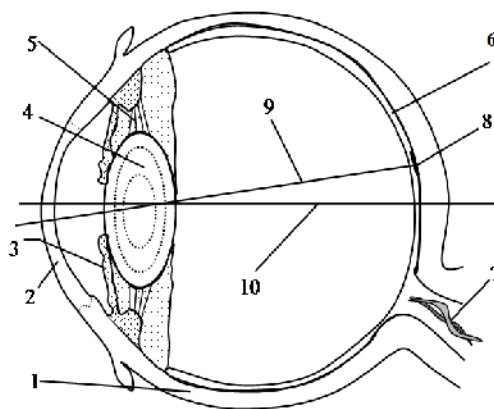


Рис. 2.34 – Будова ока людини

Око – це частина органа зору, в якому створюється оптичне зображення предметів навколишнього середовища та відбуваються перетворення цього зображення в нервові збудження. Око (рис. 2.34) має майже кулясту форму та діаметр близько 2,5 см. Зовні воно покрите захисною непрозорою білковою оболонкою (1) білого кольору – склерою.

Передня прозора частина (2) склери називається роговицею (роговою оболонкою). На деякій відстані від неї розташована райдужна оболонка (3), забарвлена пігментом. Продовження райдужної оболонки по всій внутрішній поверхні ока називається судинною оболонкою – це мережа кровоносних судин, що живлять око. Отвір у райдужній оболонці є зіницею. Залежно від інтенсивності падаючого світла зіниця рефлекторно змінює свій діаметр приблизно від 2 до 8 мм. Простір між роговицею та райдужною оболонкою (передня камера) заповнено прозорою рідиною.

За зіницею знаходиться кришталік (4) – еластичне лінзоподібне тіло. Особливий м'яз (5) може змінювати в деяких межах форму кришталіка,

змінюючи тим самим його оптичну силу. За умови розслабленого очного м'яза оптична сила ока приблизно дорівнює 59 діоптрій, у разі максимального напруження м'яза – 70 діоптрій.

Рогова оболонка, передня камера і кришталік утворюють **оптичну систему ока**, оптичний центр якої розташований на відстані близько 5 мм від роговиці. Передня фокусна відстань ока – 17,05 мм, задня фокусна відстань – 22,78 мм. Показник заломлення – 1,336.

Частина ока за кришталіком заповнена склоподібним тілом. Задня частина ока – очне дно, покрите сітчастою оболонкою (6), яка являє собою складне розгалуження зорового нерва (7) з нервовими закінченнями – паличками та колбочками, що є світлочутливими елементами (фоторецепторами). Колбочки й палички працюють за умови різних рівнів яскравості об'єкта, що спостерігається. Коли на око впливає яскравість більше 10 кд/м^2 , що відповідає денним умовам освітлення, працює колбочковий апарат. Тому зір, під час якого працюють переважно колбочки, називається денним.

Коли на око впливає яскравість менше ніж 10^{-2} кд/м^2 , що відповідає **нічним умовам (без штучного освітлення)**, працює **паличковий** апарат. Тому зір, під час якого працюють в основному палички, називається нічним. Паличковий апарат більш чутливий до світла, ніж колбочковий, але він має істотний недолік – не сприймає кольору предметів. Тому всі предмети (включаючи кольорові) в полі зору здаються сірими. Якщо на око діє яскравість, що задовольняє нерівність $0,01 < L < 10 \text{ кд/м}^2$ (сутінки), то працюють спільно колбочки і палички.

Колбочки та палички розташовані на сітківці нерівномірно. Колбочки розташовані загалом в центральній частині сітківки, що називається **жовтою плямою** (8). Жовта пляма має овальну форму з діаметром приблизно 1 мм, що відповідає кутові зору у 2° . По середині жовтої плями є поглиблення, що називається **центральною ямкою**. Її діаметр становить 0,25 – 0,3 мм, що відповідає кутові зору приблизно 1° . У разі віддалення від жовтої плями кількість колбочок зменшується, а кількість паличок зростає. За умови великої яскравості (вдень) центральна ямка є місцем найбільш чіткого бачення, а в разі малої – це місце є сліпим, оскільки в ньому вкрай мало паличок.

В ході розглядання зображень око автоматично суміщає найбільш цікаву (інформативну) ділянку зображення з центральною ямкою. Тому зорова вісь ока (9), що проходить через центр кришталіка до об'єкта спостереження, відхилена приблизно на 5° від оптичної осі, що збігається з віссю симетрії оптичної системи ока (10).

Око є нелінійним приймачем світла. Зорове відчуття пропорційне логарифму яскравості, що забезпечує можливість роботи зорового апарата в умовах освітлення від 10^5 до 10^{-4} лк. Крім цього, шляхом зміни діаметра зіниці є можливість майже в 16 разів зменшити світловий потік, що надходить в око.

Око є вибірконим приймачем, тобто воно має властивість по-різному реагувати на однакову потужність випромінювання різної довжини хвилі. Ця властивість називається спектральною чутливістю. Колір в очі сприймається за допомогою трьох видів колбочок. Одні з них реагують переважно на червоний,

другі – на зелений, треті – на синій кольори. Комбінація нервових реакцій, що виникають у цих трьох видах колбочок та в корі головного мозку, створює умови для спостереження всього різноманіття кольорів.

Нормальний зір людини здатний розрізняти від 150 до 4 500 кольорових відтінків у видимій частині спектра. Колірна контрастна чутливість ока найбільша до жовтого і блакитного, де поріг розділення дорівнює 0,001 мкм. Значно нижча чутливість ока до червоного, зеленого й синьо-фіолетового кольорів.

Здатність розрізняти випромінювання різних довжин хвиль у паличок досить обмежена. За нічного зору максимум чутливості ока відповідає довжині хвилі $\lambda = 0,51$ мкм. За денного зору, коли працює переважно колбочковий апарат, максимум чутливості ока лежить на довжині хвилі $\lambda = 0,555$ мкм – у жовто-зеленій частині спектра.

Адаптація. Пристосування ока до змінюваних умов освітлення називається адаптацією ока. Око має здатність пристосовуватися до широкого діапазону яскравості, що спостерігається. Процес адаптації з меншої яскравості на більшу називається процесом **світлової адаптації**, а процес адаптації з більшої яскравості на меншу – **темрявою адаптацією**. Адаптація пов'язана зі зміною чутливості ока. Пояснюється це тим, що чутливість ока залежить від концентрації на сітківці світлочутливої речовини. Якщо око спостерігало світлий фон (світлова адаптація), то концентрація зорового фотореагенту зменшилася (відбулося його розкладання), збільшилися шуми ока та потрібна більша освітленість від джерела світла, щоб останній був сприйнятий (зменшення чутливості). Якщо око знаходилося в темряві (темрямова адаптація), то концентрація зорового фотореагенту на сітківці збільшилася, зменшилися шуми. Процес адаптації вимагає часу, причому світлова адаптація відбувається порівняно швидко, протягом 5 – 8 хв, у той час як повна темрямова адаптація більш тривала і забирає приблизно 50 – 60 хв.

Інерційність зору виявляється в запізненні світлового відчуття відносно початку впливу світлового імпульсу й у наявності протягом деякого часу цього відчуття після того, як імпульс припинився (наприклад від проблискових джерел світла). Практичний час наростання та спадання світлового відчуття, приблизно однаковий і становить близько 0,1–0,2 с. Найбільш швидко наростають і загасають відчуття від червоного кольору, потім від зеленого й синього.

Контрастна чутливість ока. Око має здатність розрізняти один об'єкт на одноколірному фоні іншого тільки за деякої різниці яскравості між об'єктом і фоном. Процес зорового сприйняття, за якого починає бути видимим об'єкт у вигляді плями, що не має форми, на фоні даної яскравості називається стадією виявлення.

Граничним контрастом називають відношення:

$$K_0 = \frac{L - L_\Phi}{L_\Phi}, \text{ якщо } L_\Phi < L,$$
$$K_0 = \frac{L_\Phi - L}{L}, \text{ якщо } L_\Phi > L,$$

де L – мінімальна яскравість об'єкта, що ще виявляється,
 L_Φ – яскравість фону.

Контрастною чутливістю $K_{\text{пор}}$ називають величину, обернену до найменшого граничного контрасту $1/K_0$. Величина контрастної чутливості має максимум за яскравості фону 10^3 кд/м². Експериментально доведено, що у світлих тонах $K_{\text{пор}} = 0,02$, у середніх $K_{\text{пор}} = 0,06$, у темних $K_{\text{пор}} = 0,25$.

Фонове освітлення значно впливає на контрастну чутливість ока в зв'язку з його адаптацією. Залежність диференціальної контрастної чутливості ока людини від фонового освітлення показана на рис. 2.35. Подальше зменшення фонового освітлення швидко погіршує диференціальну контрастну чутливість ока, а подальше збільшення фонового освітлення її покращує незначно.

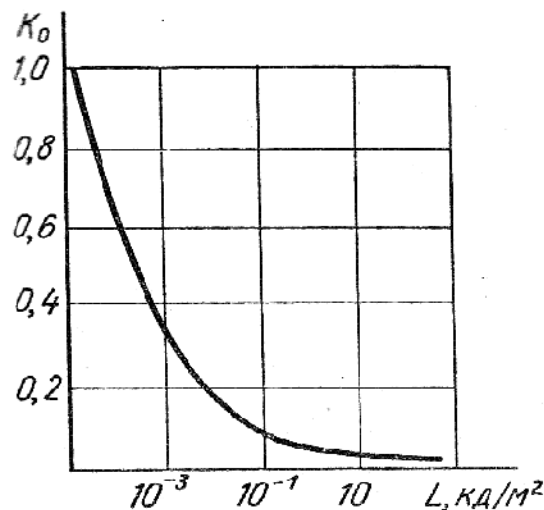


Рис. 2.35 – Залежність контрастної чутливості ока від фонового освітлення

Акомодація. Основна особливість ока як оптичного інструмента полягає в здатності рефлекторно змінювати оптичну силу (опуклість кришталіка) очної оптики залежно від положення предмета. Таке пристосування ока до зміни положення предмета, що спостерігається, називається акомодацією.

