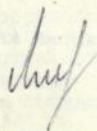


НАЦІОНАЛЬНА АКАДЕМІЯ НАУК УКРАЇНИ  
ФІЗИКО-МЕХАНІЧНИЙ ІНСТИТУТ ім.Г.В.КАРПЕНКА

На правах рукопису

ЛИЧАК  
ОЛЕГ ВАСИЛЬОВИЧ



РОЗРОБКА МЕТОДІВ ТА СИСТЕМ СПЕКТРОПОЛЯРИЗАЦІЙНОГО  
ДИСТАНЦІЙНОГО ЗОНДУВАННЯ

Спеціальність 05.11.16 - інформаційно-вимірвальні системи

Автореферат  
дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук

Львів-1995



00777969 (2)

Дисертацією є рукопис

Робота виконана в Фізико-механічному Інституті  
Національної Академії Наук України, м.Львів.

Науковий керівник:

кандидат технічних наук БАЧЕВСЬКИЙ Р.С.

Офіційні опоненти:

доктор технічних наук, професор СМЕРДОВ А.А.

кандидат технічних наук ДРАБИЧ П.П.

Провідна установа:

Науково-дослідний центр аерокосмічної інформації і  
екологічного моніторингу НАН України і НКАУ.

Захист відбудеться "28" 05 1995 р. об 16 год. на  
засіданні спеціалізованої вченої ради К.016.42.02 по присуд-  
женню наукового ступеня кандидата технічних наук у Фізико-  
механічному інституті ім. Г.В.Карпенка НАН України за адре-  
сою 290601, м.Львів, МСП, вул.Наукова,5.

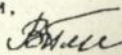
З дисертацією можна ознайомитися у бібліотеці  
Фізико-механічного інституту ім. Г.В.Карпенка НАН України.

Автореферат розісланий "28" 02 1995 р.

Учений секретар

спеціалізованої вченої ради,

кандидат технічних наук

 ПОГРЕБЕННИК В.Д.

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми досліджень. Методи дистанційних досліджень земної поверхні, зокрема технології відбору і обробки даних дистанційного зондування Землі у вигляді зображень, є важливою складовою частиною систем природокористування. Переважна більшість існуючих геоінформаційних систем побудовані саме на основі даних дистанційних зображень оптичного діапазону. Широка номенклатура бортових зйомочних систем дистанційного зондування, доступність і дешевизна космічних зображень, доступність обчислювальних ресурсів ЕОМ значної потужності перевели дистанційні методи зондування з області наукових та спеціальних інтересів в область широкого практичного використання. Найбільше поширення отримали методи багатоспектральної зйомки, тобто одночасної зйомки досліджуваної поверхні в різних спектральних діапазонах.

Існуючі методи обробки даних дистанційного зондування оптичного діапазону оперують виключно з параметрами зондувального (відбитого) електромагнітного випромінювання (потужність відбитого світла в певному спектральному діапазоні, стан поляризації, радіаційна температура та інші). Результатом обробки даних також є параметри випромінювання або їх прості співвідношення. Разом з тим, широко використовувані методики відбору-обробки оптичних зображень Землі як правило не вирішують задач визначення електрофізичних параметрів досліджуваної поверхні, які є важливими при тематичній оцінці стану природного середовища. Результати наземних досліджень, аерозйомки та космічної зйомки часто мають недостатньо високий ступінь кореляції, щоб можна було однозначно твердити про достовірність даних дистанційного зондування. Один з

можливих шляхів підвищення достовірності даних дистанційного зондування вбачається у використанні додаткових параметрів випромінювання, відбитого реальною поверхнею, зокрема поляризаційних параметрів.

Методи поляризаційного оптичного дистанційного зондування найчастіше використовуються в астрономії для дослідження хімічного і гранулометричного складу позаатмосферних тіл та утворень. В дистанційному зондуванні Землі поляризаційні параметри світла використовуються переважно для дослідження стану атмосфери і атмосферних утворень. Реалізовані системи пасивної зйомки, які використовують Сонце в якості джерела неполяризованого зонduючого світла, а також системи активної зйомки, які використовують потужні лазери в якості джерела зонduючого випромінювання.

Існуючі методи і системи поляризаційного дистанційного зондування земної поверхні передбачають використання механізму розсіювання неполяризованого сонячного світла на нерівностях поверхні Землі. Інформаційним параметром в даному випадку служить ступінь лінійної поляризації відбитого (розсіяного) поверхнею сонячного світла або його залежність від кута спостереження (так звана поляризаційно-фазова крива). Широке практичне використання поляризаційних методів стримується неоднозначностями, що виникають в процесі інтерпретації результатів зондування внаслідок труднощів фізично коректного моделювання взаємодії оптичного випромінювання з реальною землею поверхнею. В зв'язку з цим розробка поляризаційних методів дистанційного зондування та систем для їх реалізації є актуальною з точки зору можливого комплексування методів контактних (зокрема геофізичних) досліджень і дистанційного оптичного картування. Дослідження тематичної

інформативності спектрополяризаційного методу являє інтерес з точки зору дослідження фізичного механізму взаємодії поляризованого світла з реальною поверхнею Землі і виявлення ефектів, які впливають на процес взаємодії.