Процес акомодації й адаптації очей у тренованого дешифрувальника під час спостереження фотозображень займає близько 0,3 с. Промені, що пройшли через кришталік, створюють зменшене і зворотне зображення об'єктів на сітківці ока. Обернення цих зображень відбувається в мозку та є процесом психологічного характеру.

Крім цих двох точок, що визначають границі області акомодації, в ока існує **відстань найкращого зору**, тобто відстань від предмета до ока, за якої зручніше за все (без надмірної напруги) розглядати деталі об'єкта. Ця відстань у нормального ока дорівнює 25 см. У разі порушення зору зображення віддалених предметів за умови ненапруженого ока можуть сформуватися або перед сітківкою (короткозорість), або за сітківкою (далекозорість),

Блискучість і засліпленість. Розподіл яскравості в полі зору спостерігача зазвичай нерівномірний. Зниження видимості виникає з появою в полі зору спостерігача світлових плям з яскравістю, що різко відрізняється від яскравості навколишнього фону. Ця властивість предметів, що спостерігаються, називається їх блискучістю. Стан ока, що виникає в результаті впливу блискучості, називається засліпленістю.

Вади ока: неповне **центрування**, сферична та хроматична **аберація**, в результаті чого точка, що спостерігається, зображується на сітківці не у вигляді точки, а у вигляді кружка. Крім того, недоліки ока викликають явище **ірадіації**, яке полягає в тому, що зображення на сітківці не буває повністю різким, границя світлого й темного обрисів розмита і ми бачимо її не там, де вона знаходиться насправді. Границі світлого об'єкта ми бачимо або розширеними (позитивна ірадіація), або звуженими (негативна ірадіація).

Зорове стомлення виникає за тривалої роботи ока, особливо під час роботи на стереоскопічних приладах, і виявляється в зниженні працездатності оптичного та м'язового апаратів ока. Стомлення оптичного апарата призводить до зниження роздільної і розпізнавальної здатності ока. Стомлення м'язового апарата зводиться до ослаблення й уповільнення реакції на подразнення рушійних, акомодацийних та інших м'язів. Ці явища супроводжуються різно в очах, головним болем та іншими розладами нервової системи.

Зорові ілюзії виявляються у викривленні сприйняття розмірів, форм, тонів об'єктів. Найбільш розповсюджена ілюзія в процесі дешифрування – **ілюзія зворотного рельєфу**. Тобто коли западина не рельєфі сприймається як пагорб, або навпаки – пагорб здається западиною.

Розрізнення ока. Мірою розрізнення ока є найменша кутова відстань $\alpha_{\min}$ між двома близько розташованими на деякому фоні точками, які око здатне розрізнити окремо. Крім цього, розрізнення ока може бути оцінена кількістю світлих (або темних) ліній, що розрізняються оком за допомогою спеціальних тестів. **Гостротою зору** називається величина, обернена до кута $\alpha_{\min}$, вираженого в кутових хвилинах: $O_3 = 1 / \alpha_{\min}$.

Граничне розрізнення ока визначається кінцевими розмірами колбочок, абераціями оптики ока і дифракційними явищами в ній. Людське око з різною гостротою сприймає точкові та лінійні об'єкти. Тому роздільну здатність поділяють на гостроту зору першого й другого роду. Гостроту монокулярного зору першого роду визначає мінімальний кут, під яким спостерігач бачить окремо дві точки одиничного контрасту. Величина гостроти монокулярного зору здорової дорослої людини дорівнює від 1 до 0,5 кутових хвилин. У середньому, з відстані 250 мм спостерігач може розрізнити дві контрастні точки між якими 0,06 – 0,07 мм. Необхідно відзначити, що наведені значення гостроти людського зору отримані за оптимальних умов розглядання, що характеризуються освітленістю об'єктів спостереження 800 лк, світлом із довжиною хвилі 0,50–0,57 мкм. Відхилення умов освітлення від оптимальних знижує гостроту людського зору. Існує тісна залежність гостроти зору не тільки від розмірів об'єктів, але й від тонового контрасту зображень, що спостерігаються. Зменшення тонового контрасту викликає зниження гостроти зору, тому воно має компенсуватися збільшенням розмірів зображення об'єкта.

Поле зору ока. Фізично спільне поле зору ока становить 125° по вертикалі та 150° по горизонталі. В денних умовах людина сприймає світло центральною частиною сітківки (жовтою плямою) у межах $5\text{--}10^\circ$. Для чіткого розрізнення за денного освітлення може бути використана лише незначна частина цього поля (приблизно $1,3\text{--}1,7^\circ$), яка відповідає центральній ямці. Вся інша частина поля

зору слугує тільки для грубого орієнтування в просторі. Внаслідок цього, для огляду навколишнього простору оку доводиться здійснювати кутовий рух у межах 45–50°. Прийнято, що все поле зору людини без повороту голови можна розділити на три зони. Перша зона – оперативне поле 3°х3°, у ньому здійснюється миттєва обробка інформації. Друга зона – поле постійного контролю: $\pm 31^\circ$ у горизонтальному напрямку та $+23^\circ \dots -32^\circ$ по вертикалі. У разі появи зорового подразника поза цією зоною людині потрібно повернути голову. [1]

2.2.2 Завдання та загальні принципи організації візуального дешифрування знімків

При застосуванні методу **візуального дешифрування** передбачається, що дешифрування виконує експерт, добре обізнаний з особливостями території і властивостями об'єктів, відображених на знімку. Основними задачами візуального дешифрування повітряних і космічних знімків щодо одержання узагальненої інформації про поверхню Землі є наступні.

1. Виявлення дорожньої мережі, населених пунктів, гідрографії, рослинності та інших елементів місцевості.

2. Встановлення взаємозв'язків виявлених елементів.

3. Складання і відновлення топографічних карт.

Задачами тематичного дешифрування у залежності від галузі застосування можуть бути: розвідка, таксація лісу, аналіз пожежної небезпеки, виявлення пожеж та аналіз їх наслідків, аналіз стану рослинності, аналіз стану водних об'єктів, аналіз стану сільськогосподарських угідь, екологічний аналіз, кадастровий аналіз, геологічний аналіз, аналіз стану природних та штучних об'єктів, тощо.

Загальногеографічне дешифрування має на меті вирішення першої групи задач і містить у собі два різновиди дешифрування – **топографічне і ландшафтне**. Топографічне дешифрування знімків проводиться з метою виявлення, розпізнавання й одержання характеристик об'єктів, що мають бути зображені на топографічній карті прийнятими умовними позначками. Ландшафтне дешифрування знімків здійснюється під час регіонального або типологічного районування території, вивчення динаміки й особливостей розвитку ландшафтів, впливу на ландшафт різних видів діяльності тощо.

Галузеве дешифрування застосовується для розв'язання задач другої групи, і його різновиди досить численні, наприклад задачі щодо визначення характеристик окремих об'єктів, що розташовуються на земній поверхні. Усі види дешифрування є взаємопов'язаними за способами і формами виконання.

Дешифрування знімків має складний психофізіологічний характер і містить кілька рівнів розумової активності та різної складності логічні рішення. Дешифрування зображення насамперед спирається на зорове сприйняття. В результаті в свідомості виникають образи та уявлення, на базі яких розпізнається й інтерпретується зображення. Це досягається шляхом порівняння побаченого із зафіксованими в пам'яті образами і відмітними ознаками об'єктів. Ступінь відображення дійсності залежить як від інформативності зображення, так і від багатьох особистих якостей дешифрувальника.

З погляду психології дешифрування за своєю формою є специфічним інформаційно-логічним процесом, у результаті якого формуються відомості про об'єкт, що тією або іншою мірою відображають його дійсний стан. За змістом дешифрування являє складну евристичну діяльність в умовах надлишку або нестачі інформації та дефіциту часу. Надлишок інформації пов'язаний із відображенням на знімку дрібних деталей, безлічі топографічних та цивільних об'єктів, розпізнавання яких взагалі або на окремих етапах не входить до завдання дешифрування. Нестача інформації пов'язана з втратою багатьох деталей об'єктів у зв'язку з недостатньою розрізняльною здатністю системи або відсутністю відображення деяких ознак (наприклад, кольору, температури, матеріалу) на окремих видах зображень. Дешифрування часто пов'язане з розпізнаванням дуже малих за розмірами і малоконтрастних зображень об'єктів на фоні шумів, а їх геометричні й оптичні характеристики перевернуті та непостійні порівняно з властивостями реальних об'єктів.

Виділяють три основні етапи дешифрування знімка об'єкта: виявлення об'єкту, його розпізнавання та інтерпретація отриманої інформації щодо поставленого завдання. **Виявлення** – початковий етап дешифрування – відбувається сприйняття об'єкта без з'ясування його сутності: зоровий аналізатор дешифрувальника ніби оцінює відношення образ/фон на сегменті зображення, що розглядається, та порівнює його з деяким граничним значенням. **Розпізнавання** – другий етап дешифрування – роздільно сприймаються й аналізуються ознаки об'єкта та встановлюється сутність виявленого об'єкта. **Інтерпретація** – заключний етап дешифрування – здійснюються аналіз та узагальнення кількісних і якісних характеристик (ознак) об'єкта з метою встановлення його стану, значимості або небезпеки в конкретній обстановці, прогнозу подальших дії або подій.

Розрізняють чотири рівні процесу дешифрування. На першому рівні відбувається планування дешифрувального процесу: психологічне налаштування дешифрувальника, з'ясування видів інформації, що підлягають обробці, оцінювання задачі та формування моделі її розв'язання.

На другому рівні виконується структурно-пошуковий аналіз: пошук і виявлення заданих об'єктів. Залежно від ситуації, характеру місцевості й особливостей об'єкта пошук відбувається від часткового та більш простого до загального і складного або навпаки. З безлічі зображених об'єктів на цьому рівні вибираються потрібні або задані. Знаходження об'єкта може відбуватися відразу або шляхом більш-менш тривалого перебору ряду ознак та образів.

На третьому рівні відбувається детальний аналіз зображення: впізнання й інтерпретація простих і складних об'єктів. Практично миттєво розпізнаються тільки відкриті прості об'єкти. Замасковані об'єкти й елементи складних об'єктів, стан і характер їх діяльності визначаються в результаті складної розумової роботи із залученням узагальнень, аналізу зображень і синтезу отриманої інформації.