Метою роботи є розробка нових методів та інформаційно-вимірвальних систем спектрополяризаційного дистанційного зондування.

Для досягнення мети роботи були поставлені і вирішені наступні основні задачі:

- в'яснення механізму взаємодії поляризованого випромінювання оптичного діапазону з реальною поверхнею ґрунту і розробка адекватної моделі взаємодії для задач дистанційного зондування;
- вибір та обґрунтування фізичної моделі верхнього шару ґрунту для задач поляризаційного дистанційного зондування;
- розробка та практична реалізація методів та систем поляризаційного дистанційного зондування;
- розробка та практична реалізація тематично-орієнтованих методів обробки спектрополяризаційних зображень;
- виявлення тематичної спрямованості спектрополяризаційного зондування.

Методи дослідження. В процесі виконання роботи використовувалися методи теорії систем, функціонального аналізу, лінійної алгебри, факторного аналізу електродинаміки, кристалографії.

Теоретична і практична цінність роботи полягає в розробці та обґрунтуванні нових технологій поляризаційного оптичного дистанційного зондування та створенні спеціальних інформаційно-вимірвальних систем для їх реалізації, які

вперше дозволили зв'язати на рівні електрофізичних параметрів дані контактної наземної електророзвідки методом КВЕЗ з даними оптичного картування з борту літального апарату.

**Наукова новизна.** Новими науковими результатами роботи є:

1. Фізична модель процесу поляризаційного дистанційного зондування, запропонована на основі дослідження механізму взаємодії поляризованого оптичного випромінювання з реальною поверхнею ґрунту.

2. Розроблена модель відкритого ґрунту для задач поляризаційного дистанційного зондування у вигляді анізотропного поглинаючого кристалу.

3. Розроблений метод спектрополяризаційного дистанційного зондування.

4. Розроблена методика тематичної обробки дистанційних поляризаційних зображень.

**Реалізація результатів роботи.** Теоретичні та експериментальні результати дисертаційної роботи реалізовані в процесі виконання наступних робіт:

1. Держбюджетної теми РВ 24/291 "Розробка та дослідження високопродуктивних оптико-електронних методів і автоматизованих засобів обробки та аналізу даних дистанційного зондування" (1988-1992 р.).

2. Держбюджетної теми РВ 24/362 "Дослідження граничних можливостей методів дистанційного відбору інформації в параметрах поляризації в оптичному та інфрачервоному діапазонах" (1990 р.).

3. Проекту 6.02.02/099-92 "Розробка інформаційних технологій і системного забезпечення регіонального дистанційного моніторингу в інтересах екологічних досліджень та раціо-

нального природокористування району видобутку сірки Яворівського ВО "Сірка" по науково-технічній програмі 6.2.2. "Перспективні інформаційні технології і системи" Державного комітету України з питань науки і технологій (1992-1995 р.).

4. Проекту 2.05.02/059 "Комплекс багатоспектральних та спектрометричних засобів і інформаційних технологій дистанційного зондування для еколого-географічного картування" Державного комітету України з питань науки і технологій (1993-1995 р.).

4. Господарського договору №1710 між ВНИИКАМ (Санкт-Петербург, Росія) та Фізико-механічним Інститутом НАН "Розробка спектрополяриметра на базі камери МКФ-6М" шляхом створення та впровадження експериментального зразка спектрополяриметра на базі камери МКФ-6М та методики обробки поляризаційних зображень.

Апробація роботи. Основні результати роботи доповідалися автором на: XIII Конференції молодих науковців ФМІ АН УРСР (м. Львів, Україна, 1987 р.); Конференції UNESCO "Spectral signatures for remote sensing purposes" (м. Москва, Росія, 1990 р.); Конференції "Інформаційні технології і системи ITIC-93" (м. Львів, Україна, 1993); Конференції SPIE 2028 "Digital Image Processing XVI" (м. Сан-Дієго, США, 1993 р.); Конференції SPIE 2298 "Digital Image Processing XVII" (м. Сан-Дієго, США, 1994 р.); Конференції SPIE 2265 "Polarization Analysis and Measurement II" (м. Сан-Дієго, США, 1994 р.).

Публікації. Основний зміст дисертації відображений в 7 роботах, в тому числі одному авторському свідоцтві на винахід.

Особистий внесок дисертанта в розробку наукових резуль-

татів є:

1. Розроблена фізична модель процесу поляризаційного дистанційного зондування.

2. Розроблена модель відкритого ґрунту для задач поляризаційного дистанційного зондування у вигляді анізотропного поглинаючого кристалу.

3. Розроблений метод спектрополяризаційного дистанційного зондування.

4. Розроблені принципи побудови системи для практичної реалізації спектрополяризаційного дистанційного зондування.

5. Розроблена методика тематичної обробки дистанційних поляризаційних зображень..

Положення, які виносяться на захист:

принципи побудови системи реалізації спектрополяризаційної зйомки земної поверхні;

модель ґрунту для задач дистанційного поляризаційного зондування;

спектрополяризаційний метод дистанційного зондування та його граничні можливості;

методику тематичної обробки дистанційних спектрополяризаційних зображень;

**Структура роботи.** Дисертаційна робота (рукопис) складається з вступу, п'яти розділів, висновків та списку літератури і містить 152 сторінки машинописного тексту, 69 рисунків, 4 таблиці, 108 бібліографічних посилань.

#### КОРОТКИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтована актуальність теми дисертації, сформульована мета роботи, основні задачі, методи дослід-

жень, теоретична і практична цінність результатів та положення, що виносяться на захист, а також коротко викладено зміст роботи по розділах.

Перший розділ містить аналіз робіт, присвячених розвинутих методам дистанційного зондування оптичного діапазону - багатоспектральним методам та методам, які використовують параметри поляризації світла для вирішення задач дистанційного зондування. Огляд існуючих технологій оптичного дистанційного зондування показав обмеження застосування розвинених багатоспектральних методів дистанційного зондування. Зокрема, кращі результати з виділення тематичних даних одержують в процесі інтерактивної обробки зображень складною послідовністю методів, яка, однак, є менш ефективною для застосування до зображення іншої ділянки поверхні Землі або тієї ж самої, відзнятої в інший час. Відсутність чітких критеріїв застосування оптичних зображень Землі для задач дистанційного зондування і, особливо, однозначного зв'язку між параметрами зображень і фізичними характеристиками об'єктів дослідження створюють труднощі для подальшого розвитку дистанційних методів зондування. Результати лабораторних, польових і дистанційних (з борту літального апарату) експериментів часто мають недостатньо високий ступінь кореляції, щоб можна було ствердити статистичну достовірність дистанційних даних.

У другому розділі проведений детальний аналіз фізичного механізму взаємодії поляризованого випромінювання оптичного діапазону з реальною поверхнею відкритого ґрунту. Для опису відбивання поляризованого світла відкритим ґрунтом запропоновано використати механізм однократного розсіювання (відбивання) із врахуванням локального кута спекулярного відбивання  $\theta_1$ , який аналітично описується наступним чином [Bagrick]:

$$\cos(\theta_1) = \frac{1}{\sqrt{2}} * (1 + \sin(\theta_1) \sin(\theta) \cos(\psi) + \cos(\theta_1) \cos(\theta))^{1/2}$$

(1)

де  $\theta_1$  - кут падіння зондуючого променя,  $\theta$  - кут спостереження,  $\psi$  - азимут площини спостереження. Виявлені особливості спектрополяризаційного дистанційного зондування дозволили запропонувати модель реального ґрунту та сформувані практичні вимоги до процесу зйомки. Однією з таких особливостей є анізотропія оптичних властивостей ґрунту на мікро і макрорівнях, що пояснюється присутністю "зв'язаної" води в складі ґрунту.

В результаті розгляду фізичних процесів, які протікають в ґрунті при прикладанні зовнішнього електричного поля та механізму взаємодії світла з його поверхнею, була запропонована і обґрунтована модель ґрунту для розв'язку задач дистанційного поляризаційного зондування у вигляді гладкого анізотропного поглинаючого кристалу з малою анізотропією і сегнетоелектричними властивостями.

Також було показано, що анізотропія властивостей ґрунту на макрорівні спричинена аномаліями власного електричного поля на поверхні Землі. Приведена гранична оцінка величини впливу анізотропії поверхні на параметри поляризації світла (зсув фаз) дала величину  $14^\circ$ , яка може бути зареєстрована з допомогою реальної апаратури дистанційної зйомки. Проведена оцінка похибки визначення зсуву фаз для реального динамічного діапазону системи реєстрації дала величину порядку  $4^\circ$ . Попередня оцінка адекватності параметрів моделі реальному фізичному механізму зондування дозволила встановити, що інформаційним параметром при спектрополяризаційному зондуванні можуть бути виділені напрямки анізотропії діелектричної

проникливості та (в меншій мірі) величина відносної анізотропії. Ефективні значення діелектричної проникливості не можуть бути об'єктивною характеристикою моделі ґрунту через значну неоднозначність їх визначення. Оцінка динамічних (часових) параметрів моделі дала наступні часові характеристики: ефективний діапазон частот поляризації лежить в межах від постійного струму до  $10^4$  Гц; час 90-процентної поляризації при прикладенні електричного поля, яке відповідає по величині практично зареєстрованим аномаліям власного поля Землі, лежить в межах від 16.7 години до 277.7 години.