На четвертому рівні формується судження про окремі об'єкти, їхні групи й об'єкти дешифрування загалом, робиться остаточний висновок про характер, стан і діяльність об'єкта, а також коротко формулюється та записується інформація.

У процесі дешифрування безупинно відбувається перехід від упізнання зображень простих об'єктів до впізнання зображень більш складних об'єктів і навпаки, виявляється взаємозв'язок між об'єктами, відбувається перехід від дешифрування окремих об'єктів до впізнання й інтерпретації ситуацій. Розуміння ситуації, що зображується на знімку, дозволяє знову перейти до розпізнавання окремих об'єктів, але на більш високому рівні обробки інформації. На всіх етапах цього рівня відбувається впізнання за аналогією, екстраполяція інформації про впізнані об'єкти і ділянки місцевості на ще невивчені та невідомі. [1]

2.2.3 Особливості спостереження об'єктів у польоті

Спостереження з літака, вертольота або безпілотного літального апарата (БПЛА), яким керують дистанційно, має певні особливості.

Гранична відстань, з якої видні неозброєним оком загальні контури об'єкта, називається дальністю виявлення (або інакше – дальністю видимості). Деталі об'єкта при цьому нерозрізнені. Об'єкт виявляється найчастіше за різницею тону або кольору з навколишнім фоном. Граничну відстань, з якої розпізнають тип об'єкта, прийнято називати дальністю впізнання. Дальність розпізнавання об'єктів у середньому на 30% менша за дальність їхнього виявлення.

Можливість візуального виявлення об'єкта, розташованого на однорідній місцевості, залежить від його розмірів і контрастності. Мінімальне значення контрасту, за якого око розрізняє об'єкт, називають порогом контрастної чутливості ока. У загальному випадку його значення коливається в межах від 2–3%, коли точно відомий напрямок на об'єкт, до 7–9% за нефіксованого спостереження, коли місце розташування об'єкта невідоме і його шукають у межах певної ділянки місцевості.

У польоті максимальна дальність виявлення об'єкта на земній поверхні визначається гостротою зору й іншими факторами: швидкістю і висотою польоту, вібрацією, прозорістю атмосфери, метеорологічними умовами.

На практиці розмір контрастного об'єкта, що виявляється, становить звичайно близько $1/1000$ дальності спостереження, а за незначної контрастності, наближеної до порогу чутливості ока, – $1/500$ дальності спостереження. Наприклад, відкрито розташований Трактор довжиною 6 м, пофарбований у сірий колір, на засніженому полі може бути виявлений на дальності до 6 км ($D = 6 \times 1000$), а на цьому ж зораному полі – на дальності 3 км ($D = 6 \times 500$).

Час на виявлення й розпізнавання об'єктів місцевості в польоті пов'язаний із процесом мислення людини й залежить від навичок з ведення візуального спостереження, знання району польоту, а також характерних ознак об'єктів. Мінімальний час на виявлення об'єкта зі сприйняття яскравісного контрасту становить не більше 1 с, а на його розпізнавання потрібно від 4 до 20 с. Процес розпізнавання може бути розчленований на окремі фази: грубого розрізнення загальних рис об'єкта і його положення; невпевненого розпізнавання; розрізнення окремих характерних ознак; виявлення й розпізнавання деталей.

Тривалість кожної фази, і особливо фази невпевненого розпізнавання об'єкта, може бути різною, що особливо характерно в разі втрати орієнтування, коли багато об'єктів не зорієнтовані взагалі.

Зі збільшенням швидкості польоту, особливо на малих висотах, різко ускладнюються умови виявлення й розпізнавання об'єктів, тому що вони швидко виходять із кута найкращого зору.

Метеорологічні умови видимості також багато в чому визначають дальність виявлення й розпізнавання об'єктів. Чим менша прозорість атмосфери (згущення водяної пари, насичення повітря пилом і газами), тим гірше видимі об'єкти й менші відстані, на яких їх вдається розглянути. Світло розсіюється в атмосфері, створюючи серпанок, що різко знижує контраст між об'єктами й фоном і в такий спосіб зменшує дальність видимості. Метеорологічну дальність видимості виражають за 10-бальною шкалою. За основу шкали прийнята видимість темних об'єктів більших розмірів на фоні неба в обрії (табл. 2.1).

Таблиця 2.1 – Метеорологічна дальність видимості у різних погодних умовах

Бал за метеорологічним кодом	Умови видимості	Дальність видимості, км
0	Дуже сильний туман	0,05
1	Сильний туман	0,2
2	Середній туман	0,5
3	Слабкий туман	1
4	Дуже сильний серпанок	2
5	Сильний серпанок	4
6	Слабкий серпанок	10.
7	Задовільна видимість	20
8	Гарна видимість	50
9–10	Винятково гарна видимість	Більше 50

На дальність виявлення й розпізнавання об'єктів впливає час доби й пора року. Наприклад, під час сходу й заходу Сонця відбувається погіршення яскравісного контрасту між об'єктами й навколишнім фоном, що ускладнює візуальне спостереження. Взимку багато орієнтирів покриті снігом, отже майже не видимі. Навесні й восени одноманітність чергування плям землі й снігу створює загальний строкатий фон місцевості, на якому істотно ускладнюються виявлення й розпізнавання об'єктів.

Об'єкти легше виявляються, коли вони перебувають трохи осторонь від напрямку польоту. При цьому дальності збільшуються, а час на виявлення й розпізнавання скорочується, якщо заздалегідь відоме місце розташування об'єктів і район польоту ретельно вивчений за топографічними картами і знімками.

Далі слід розглянути відмітні ознаки об'єктів та основних орієнтирів під час спостереження з повітря.

Великі населені пункти з великих відстаней вдень помітні у вигляді темних плям, що виділяються на навколишньому фоні. В разі спостереження їх із близької відстані під невеликим вертикальним кутом добре видні вулиці, окремі будівлі. Між собою такі населені пункти різняться найчастіше за загальним плануванням забудованих ділянок, конфігурації площ і великих будинків навколо них, кількості, характеру й напрямку лінійних орієнтирів, що розташовані біля населеного пункту.

Середні й дрібні населені пункти добре помітні за фарбуванням стін будинків і дахів і різняться між собою, як правило, загальною конфігурацією, напрямком головних вулиць, розташуванням великих будинків.

Населені пункти сільського типу, окремі хутори розпізнаються важко й тільки за великими орієнтирами, розташованими поблизу.

Великі ріки видні як широкі темні звивисті стрічки. В разі сонячного освітлення різняться на великій відстані за блиском води. Береги рік виділяються на оточуючому фоні світлим тоном піску або смугою густої рослинності. У зимовий час занесені снігом ріки розпізнаються важко за крутими стрімчастими берегами.

Невеликі ріки й струмки розпізнаються лише при польоті над ними. Добре проглядаються дрібні часті вигини русла ріки й більш темна рослинність берегів.

Озера добре видні здалеку. Вони виділяються темною рівною поверхнею й є надійними орієнтирами в районах, де озер мало. Взимку озера розпізнаються важко, їх легко сплутати з засніженими полянами в лісах.

Залізниці виділяються на місцевості своєю прямолінійністю у вигляді темної вузької смуги із плавними закругленнями. У лісі залізниці видні у випадку спостереження в надир. Нові залізниці відрізняються світлим фоном насипу.

Автомобільні дороги із твердим покриттям виділяються на навколишньому фоні як смуги сірого кольору, а також за рядами дерев по обидва боки дороги; від залізниць відрізняються більш крутими поворотами.

Ґрунтові дороги відрізняються від автомобільних тим, що мають більш часті повороти, об'їзди й широкую колю. Стежки виявляються важко.

Ліси добре розрізняються з великих відстаней темно-зеленим кольором (хвойні ліси, листяні ліси влітку). Окремі лісові масиви в безлісних районах служать надійними орієнтирами. Однак у лісисто-болотистій і лісистій місцевості контури окремих ділянок лісу розпізнаються важко. Із середніх і малих висот добре розрізняються окремі дерева й лісові дороги, особливо в листяних лісах узимку.

Сутінки скорочують дальність видимості орієнтирів і позбавляють їх кольору, фон й орієнтири стають однотонними, скрадаються окремі деталі об'єктів. Крім того, у цей час доби погіршується прозорість атмосфери через серпанок. У звичайних умовах слід планувати польот у години гарного освітлення. За можливості прямого освітлення сонцем доцільно обирати час знімання таким, щоб тіні, що падають від об'єктів, не закривали сусідні об'єкти

та були достатньо довгими, щоб одночасно створювати фон темнішим для підвищення контрастів. Вважається, що для широт України доцільно обирати час знімання в інтервалі від 9.00 до 11.00 та з 15.00 до 17.00 місцевого часу влітку. Якщо прямого освітлення сонцем нема, влітку доцільно проводити знімання за умови достатнього освітлення. Взимку за умови наявності снігового покриву врахування умов освітленості значно ускладнюється. В таких умовах без прямого сонячного освітлення знімки получаются з малим контрастом і виявляти об'єкти під снігом вкрай важко.

Під час виконання польоту на малих висотах різко зменшується час на пошук й розпізнавання орієнтирів унаслідок малих дальностей їхнього виявлення й великої кутової швидкості переміщення. Тому в разі виконання польоту на малих висотах для успішного візуального орієнтування особливого значення набувають точний політ за маршрутом й ретельний підрахунок шляху, що дозволяє істотно зменшити розміри зони пошуку очікуваного орієнтира.

Аналіз місцевості з літака, вертольоту або з БПЛА проводиться з метою вивчення району безпосереднім оглядом. Уміння вивчати місцевість у польоті, відзначати всі її істотні зміни дозволяє за короткий час аналізувати стан об'єктів, з'ясовувати поточну обстановку, уточнювати прохідність маршрутів та вирішувати інші завдання.

Ефективність проведення аналізу місцевості багато в чому залежить від обраної висоти й швидкості польоту літака або вертольота. Найбільш доцільні режими польоту за сприятливих умов видимості наведені в таблиці 2.2.