Виявлено наступні умови оптимального (з точки зору використання запропонованого фізичного механізму) застосування спектрополяризаційного методу дистанційного зондування: зйомка вологого поглинаючого (темного) відкритого ґрунту із значним вмістом піску в короткохвильовому (наприклад, синьому) діапазоні. Сформовано наступні основні вимоги до реалізації процесу зйомки та апаратури зйомки: кадрова зйомочна система повинна мати обмежене поле зору до нормального; вісь кадрової системи зйомки має бути орієнтована в надир.

У третьому розділі проведено вибір та обґрунтування методики зондування, сформульовано і обґрунтовано вимоги та інформаційно-динамічні параметри апаратури зйомки.

Запропоновано спосіб спектрополяризаційного дистанційного зондування, який полягає в спектрозональній багатоканальній аерозйомці через аналізатори поляризації при максимальній поляризації розсіяного сонячного світла та обробці результатів зйомки, причому склад і взаємну орієнтацію аналізаторів поляризації підбирають таким чином, щоб визначити всі параметри вектора Стокса випромінювання, відбитого від

поверхні Землі, та фіксують точний час зйомки, географічні координати місця зйомки і взаємну орієнтацію аналізаторів поляризації відносно довільного відомого напрямку в площині одержаних аерозображень. Таким чином, в якості зонduючого випромінювання використовується лінійно поляризоване в процесі розсіювання на молекулах повітря сонячне світло. Зйомка повинна проводитися при максимально низьких висотах Сонця над горизонтом в надир з висоти, що не перевищує 1.5 км. Схема зйомки зображена на рис.1.

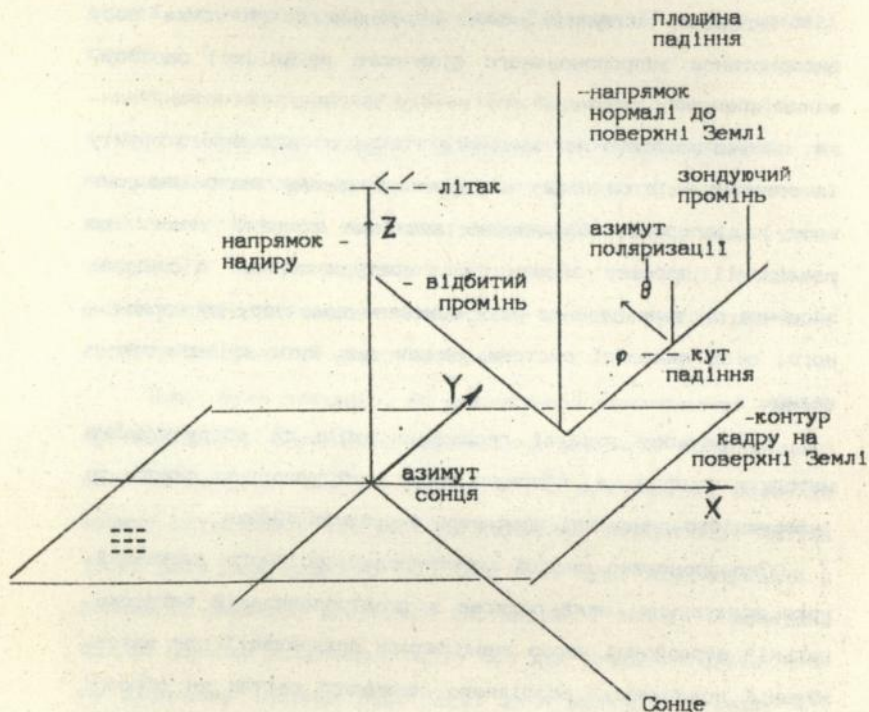


Рисунок 1. Геометрична схема поляризаційної зйомки.

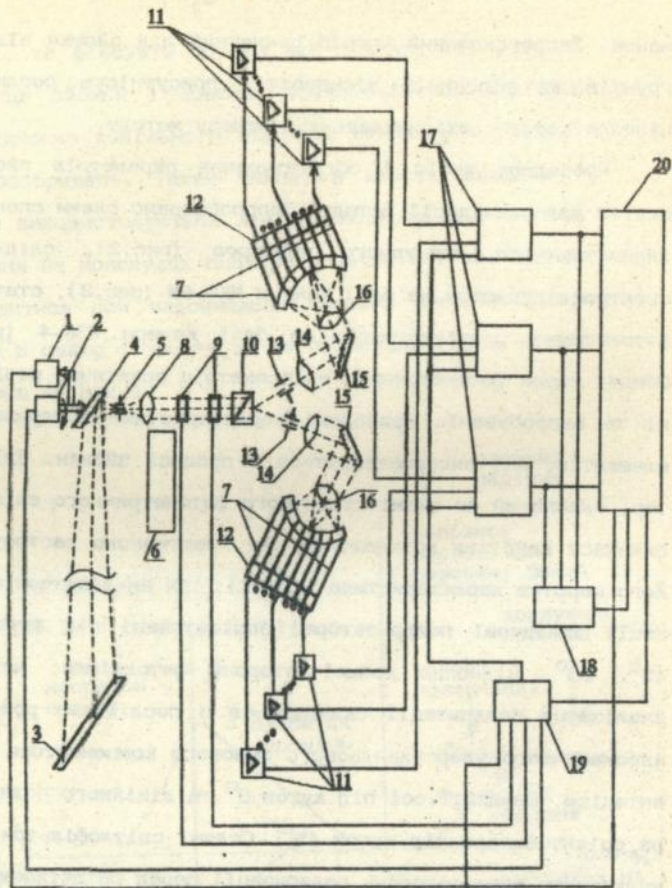
Присутність аерозолей (туману) або хмар в атмосфері під час зйомки погіршує співвідношення корисний сигнал-фон і є неба-

жаною. Запропонований спосіб придатний для зйомки відкритих ґрунтів на рівнинній місцевості; присутність рослинності нівелює ефекти, які покладені в основу методу.

Проведено вибір і обґрунтування параметрів зйомочних систем для реалізації методу. Запропоновано схеми спектрополяриметричного скануючого пристрою (рис.2), слідкуючого спектроеліпсометра на базі камери МКФ-6М (рис.3), статичного фотометричного еліпсометра на базі камери MSK-4 (рис.4). Обидві схеми фотометричних еліпсометрів практично реалізовані та випробувані. Приведені характеристики поляризаційних елементів, які використовуються в процесі зйомки. Еліпсометер, виконаний по схемі статичного фотометричного еліпсометра виявився найбільш оптимальним для практичного застосування. Його коротка характеристика (рис.4): три аналізатори поляризації (плівкові поляризатори) зорієнтовані під кутами  $0^\circ$ ,  $45^\circ$ ,  $90^\circ$ , відносно довшої сторони фотознімка; четвертий аналізатор поляризації складається з послідовно розміщених ахроматичного чвертьхвильового фазового компенсатора з орієнтацією "швидкої" осі під кутом  $0^\circ$  та лінійного поляризатора, орієнтованого під кутом  $45^\circ$ . Скляні світлофільтри розміщуються за аналізаторами поляризації перед об'єктивами камери.

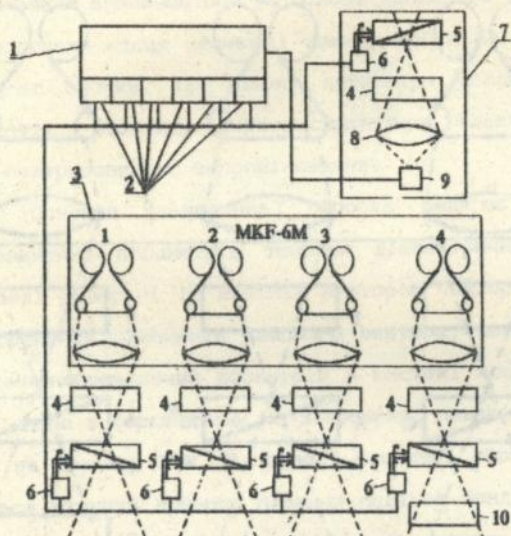
В четвертому розділі приведено практичну методику обробки спектрополяризаційних зображень. В якості основи для побудови методики використаний "метод малих кутів падіння" для визначення тензора діелектричної проникливості двоосного поглинаючого кристалу, розвинутий Ф.І.Федоровим для задач петрографії.

Обробка поляризаційних зображень розбита на два основні етапи. Попередня обробка полягас в оцифровці відповідним



1-ФОРМУВАЧ СИНХРОІМПУЛЬСІВ; 2-ДИВІГУН СКАНУЮЧОГО ДЗЕРКАЛА;  
 3-РЯДОК НА ПОВЕРХНІ ЗЕМЛІ; 4-СКАНУЮЧЕ ДЗЕРКАЛО; 5-ВХІДНА ДІАФРАГМА;  
 6-БЛОК КАЛІБРОВКИ; 7-СВТЛОВОДИ; 8-КОЛІМУЮЧИЙ ОБ'ЄКТИВ; 9-ЕЛЕКТРО-  
 ОПТИЧНІ МОДУЛЯТОРИ ПОЛЯРИЗАЦІЇ; 10-ПРИЗМА ВОЛЛАСТОНА; 11-ПІДСИЛЮ-  
 ВАЧ-ФОРМУВАЧ; 12-БЛОК ФОТОПРИЙМАЧІВ; 13-ВХІДНА ШІАЙНА ПОЛКРОМАТО-  
 РА; 14-ОБ'ЄКТИВ ПОЛКРОМАТОРА; 15-ДИФРАКЦІЙНА ГРАТКА; 16-КАМЕРНИЙ  
 ОБ'ЄКТИВ; 17-БЛОКИ ПОПЕРЕДЬОЇ ОБРОБКИ ДАНИХ; 18-ПРОЦЕСОР ОСНОВНОЇ  
 ОБРОБКИ ДАНИХ; 19-БЛОК УПРАВЛІННЯ ПРИСТРОЄМ; 20-БЛОК РЕЄСТРАЦІЇ  
 ПАРАМЕТРІВ.