Таблиця 2.2 – Найбільш доцільні режими польоту за сприятливих умов видимості

Завдання аналізу	Висота, м	Швидкість, км/год
Визначення загального характеру місцевості й виявлення основних природних перешкод, границь зон руйнувань, пожеж, затоплень	100–300	120–140
Вивчення планування населених пунктів і характеру руйнувань у них	100–200	60–80
Визначення стану автомобільних доріг із твердим покриттям (автострад, шосе)	100–150	120–140
Визначення стану ґрунтових доріг і колонних шляхів.	20–40	40–60
Детальне вивчення дорожніх споруд і інших дрібних об'єктів	10-20	До 20
Виявлення шляхів обходу перешкод, наявність переправ на ріках, стежок через болота	200–300	40–60
Вивчення характеру русла ріки, заплавів і берегів	20–80	40–80

2.2.4 Основні завдання тематичної обробки даних дистанційного зондування Землі та методи їх вирішення

Тематична обробка супутникових знімків об'єднує процедури отримання корисної інформації з оброблених матеріалів. Цей процес здійснюється шляхом логічних і арифметичних операцій, класифікацій та інших методичних прийомів, у тому числі візуального дешифрування зображення. До основних **методів тематичної обробки** належать: комбінування спектральних каналів багатоканальних і гіперспектральних знімків; створення і аналіз індексних зображень; метод аналіз головних компонент; методи спектрального поділу; методи класифікації.

Метод комбінування каналів супутникових знімків полягає у визначенні спектральних діапазонів, важливих для відображення тих чи інших об'єктів та синтезу відповідних спектральних каналів супутникових знімків у кольорове зображення.

Так, синтез каналів видимої частини спектра формує зображення, близьке до звичайної фотографії або того, що можна побачити людським оком. Об'єкти дешифрування будуть мати звичний та зрозумілий колір і, відповідно, вигляд, що може суттєво полегшити процес ідентифікації об'єктів на знімках. Така комбінація каналів називається «**природні кольори**».

Однак значна частина інформації буде залишатися прихованою за такої комбінації каналів, тому для виявлення таких об'єктів чи їх властивостей варто використовувати комбінацію каналів із застосуванням ближніх, середніх чи дальніх інфрачервоних діапазонів. Як правило, ці канали поєднують з одним чи декількома каналами видимого діапазону. У результаті формується **псевдокольоровий знімок**. Наприклад, здорова рослинність, у якій інтенсивно протікає процес фотосинтезу, має високе значення відбиття у зеленому спектральному діапазоні, на відміну від пригніченої чи хворої рослинності, що має мінімальні значення відбиття у зеленій та інфрачервоній частині спектра. Тому для того, щоб розрізнити здорову та хвору рослинність, варто використати комбінацію каналів – середній інфрачервоний, ближній інфрачервоний і зелений спектральні діапазони. На рисунку 2.36, а показаний знімок Чесапикської затоки й Балтимора у США в природних RGB кольорах. На рисунку 2.36, б показана та сама ланка земної поверхні, але тепер кольори RGB позначають ближній інфрачервоний, червоний і зелений відповідно. Тепер рослинність подається не зеленою, а червоною, бо найкраще відбиває саме інфрачервоне світло.

Метод створення **індексних зображень** – один із найпростіших та найпоширеніших методів дешифрування супутникових знімків, що також базується на спектральних особливостях об'єктів дослідження та фактично є математичною операцією з кількома спектральними каналами. Однак, на відміну від методу комбінування каналів, у результаті формується індексне зображення, піксель якого може набувати значення у певному визначеному діапазоні значень. Це дозволяє порівнювати між собою отримані у результаті індексні зображення на різні території чи зроблені у різні часові періоди.

Нормалізований диференційний вегетаційний індекс (*Normalized Difference Vegetation Index; NDVI*) – простий кількісний показник кількості

фотосинтетичної активної біомаси (що зазвичай називається вегетаційним індексом). Це є одним з найпоширеніших і використовуваних індексів для вирішення завдань, які застосовують кількісні оцінки рослинного покриву. Індекс для кожного пікселу знімка обчислюється за наступною формулою: $NDVI = (NIR - Red) / (NIR + Red)$, де *NIR* – значення піксела у інфрачервоному (760 – 900 нм) каналі багатоканального знімка, *Red* – значення такого ж піксела у червоному (630-690 нм) каналі знімка.

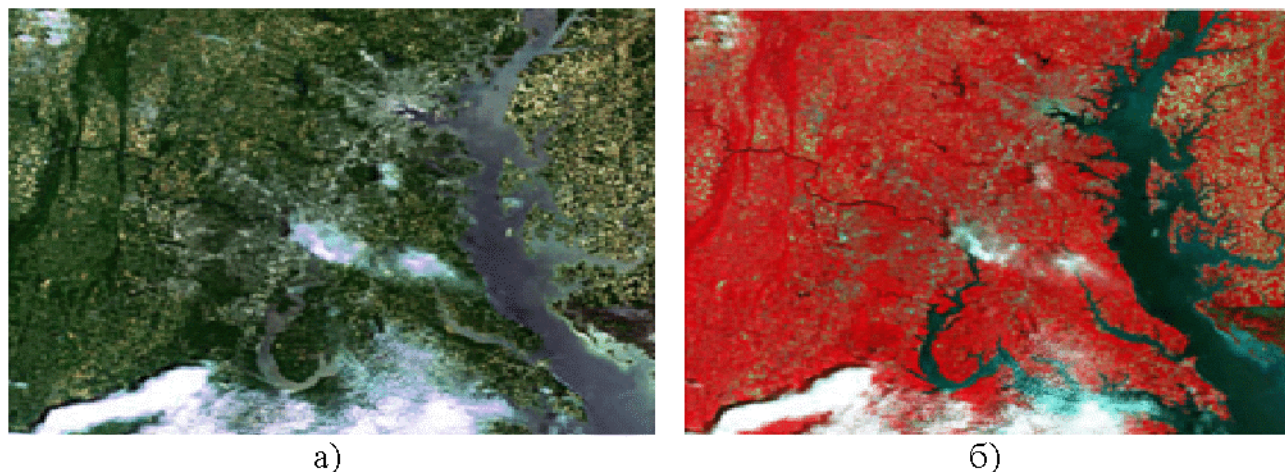


Рис. 2.36 – Подання знімка у псевдокольорах: а – зображення у природних кольорах; б – псевдокольорове зображення

На рисунку 2.37, а показане зображення *NDVI*, створене зі знімку Британських островів, що отриманий датчиком *NOAA AVHRR* у червні. На рисунку 2.37, б показане так само отримане зображення у жовтні того ж року. Збільшення червоного кольору на зображенні 2.37,б показує зниження індексу вегітації у жовтні порівняно з червнем, що пояснюється закінченням сезону вегітації рослин в осені.

У разі аналізу знімків великих ланок земної поверхні метод візуального дешифрування є трудомістким і досить витратним за часом, тому актуальним є використання способів автоматичного дешифрування (автоматичної класифікації). **Автоматична класифікація** є методом тематичної обробки космічних знімків, що полегшує їх візуальне дешифрування. Автоматична класифікація виконує задачі розпізнання та відокремлення на космічних знімках будь-яких об'єктів. Класифікація належить до автоматизованих способів дешифрування. У разі їх застосування користувачу не потрібно вручну обводити межі об'єктів, за нього це робить комп'ютерна програма.

Автоматичною класифікацією називають процес розбиття пікселів неперервного растрового зображення на категорії на основі їх спектральних значень, в результаті чого кожному пікселу присвоюється нове значення. За ступенем участі користувача в процесі автоматизованого дешифрування алгоритми класифікації поділяють на дві групи: класифікація без навчання (автономна класифікація, некерована класифікація, кластеризація) та класифікація з навчанням (керована класифікація). До керованої класифікації відносяться методи максимальної правдоподібності, мінімальної відстані, відстані Махаланобіса, метод спектрального кута, метод паралелепіпедів,

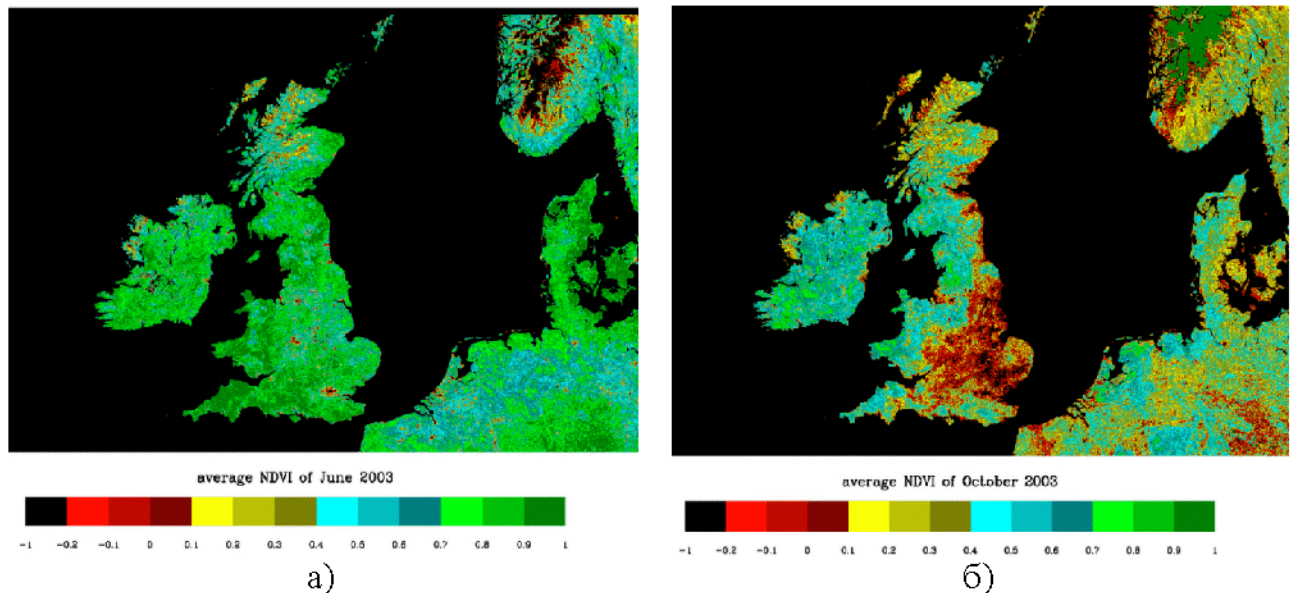


Рис. 2.37 – Змінення з часом індексу вегітації: а – зображення *NDVI* у червні; б – зображення *NDVI* у жовтні

бінарне кодування тощо. Основними методами некерованої класифікації є метод ISODATA (ітераційна самоорганізована методика аналізу даних), метод К-середніх, кластерний аналіз, тощо.