Рисунок 2. Оптична схема спектрополяризаційного  
 сканувачого пристрою.



1-ЦИФРОВИЙ ПРОЦЕСОР; 2-ЦИФРОВІ СЛІДКУЮЧІ СИСТЕМИ;  
 3-КАНАЛИ КАМЕРИ МКФ-6М; 4-СВІТЛОФІЛЬТРИ; 5-ПОЛЯРИЗАТОРИ;  
 6-ЕЛЕКТРО-МЕХАНІЧНІ ПРИВОДИ ПОЛЯРИЗАТОРІВ; 7-ВУЗОЛ  
 АНАЛІЗАТОРА ПОЛЯРИЗАЦІЇ; 8-ОБ'ЄКТИВ АНАЛІЗАТОРА  
 ПОЛЯРИЗАЦІЇ; 9-ФОТОДАТЧИК; 10-АХРОМАТИЧНИЙ 1/4 ФАЗОВИЙ  
 КОМПЕНСАТОР

Рисунок 3. Оптична схема сліdkуючого спектроеліпсометра  
 на базі камери МКФ-6М.

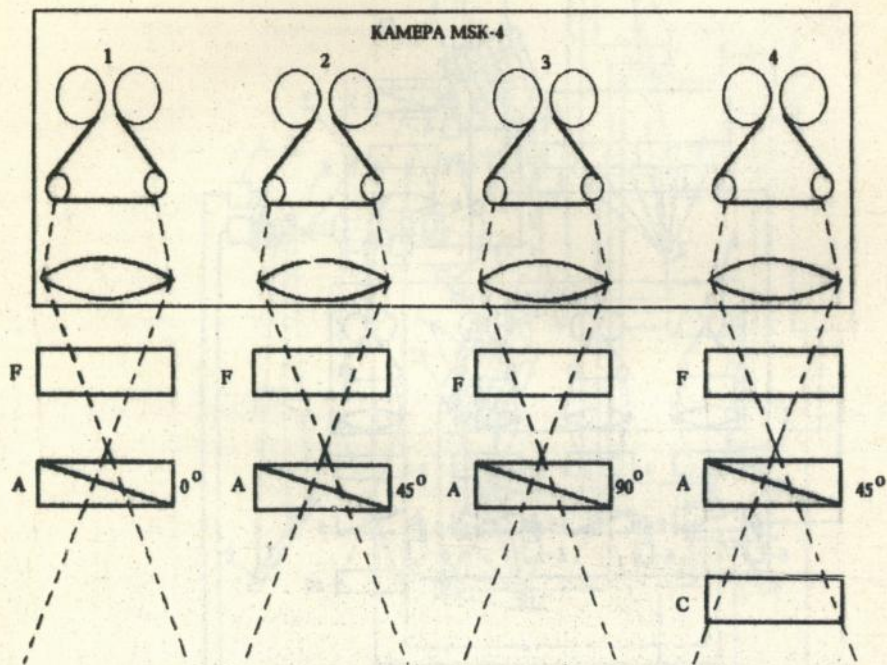


Рисунок 4. Оптична схема статичного фотометричного еліпсометра на базі камери MSK-4.

чином суміщених і зорієнтованих фотонегативів, покращенню їх якості за рахунок переходу від оптичної густини до нормованої експозиції (на основі даних калібровочного клину камери MSK-4) та розрахунку параметрів поляризації зонduючого та відбитого потоку світла. Стан поляризації зонduючого випромінювання визначається на основі даних про час зйомки, точні координати місця зйомки і азимут Сонця на фотозображенні в момент зйомки. При цьому параметри яскравості (альbedo) усунуті з розгляду і використовуються тільки кутові параметри поляризованого випромінювання.

Основна (тематична) обробка полягає в послідовному визначенні параметрів тензора діелектричної проникливості моделі поверхні та власних векторів тензора в кожній точці зображення. Елементи власного вектора, нормовані для одержання направляючих косинусів в системі координат  $XOYZ$ , яка зв'язана з координатами на зображенні подаються інтерпретатору на монітор ЕОМ. В процесі основної обробки використовується штучний поворот площини падіння зонduючого випромінювання, який дозволяє привести дані дистанційних зображень з центрально-симетричної проекції до геометрії зондування в трьох різних площинах падіння, що полідовно повернуті одна від носно одної на кут  $45^\circ$ . Суть методу полягає в розрахунку таких параметрів зонduючого пучка світла (кута падіння та азимуту поляризації), які відповідають зареєстрованим параметрам поляризації, параметрам досліджуваної поверхні в даній точці і необхідній геометрії зондування.

Практично обернена задача вирішується на основі даних дев'яти сусідніх точок ("вікна" розміром  $3 \times 3$ ), вибраних із вхідних зображень, як показано на рис.1 і рис.5.

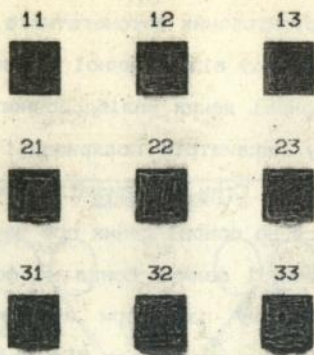


Рисунок 5. Вікно, в межах якого вирішується обернена задача.

Поляриметричні дані трьох точок (тангенс азимута поляризації зондувального світла  $\text{tg}\zeta$  і еліпсометричне відношення відбитого світла  $\text{tg}\xi$ ), належним чином відкоректовані та приведені до необхідної геометрії спостереження, використовуються для розв'язку системи лінійних рівнянь (2), як цього вимагає методика Федорова.

$$\begin{cases} M \cdot \text{tg}\zeta_1 + 2Q \cdot \text{tg}\zeta_1 \cdot \text{tg}\xi_1 - N \cdot \text{tg}\xi_1 + 2P = 0 \\ M \cdot \text{tg}\zeta_2 + 2Q \cdot \text{tg}\zeta_2 \cdot \text{tg}\xi_2 - N \cdot \text{tg}\xi_2 + 2P = 0 \\ M \cdot \text{tg}\zeta_3 + 2Q \cdot \text{tg}\zeta_3 \cdot \text{tg}\xi_3 - N \cdot \text{tg}\xi_3 + 2P = 0 \end{cases} \quad (2)$$

Для розв'язку задачі використані наступні "вектори", які містять дані в трьох точках (рис.5): (11,12,13), (21,22,23), (31,32,33); (11,21,31), (13,23,33); (11,22,33), (13,22,31).

В п'ятому розділі наведені результати експериментальної апробації спектрополяризаційного методу дистанційного зондування на природних об'єктах. Експериментальна зйомка була проведена в районі Новояворівськ-Шкля Яворівського району Львівської області. В результаті обробки спектрополяризацій-

них зображень показано принципову можливість картування підповерхневих структур (розломів) неглибокого залягання, перекритих осадковими відкладами і ґрунтом. Виділені напрямки анізотропії співпадають з напрямками, отриманими за даними наземної контактної електророзвідки (КВЕЗ), що є суттєвим для підтвердження коректності вибраних моделі поверхні Землі та опису фізичного механізму процесу зондування.

Проведене дослідження точності на основі реальних даних методами машинного моделювання відхилень вхідних параметрів (на базі методики МИ 222-80) дозволило встановити основне джерело похибок для використаних устаткування та методики обробки – це похибки визначення яскравості в процесі зйомки та обробки даних. Одержано наступне рівняння регресії:

$$y = 0.7477 * x + 0.1288 * I(0) - 0.1181 * I(45) - 0.1058 * I(90) + 0.098 * I(\lambda/4) + 0.0497 * a + 0.0084 * h + 0.0044 * p, \quad (3)$$

де  $Y$  – косинус кута між довшою стороною знімка і власним вектором тензора діелектричної проникливості моделі поверхні, який відповідає максимальному власному значенню;  $x$  – штучний вхідний параметр, рівний  $+1$ ;  $a$  – похибка визначення азимута Сонця в момент зйомки,  $h$  – похибка визначення висоти Сонця в момент зйомки;  $p$  – кут відхилення осі системи зйомки від нормалі; всі вхідні параметри можуть приймати значення  $+1$  або  $-1$ .

Проведений розгляд тематичної інформативності спектрополяризаційного методу показав, що основна направленість такої технології полягає у виявленні неоднорідностей будови глибинних горизонтів Землі неглибокого залягання, які супроводжуються значними ( $\sim 1 \text{ мВ/м}$ ) аномаліями власного постійного електричного поля Землі. Такі поля є наслідком дії природних гальванічних елементів, що виникають на границях між різними

породами. Сюди відносяться поля, які виникають над рудними жилами (родовищами) металів (в тому числі сульфідами) над графітістими, вуглистими, шунгітоносними породами, піритистими і пірротинистими породами, магнетитовмісними породами. Інший можливий механізм виникнення аномалій власного електричного поля Землі - електрокінетичні явища в породах, відомі як "потенціали протікання". На основі цього механізму можливе виявлення зон інтенсивної фільтрації підземних вод та активних карстових процесів.

Запропоновано спосіб дистанційного виявлення геодинамічного переміщення та структури глибинних горизонтів, що склалася внаслідок попередніх переміщень, який ґрунтується на обробці радарних поляризаційних зображень.

#### Основні висновки і результати

1. Обґрунтована модель реального ґрунту у вигляді гладкого анізотропного (двоосного) поглинаючого кристалу з наведеною малою анізотропією діелектричної проникливості і представлені основні параметри цієї моделі. Показано, що на основі обґрунтованих моделі поверхні ґрунту і механізму взаємодії поляризованого світла з ґрунтом можлива реалізація технології картування областей з аномальними значеннями анізотропії показника заломлення.