2.2.5 Програмні засоби обробки повітряно-космічних знімків

Наразі існує багато різноманітних програмних засобів обробки повітряно-космічних знімків. Більшість з них є вузькоспеціалізованими для виконання галузевих задач. Найбільш відомими універсальними і потужними програмними засобами обробки є пакет програм від *ERDAS IMAGINE* © від *ERDAS-Laika Inc* та програмна система *ENVI* © (*the ENVironment for Visualizing Images* середовище візуалізації зображень) від *RSI Harris Geospatial Solutions Inc*. Останнім часом засоби обробки знімків поєднуються з геоінформаційними системами (ГІС).

Пакет програм *ERDAS IMAGINE* © лідирує серед використовуваних у світі програмних засобів обробки зображень. Він побудований по модульно-ієрархічному принципі, що дозволяє користувачеві придбати тільки необхідні модулі. Він складається із трьох базових наборів програм: *IMAGINE Essentials*, *IMAGINE Advantage* і *IMAGINE Professional* (для починаючих, підготовлених і професійних користувачів), кожний з яких містить у собі й розширює функціональні можливості попереднього набору. Ця структура програмного забезпечення базується на загальній архітектурі й має той самий інтерфейс користувача і функціональні можливості на різних комп'ютерних платформах. Програмне забезпечення поєднує у собі функції системи обробки аерокосмічних знімків та ГІС. [14]

Конфігурація *IMAGINE Essentials* надає базові засоби для візуалізації, інтерактивної корекції й кластеризації (*Isodata*) зображень і створення тематичних карт. *IMAGINE Advantage* призначений у першу чергу для тих користувачів, хто займається більше глибоким аналізом даних дистанційного зондування й працює з

ними регулярно. Він збільшує функціональні можливості *Essentials* за рахунок блоку розширених функцій обробки зображення, функцій аналізу растрової ГІС із можливостями моделювання, засобів побудови поверхонь, а також ортотрансформування.

IMAGINE Professional має всі функціональні можливості *Essentials* і *Advantage*, а також додаткові можливості щодо алгоритмів класифікації й засобів роботи з радіолокаційними знімками. Розширення містять:

можливість використання автоматизованих алгоритмів класифікації багатозональних зображень для виділення площинних об'єктів при побудові тематичних карт;

різноманітні засоби оцінки якості, як для системи еталонів (навчальних вибірок), так і отриманої тематичної карти;

різні способи створення системи еталонів: ручне цифрування контурів еталонних ділянок на знімку, автоматичне виділення на знімку областей із заданим ступенем внутрішньої неоднорідності, а також еталонних ділянок, що задаються площинними об'єктами на векторній карті у форматі *ARC/INFO*;

оцінку ступені надійності і якості проведеної класифікації. [14]

Як засіб для первинної обробки знімків з пакетів постачання багатьох операторів систем космічного знімання використовується програмний комплекс *ENVI* © (рис. 2.38). Він має дуже зручні засоби перегляду знімків, потужні тощо), виконує різні операції тематичної обробки багатоканальних знімків, включаючи засоби покращення якості знімків (контрастування, фільтрація, поєднання панхроматичного каналу та кольорних, розрахунок інформаційних індексів, класифікацію різними методами тощо). *ENVI* останніх версій добре інтегрується з *ArcGIS*. Це дозволяє легко і швидко переносити дані між програмними комплексами [1]. Програмна система *ENVI* ® забезпечує всебічну візуалізацію даних і аналіз зображень будь-якого розміру й будь-якого типу. *ENVI* написаний мовою *IDL*® (*Interactive Data Language* – інтерактивна мова даних), що являє собою мову структурного програмування, і забезпечує інтегровану обробку зображень. Однією з основних переваг *ENVI* є його унікальний підхід до відображення процесу обробки, у якому комбінуються файлові й багатоканальні методи з інтерактивними функціями. Коли відкритий файл багатоканального знімка, шари спектральних каналів, що входять до його складу, зберігаються в списку, де до них можна звертатися з використанням всіх функцій системи. Якщо відкрито багато файлів, спектральні зображення різних типів можуть оброблятися як група. Група вікон змінюваного розміру на екрані дисплея *ENVI* складається з основного вікна зображення, вікна масштабування, і вікна прокручування. [14]

ENVI забезпечує користувачів багатьма унікальними можливостями інтерактивного аналізу, які доступні усередині цих вікон. Широкі можливості *ENVI* дозволяють простими способами проводити порівняння різноканальних зображень. Програма забезпечує зв'язане просторове/спектральне профілювання многоканальних і гіперспектральних даних у реальному часі та надає користувачам різні способи перегляду багатомірних даних. *ENVI* має

інтерактивні інструментальні засоби для перегляду й аналізу атрибутів векторних зображень і ГІС. [14]

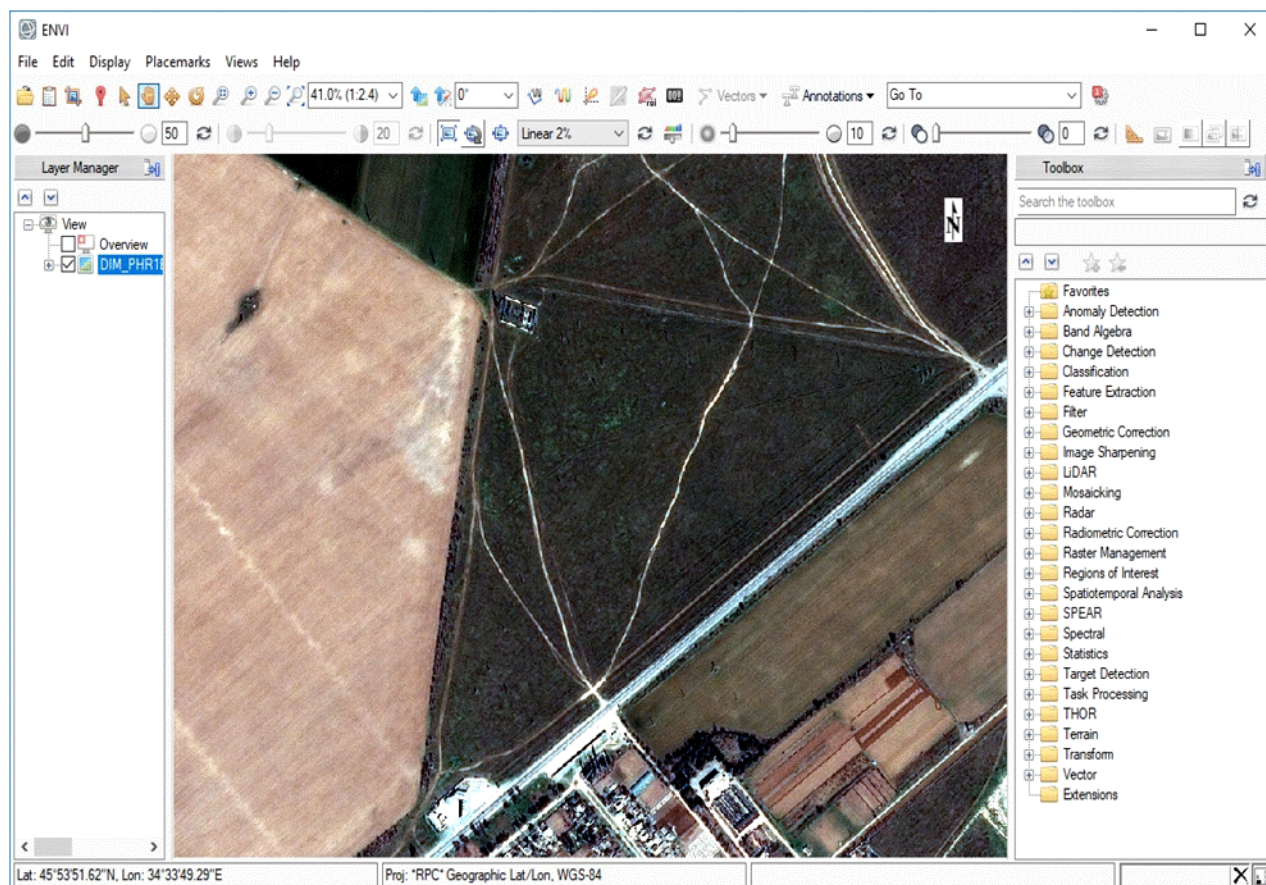


Рис. 2.38 – Інтерфейс програмного комплексу *ENVI*

Зручний візуальний інтерфейс *ENVI* доповнюється великою бібліотекою алгоритмів обробки. *ENVI* включає всі основні функції обробки зображень у рамках графічного інтерфейсу користувача. Ці функції включають перетворення даних, фільтрацію, класифікацію, реєстрацію й геометричну корекцію, інструменти спектрального аналізу, і засоби роботи з радіолокаційними зображеннями. *ENVI* не накладає обмежень на кількість спектральних діапазонів, які можуть бути оброблені, так що можуть використовуватися багатоспектральні або гіперспектральні масиви даних. *ENVI* підтримує всебічну діалогову обробку великих багатоканальних масивів даних, екранних зображень, спектральних діаграм і бібліотек, зацікавлених ділянок зображення їх забезпеченням гнучких можливостей відображення та з географічною прив'язкою при перегляді зображення. [14]

ENVI реалізує наступні основні групи функцій роботи із зображеннями:

базові технологічні операції роботи із зображеннями (введення-виведення, редагування, обчислення й перегляду статистики, тощо.);

функції корекції геометричних і радіометричних спотворень відомих систем космічного спостереження;

загальні технології покращення зображень;

технології спектрального (гіперспектрального) аналізу даних;

функції інтерактивного дешифрування й класифікації;

технології просторової прив'язки, зшивання зображень;

обробку даних у радіодіапазоні;
 функції векторного відображення й топографічного аналізу даних;
 забезпечення великого набору картографічних проекцій;
 функції підготовки тематичних карт;
 підтримка великого числа растрових і векторних форматів даних. [14]

2.2.6. Застосування геоінформаційних систем в обробці повітряних і космічних знімків

Сучасні потужні ГІС на кшталт комерційної *ArcGIS* © *ESRI* або безкоштовної *QGIS* мають в своєму складі потужні засоби обробки повітряно-космічних знімків. Найбільш потужною ГІС, що використовується для обробки повітряно-космічних знімків є *ArcGIS* © *ESRI*. Він складається з базового програмного ядра, інтегрованих програм тематичного спрямування: *ArcCatalog*, *ArcMAP*, *ArcGlobe*, *ArcScene* та декількох додаткових тематичних програмних модулів, що підключаються окремо: *Spatial Analyst*, *3D Analyst*, *Tracking Analyst*, *Network Analyst*, *Geostatistical Analyst*, *ArcGIS Data Interoperability*, *ArcScan*, *Publisher*, *Schematic*, які інтегровані в одну програмну оболонку з єдиним інтерфейсом. Кожний модуль забезпечує цілу низку інструментів для роботи з геопросторовими даними [15].

Базове програмне ядро *ArcGIS* забезпечує розміщення і відображення даних, обслуговує операції щодо роботи з базами даних, забезпечує інформаційну взаємодію інтегрованих програм та додаткових тематичних програмних модулів.

Програма *ArcCatalog* відповідає за управління різноманітними даними з багатьох джерел і створює інформаційну взаємодію інтегрованих програм. На поточних версіях *ArcGIS* програма *ArcCatalog* вбудована в *ArcMap* та має власне робоче вікно (рис. 2.39).

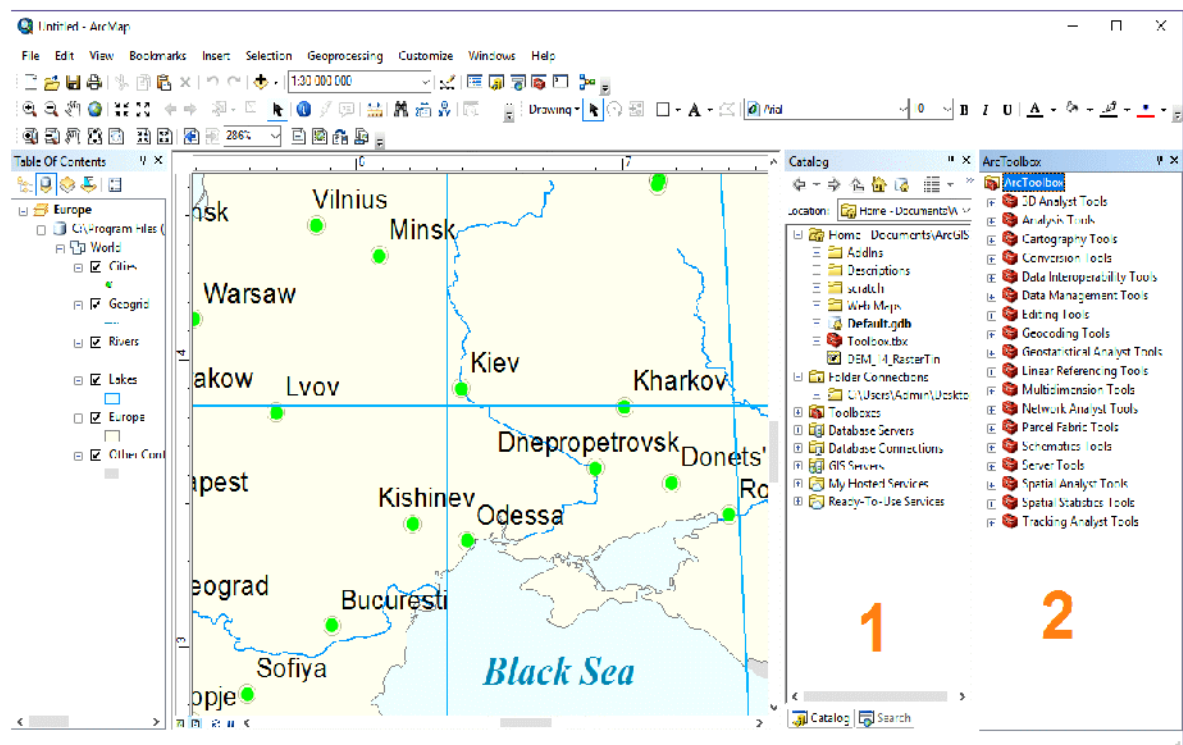


Рис. 2.39 – Інтерфейс програми *ArcMap* зі складу *ArcGIS*

Програма *ArcMap* є найбільш використовуваною в процесі обробки повітряно-космічних знімків. Вона забезпечує виконання операцій обробки з усіма можливими двовимірними даними з можливістю урахування моделей рельєфу. Відображення растрових і векторних даних *ArcMap* здійснює в «пласкому» (плановому) поданні.

Програми *ArcGlobe*, *ArcScene* (рис. 2.40) призначені для роботи з тривимірними даними в глобальному (*ArcGlobe*) та локальному (*ArcScene*) масштабі. Відображення тривимірних даних здійснюється в центральній проекції з точки зору віртуального спостерігача (знімальної камери). Відносно положення спостерігача й освітлювача (Сонця) зручно керується. Обидві програми виконують операції аналізу тривимірних даних, які надаються зовнішнім програмним модулем *3D Analyst* [15].

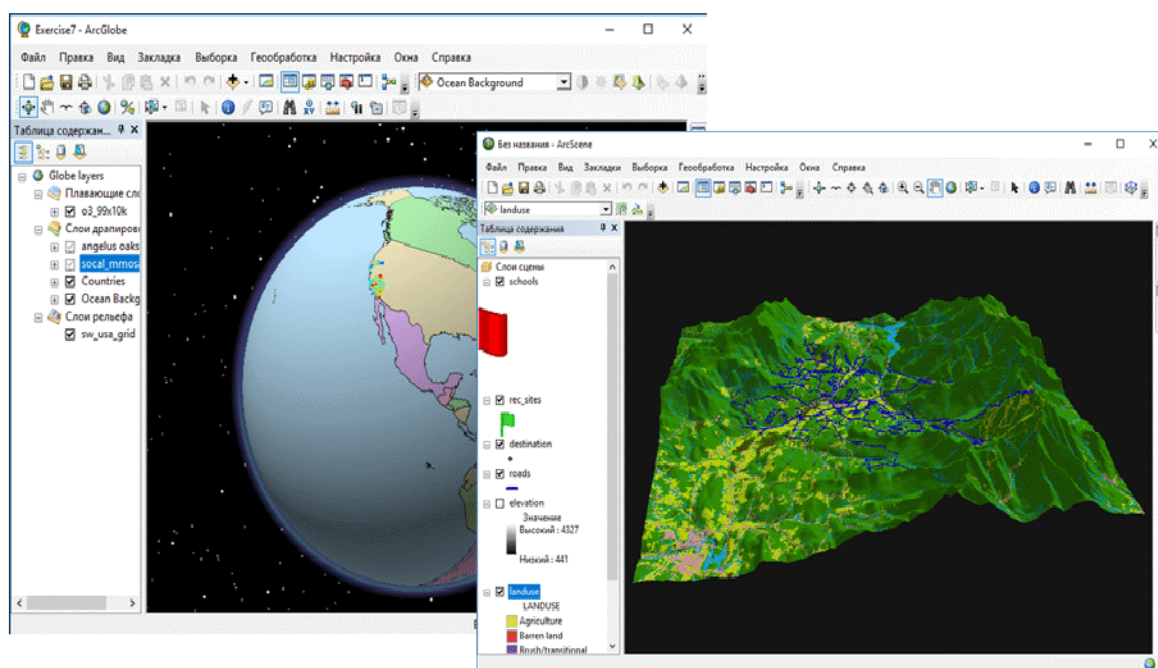


Рис. 2.40 – Інтерфейс програм *ArcGlobe* та *ArcScene* зі складу *ArcGIS*

Найбільш застосовуваними в процесі дешифрування космічних знімків модулями є: *Spatial Analyst*, який забезпечує геопросторову обробку двовимірних даних, *Publisher*, який допомагає автоматизувати створення звітів і *ArcGIS Data Interoperability*, що забезпечує обмін даними різних форм подання. Для покращення відображення даних широко використовується вбудований в *ArcMap* модуль *Image Analyst* (рис. 2.41).

ГІС програма *QGIS* (<https://qgis.org/uk/site/>) – це безкоштовна ГІС з відкритим програмним кодом і гнучкою системою функціональних модулів, яка підтримується й активно вдосконалюється групою розробників – добровольців. Ця програма дає змогу візуалізувати, редагувати, аналізувати дані, оформлювати карту до друку тощо. За допомогою програми ГІС можна відкривати цифрові карти на своєму комп'ютері, створювати нову просторову інформацію для додавання на карту, створювати друковані карти, налаштовані відповідно до певних потреб, і виконувати просторовий аналіз. Головне вікно *QGIS* представлене на рисунку 2.42.