2. Розроблено і виготовлено зйомочні системи (спектроеліпсометри) для реалізації технологій спектрополяризаційного дистанційного зондування.

3. Запропоновано методику спектрополяризаційного дистанційного зондування - спосіб визначення геологічних характеристик кори Землі. На основі способу дистанційного зондування, основних параметрів моделі поверхні та зйомочної системи розроблена тематично-орієнтована методика обробки дистанцій-

них поляризаційних зображень оптичного діапазону, яка реалізована у вигляді пакету прикладних програм.

4. Проведені натурні випробування програмно-апаратно-методичного комплексу засвідчили принципову можливість картування областей з анізотропними електрофізичними параметрами на поверхні ґрунту, зокрема показали можливість співставлення на рівні параметрів ґрунту (виявлених напрямків анізотропії) даних наземної контактної електророзвідки (КВЕЗ) та оптичного дистанційного зондування.

5. Проведена оцінка точності використаного комплексу, яка показала принципову можливість достовірного виявлення корисного сигналу і виявила основні джерела похибок.

6. Розглянуто тематичну інформативність спектрополяризаційного методу дистанційного зондування. Показано, що даний метод дозволяє виявляти області аномальних значень анізотропії діелектричної проникливості поверхні ґрунту, які можуть бути викликані електрохімічними процесами на границі розподілу різних середовищ в глибинних горизонтах земної кори, процесів фільтрації вод, дифузійно-обмінних процесів.

7. Запропоновано спосіб дистанційного виявлення динаміки переміщення глибинних горизонтів кори Землі та структури, що склалася внаслідок попередніх переміщень, який передбачає використання поляризаційних зображень земної поверхні радіолокаційного (метрового) діапазону.

Основні результати роботи викладені в наступних публікаціях:

1. O.Lychak "Earth surface anisotropy: studying with photopolarimetry" Proceedings of SPIE, v.2028, p.480-490, 1993.
2. O.Lychak "One method for polarized images treaty" Proceedings of SPIE, v.2298, p.830-840, 1994.
3. O.Lychak "One method of imaging polarimetry for remote sensing purposes: the technique accuracy investigation" Proceedings of SPIE, v.2265, p.480-490, 1994.
4. А.А.Чигирев, Э.А.Глиндзич, Р.С.Бачевский, О.В.Лычак "Спектрополяриметрическое сканирующее устройство" SU 1605713A1
5. Бачевський Р.С., Личак О.В. "Огляд технологій оптичного дистанційного зондування" Деп. в ДНТБ України, 25.01.95, №163-Ук95.
6. Бачевський Р.С., Личак О.В. "Огляд методів дистанційного зондування Землі які використовують параметри поляризації світла" Деп. в ДНТБ України, 25.01.95, №162-Ук95.
7. Бачевський Р.С., Личак О.В. "Исследование анизотропии поверхности Земли методами фотополяриметрии" Деп. в ДНТБ України, 25.01.95, №161-Ук95.

Oleg Lychak Development of systems and technologies for spectral and polarization remote sensing. Thesis for obtaining of Ph.d. degree on Ingeneering Sciences on speciality 05.11.16 - Information and Measuring Systems, Physico-mechanical Institute National Academy of Sciences of Ukraine L'viv, 1995. The theoretical and experimental investigation of thematic dataset of remote sensing technique which used spectral and polarization light parameters is presented. An physical model of bare soil for remote sensing purposes was developed. Special methods for remote sensing and multipolarization images treaty for real Earth surface anisotropy areas detection is presented. It is showed an opportunities for underground structures mapping in principle.

Олег Лычак Разработка методов и систем спектрополяризационного дистанционного зондирования. Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.11.16 - информационно-измерительные системы, Физико-механический институт Национальной Академии Наук Украины, Львов, 1995. Представлено теоретическое и экспериментальное исследование тематической информативности спектрополяризационного метода дистанционного зондирования земной поверхности. Разработана физическая модель открытого грунта для задач поляризационного дистанционного зондирования. Разработаны методика зондирования и обработки многополяризационных изображений, направленная на выделение областей анизотропии поверхности Земли и системы для ее реализации. Показана принципиальная возможность картирования подповерхностных структур неглубокого залегания.

Ключові слова: дистанційне зондування, поляризація, анізотропія спектрополяриметрична зйомочна система.

АВ 32.046

**АВ 32.046**

Підписано до друку 22.02.95. Формат 60×84/16. Папір друк. №1.  
Друк офсет. Умовн. друк. арк. 1,5.. Умовн.-фарб. відб. 1,5.  
Обл.-вид. арк. 1,5.. Тираж 100. Зам. 32. .

Машинно-офсетна лабораторія Львівського державного  
університету ім.І.Франка. 290602 Львів, вул. Університетська, 1.