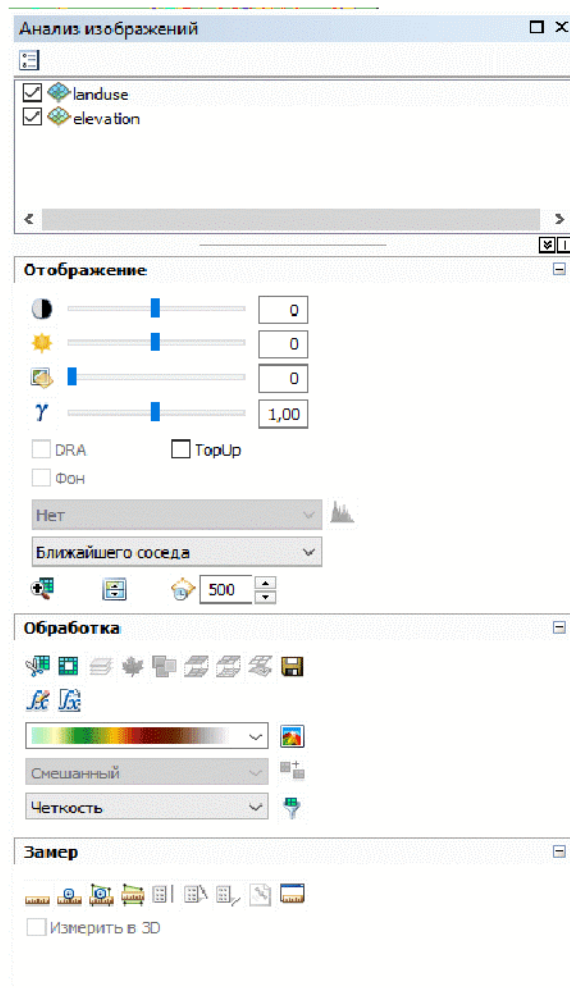


Рис. 2.41 – Інтерфейс вбудованого модуля *Image Analyst*

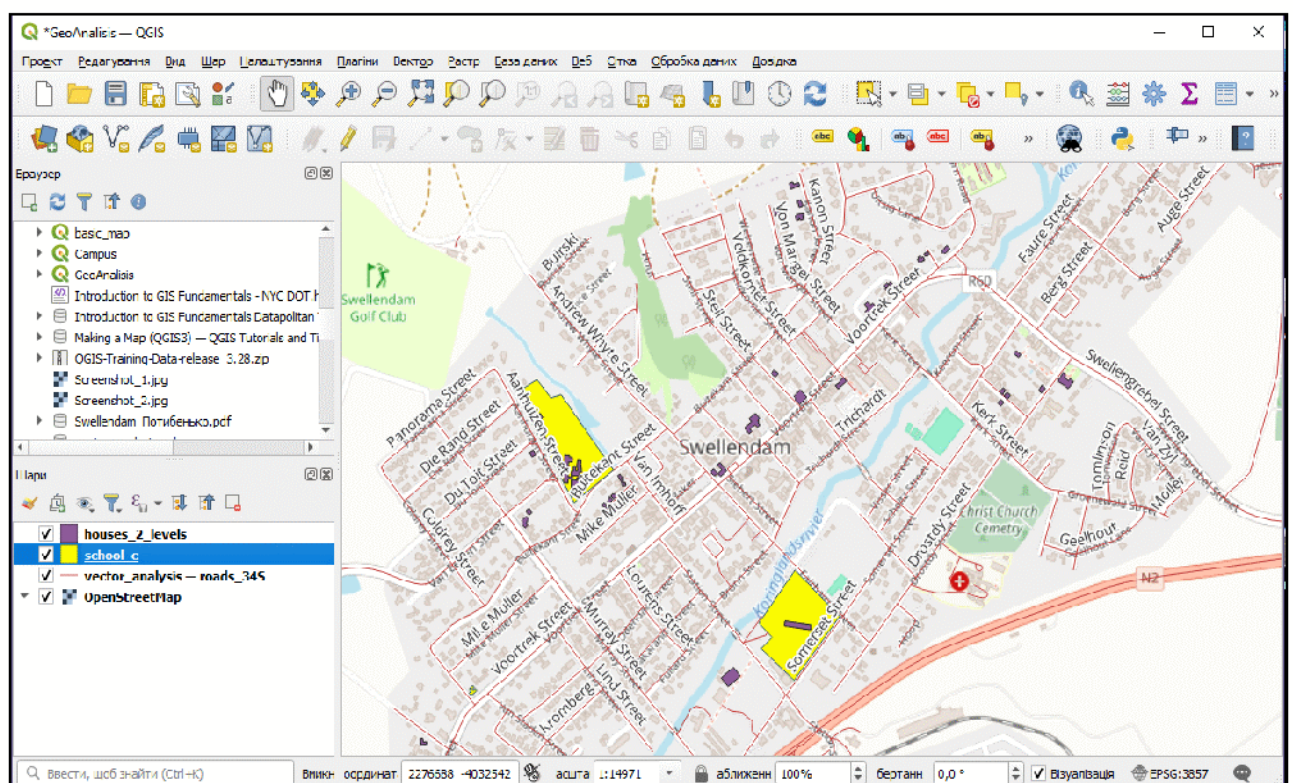


Рис. 2.42 – Головне вікно *QGIS*

У верхній частині вікна програми є звичайне меню з елементами «Проект», «Редагувати», «Шар» тощо. При натисканні на такий елемент мишею випадає панель дій. Ці дії дають змогу вказати *QGIS*, що потрібно зробити. Меню додатків розгортаються, показуючи список дій, які можна виконати. Наприклад, можна використати панель «Шар», щоб вказати *QGIS* додати новий растровий шар знімку до результатів відображення (рис. 2.43).

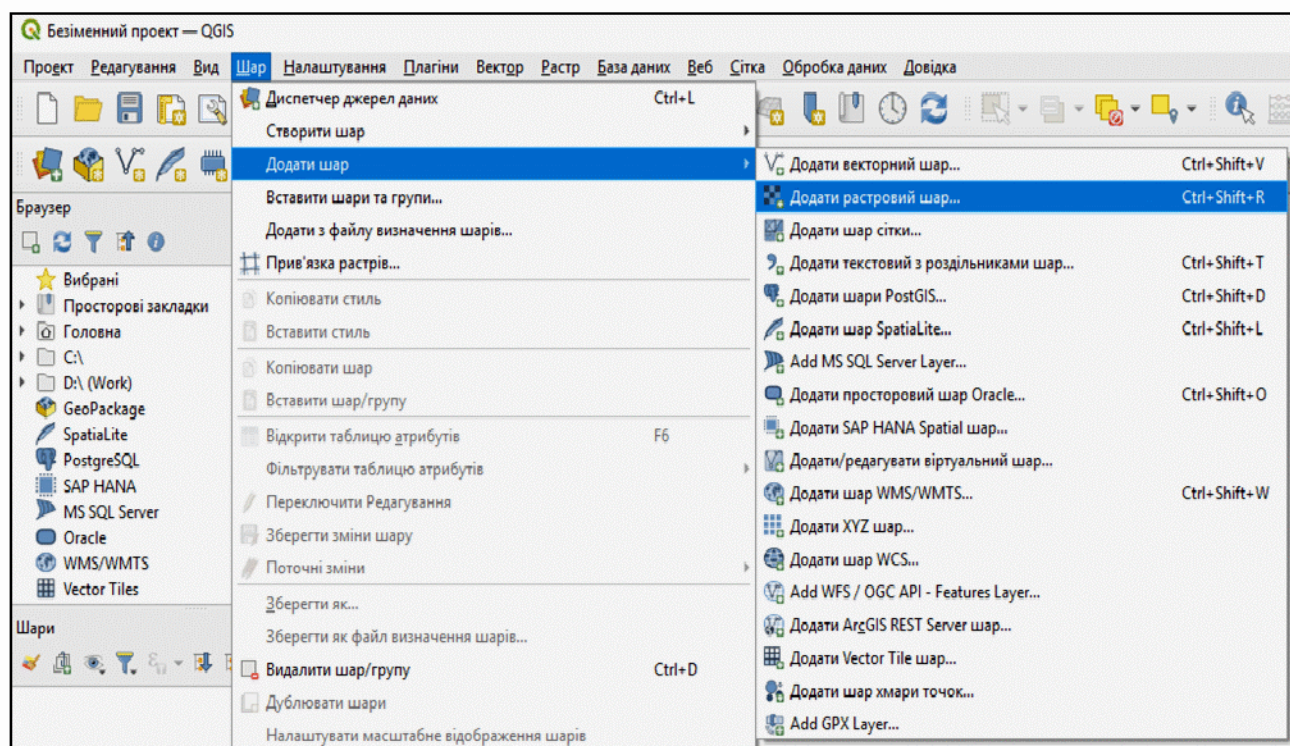


Рис. 2.43 – Запуск інструменту додавання нового растрового шару за допомогою меню *QGIS*

Панелі інструментів (ряди невеликих зображень, які можна клацати мишею) зазвичай розташовуються безпосередньо під меню і забезпечують швидкий спосіб виконання часто необхідних дій (рис. 2.44).



Рис. 2.44 – Панелі інструментів *QGIS*

Панелі інструментів забезпечують швидкий доступ до часто використовуваних функцій. Наведення миші на зображення зазвичай показує, що станеться якщо натиснути на нього (виринаюча підказка).

QGIS надає достатньо професійних засобів обробки даних повітряно-комічного спостереження для багатьох галузей застосувань. Вона широко використовується там, де є потреба в геопросторовій інформації спостереження, але обмаль коштів для придбання більш потужних засобів на кшталт *ArcGIS*, *ENVI* або *ERDAS IMAGINE*. Це дуже зручний засіб для первинного навчання технологіям обробки геопросторової інформації повітряно-космічного спостереження.

Контрольні питання

1. Що є причиною радіометричних викривлень на космічних знімках?
2. Для чого використовують яскравісні поелементні перетворення?
3. Для чого використовують фільтрацію зображень?
4. У якій ланці значень потужності вхідного потоку розташована зона нечутливості на типовій характеристиці передачі фотоприймача?
5. У якій ланці значень потужності вхідного потоку розташована зона засліплення на типовій характеристиці передачі фотоприймача?
6. Якій ефект на зображенні дає зменшення нахилу характеристики фотоприймача?
7. Які ефекти на зображенні дає збільшення нахилу характеристики фотоприймача?
8. Як проявляються розбіжності у характеристиках фотоприймачів різних кольірних каналів?
9. До якого негативного наслідку можуть привести нелінійні перетворення значень сигналу зображення?
10. У чому полягає особливість корегування фотоприймачів на ПЗЗ?
11. З якою метою застосовують гама-корегування зображень?
12. Що потрібно зробити з коригувальною кривою для збільшення або зменшення контрасту на зображенні?
13. Що потрібно зробити з коригувальною кривою для збільшення або зменшення яскравості зображення?
14. Що потрібно зробити з коригувальною кривою для отримання негативного зображення?
15. Що потрібно зробити з коригувальною кривою для збільшення або зменшення контрасту у світлих або у темних частинах зображення?
16. Що потрібно зробити з коригувальною кривою для збільшення або зменшення яскравості у світлих або у темних частинах зображення?
17. Яка має бути коригувальна крива для створення бінарної маски світлих (темних, сірих) об'єктів?
18. Як на формі гістограми зображення проявляється низький контраст?
19. Як на формі гістограми зображення проявляється низька яскравість?
20. Як на формі гістограми зображення проявляються наслідки збільшення контрасту?
21. Що використовують за допоміжну поверхню для перенесення точок з референц-еліпсоїда на площину в проекції Меркатора?
22. Що використовують за допоміжну поверхню для перенесення точок з референц-еліпсоїда на площину в проекції УСК-2000?
23. Як визначається геодезична широта?
24. Як визначається геодезична довгота?
25. Як визначається геодезична висота?
26. Як визначаються прямокутні координати X та Y у системі координат УСК-2000?

27. Що використовують за опорну інформацію в процесі визначення поліноміальної моделі викривлень в процесі геометричного корегування та просторової прив'язки знімків?
28. До якого виду дешифрування повітряно-космічних знімків відносять задачі виявлення дорожньої мережі, населених пунктів, гідрографії, рослинності та інших елементів місцевості та встановлення їх зв'язків, складання та відновлення карт?
29. В чому полягає сутність етапу виявлення в процесі дешифрування повітряно-космічних знімків?
30. В чому полягає сутність етапу аналізу в процесі дешифрування повітряно-космічних знімків?
31. В чому полягає сутність етапу розпізнавання в процесі дешифрування повітряно-космічних знімків?
32. В чому полягає сутність етапу інтерпретації в процесі дешифрування повітряно-космічних знімків?
33. У чому полягають розбіжності між програмними засобами обробки повітряно-космічних знімків *ArcGIS* та *QGIS*?
34. У чому полягають розбіжності між програмними засобами обробки повітряно-космічних знімків *ArcGIS* та *ERDAS IMAGINE*?

Предметний покажчик

А

Автоматична класифікація – 118
Адаптація ока – 108
Акомодація – 109
Атмосферна корекція – 82
Апогей – 26
Апсида – 26

Б

Багатоспектральний – 53
Безпілотний літальний апарат (БПЛА) – 4, 6, 10, 36, 58, 67, 113
Блискучість і засліпленість – 109
Бортовий час – 24

В

Вади ока – 110
Вирівнювання гістограми – 90
Виявлення – 101, 108
Відбиття від поверхонь – 11, 13
Візуальне дешифрування – 106
Вікна прозорості атмосфери – 11
Відстань найкращого зору – 109
Видимий діапазон – 12

Г

Галузеве дешифрування – 111
Гамма-корекція – 85
Геод – 91
Геоінформаційна система (ГІС) – 66, 69, 119
Географічна система координат – 93
Геодезичні координати – 94
Геостационарна орбіта – 31
Гіперспектральний – 53
Гістограмні операції – 82, 88
Годинні пояси – 24
Гострота зору – 110
Граничний контраст – 108

Д

Дані знімання – 37
Дешифрування – 106
Дзеркальне відбиття – 14
Дзеркально лінзовий об'єктив – 43
Дифузне відбиття – 13
Довгота – 12, 19, 93
Діаграма спрямованості – 46, 59
Діапазон хвиль – 11
Дистанційне зондування Землі – 8

Е

Еквалізація гістограми – 90
Ексцентриситет орбіти – 26
Елементи орбіти – 28
Ефемеридний час – 23

Ж

Жовта пляма ока – 107

З

Закон Кеплера – 25

Знімок – 15, 36

Зорові ілюзії – 110

Зорове стомлення – 110

Зоряна доба – 21

Зоряний час – 21

І

Індексне зображення – 117

Інерційність зору – 108

Інтерпретація – 112

Істинний сонячний час – 21

ІЧ діапазон – 12

К

Картографічна проекція – 93, 95

Класифікація – 118

керована – 119

некерована – 119

Командно-вимірювальний комплекс – 39

Комплекс космічного спостереження – 37

Контрастна чутливість ока – 108, 109

Космічний апарат – 17

космічного спостереження – 38

Космічний знімок – 38

М

Методи тематичної обробки – 117

Метод комбінування каналів супутникових знімків – 117

Місцевий час – 23

Н

Наземний комплекс управління – 39

Наземна станція приймання інформації – 38, 61

Нормалізований диференційний вегетаційний індекс – 117

О

Обернене контрастне масштабування – 88

Оптико-електронне знімання – 37

Оптична система ока – 107

Орбіта – 25

екваторіальна – 29, 31

сонячно-синхронна – 30

Орбітальне угруповання – 37

П

Первинна обробка – 38

Перигей – 26

Підсупутникова точка – 29

Піксель – 69

Поле зору ока – 110

Поле зору приладу – 42

Польотний час – 24

Попередня обробка – 60

Проекція Гауса – 97

Просторова розрізненість (на місцевості) – 52

Просторова роздільна здатність засобу знімання – 52

Поглинання та розсіювання в атмосфері – 11, 14

Прилад із зарядовим зв'язком – 42, 44
Природні кольори – 117
Прямокутні координати – 99
Псевдокольоровий знімок – 117
Пункт прийому та попередньої обробки інформації – 38, 58

Р

Радіолінія – 58
Радіолокаційний знімок – 49
Радіолокаційні станції бічного огляду – 37, 46
із синтезованою апертурою антени – 50
Радіометрична корекція – 82
Радіометрична розрізненість – 54
Растр – 59, 73
Референц-еліпсоїд – 92
Розпізнавання – 112
Розрізнення ока – 110

С

Середньосонячний час – 22
Сидеричний період – 28
Смуга захоплення – 40
Смуга огляду – 41
Сонячна система – 16
Сонячно-синхронна орбіта – 30
Спектроподільний блок – 44
Спектральна розрізненість – 53
Спеціальні перетворення гістограм – 88
Станції приймання спеціальної інформації – 38
Система координат – 17
Сумарна освітленість – 12

Т

Тайл – 75
Телеметрична інформація – 59
Тематична обробка – 38, 105
Траса космічного апарату – 30
Тропічний рік – 22

Ф

Фільтрація – 82
Фонове освітлення – 109

Ц

Центр обробки спеціальної (тематичної) інформації – 38
Центр оперативного планування – 38
Центр управління польотом – 39
Центр спостереження – 33

Ч

Час – 20

Ш

Широта – 93, 94

Я

Яскравісні поелементні перетворення – 82
Яскравісний зріз – 89

Перелік використаних джерел

1. Воєнне дешифрування аерокосмічних знімків. Частина 1 : навч. посіб. / С. І. Болобан, О. Є. Горшенін, О. М. Кондратов, Р. М. Осадчук. – Житомир : ЖВІ, 2020. – 316 с. : іл.
2. Основи дистанційного зондування Землі : історія та практичне застосування : навч. посіб. / С. О. Довгий, В. І. Лялько, С. М. Бабійчук, Т. Л. Кучма, О. В. Томченко, Л. Я. Юрків. – К. : Інститут обдарованої дитини НАПН України, 2019. – 316 с.
3. Закон України «Про космічну діяльність» Із змінами і доповненнями, внесеними Законами України у редакції від 10 жовтня 2024 року. Електронний ресурс – <https://ips.ligazakon.net/document/z960502?an=1>
4. Фриз П. В. Основи орбітального руху космічних апаратів: підручник / П. В. Фриз. – Житомир : ЖВІ НАУ, 2012. – 348 с.: іл.
5. ДСтУ 4220 – 2003. Дистанційне зондування Землі з космосу. Терміни і визначення понять. – Київ : Держспоживстандарт України, 2003. – 19с.
6. ДСтУ 4758 – 2007. Оброблення даних. Терміни і визначення понять. – Київ : Держспоживстандарт України, 2007. – 19с.
7. Основи побудови комплексів космічної видової розвідки / О. Є. Горшенін, С. О. Кондратенко, О. Ф. Дубина, П. П. Топольницький; за ред. О. Є. Горшеніна. – Житомир : ЖВІРЕ, 2007. – 388 с.
8. Фриз П. В. Основи побудови спеціальних комплексів космічної видової розвідки: підручник / П. В. Фриз. – Житомир : Вид. О. О. Євенок, 2020. – 412 с. : іл.
9. С. Г. Вертегел, В. Ю. Вишняков, В. В. Гуреля, С. О. Сластін, О. М. Піскун, С. П. Харченко, В. С. Мороз Екологічна безпека та природокористування, № 1 (41), 2022. DOI: <https://doi.org/10.32347/2411-4049.2022.1.89-101>
10. Наземний інформаційний комплекс Центру космічних технологій Поліського національного університету. Ковбасюк С. В., Випорханюк Д. М., Артюхов А. І. – Житомир 2021. Електронний ресурс – https://space.polissiauniver.edu.ua/images/2021/04/07/ckt/0_НІК_ЦКсТ_2021-04-07.pdf
11. Google Earth. Стаття Wikipedia. Електронний ресурс – https://en-wikipedia-org.translate.goog/wiki/Google_Earth/
12. Програма завантаження карт та супутникових зображень SAS Planet. Електронний ресурс – <http://www.sasgis.org/download/>.
13. Горшенін О. Є., Дубина О. Ф., Кондратенко С. О., Болобан С. І. / Під ред. О. Є. Горшеніна. Цифрова обробка зображень та основи фотограмметрії : навчальний посібник – Житомир: ЖВІРЕ, 2007. – 240с
14. Космічні системи дистанційного зондування землі подвійного призначення. / І. Д. Варламов, В. В. Зуйко, А. М. Козуб, Д. П. Пашков : Навчальний посібник. – К.: НУОУ, 2015. – 204 с.
15. Шипулін В. Д. Посібник з навчання роботі з кадастрово-реєстраційною системою / В. Д. Шипулін; компанія ІЛС Україна. – К. : «Географіка», 2011. – 439 с.