

инж. Деница Стефанова Борисова

ИЗСЛЕДВАНЕ НА СПЕКТРАЛНИТЕ ОТРАЖАТЕЛНИ ХАРАКТЕРИСТИКИ НА СКАЛИ

АВТОРЕФЕРАТ

на дисертационен труд за присъждане на
образователна и научна степен „доктор”



ИКИТ

Област на висшето образование:

4. Природни науки, математика и информатика

Професионално направление: 4.4. Науки за Земята

Научна специалност:

Дистанционни изследвания на Земята и планетите

Научен ръководител: Акад. Димитър Мишев

София
2015

Настоящото изследване е извършено в рамките на редовна докторантура по научна специалност „Дистанционни изследвания на Земята и планетите” в секция „Системи за дистанционни изследвания” към Институт за космически изследвания и технологии при Българска академия на науките /ИКИТ-БАН/.

Дисертационният труд е обсъден на заседание на еднократно разширен научен семинар на секция „Системи за дистанционни изследвания” при ИКИТ-БАН и е предложен за разглеждане от специализирано жури.

Публичната защита на дисертационния труд ще се състои на открито заседание пред научно жури, утвърдено от Научния съвет и назначено от Директора на ИКИТ-БАН на г. от часа в зала на бл. 1, ет. 3 в Научния комплекс на БАН – ул. „Шипченски проход“, гр. София на заседание на научното жури в състав:

Външни членове:

1. проф. д-сн Никола Вичев Колев, ИПАЗР “Пушкаров”
2. проф. д-р Бойко Кирилов Рангелов, МГУ “Св. Иван Рилски”
3. доц. д-р Любен Тихомиров Гугов, МГУ “Св. Иван Рилски”

Резервен член:

проф. д-р Ради Георгиев Радичев, МГУ “Св. Иван Рилски”

Вътрешни членове:

1. проф. д-р Румен Дончев Недков – ИКИТ-БАН
2. доц. д-р Дойно Иванов Петков – ИКИТ-БАН

Резервен член:

доц. д-р Валентин Йонов Атанасов – ИКИТ-БАН

автор: **инж. Деница Стефанова Борисова**

Тема на дисертационен труд за присъждане на ОНС „доктор“:

Изследване на спектралните отражателни характеристики на скали

научен ръководител: **Акад. Димитър Мишев**

Забележка: Номерата на разделите, формулите, таблиците, фигурите и литературата в автореферата съответстват на тези в дисертационния труд.

Благодарности

Бих искала да изразя дълбока и най-искрена благодарност на доц. д-р Румяна Кънчева, доц. д-р Дойно Петков и проф. д-р Румен Недков от ИКИТ-БАН и на доц. д-р Любен Гугов от катедра Приложна геофизика към МГУ "Св. Ив. Рилски" за отделеното време и внимание, ценните забележки и конструктивните дискусии свързани с въпроси, засягащи настоящия дисертационен труд. Благодарна съм и за оказваното съдействие по най-разнообразни тематики от научно и практическо естество от областта на дистанционните изследвания.

Изказвам специални благодарности за професионалната подкрепа на всички колеги от секция Системи за дистанционни изследвания към ИКИТ-БАН, София, които по един или друг начин съдействаха за реализацията на настоящата работа.

За съжаление не мога да изкажа своите лични благодарности към покойния вече акад. Димитър Мишев, който през различни етапи от моето обучение и работа оказва ползотворно влияние върху професионалното ми израстване в областта на науката.

Бих желала да благодаря специално на доц. д-р Бануш Банушев от катедра Минералогия и петрография към МГУ "Св. Ив. Рилски" за съдействието при подбора на скалните образци, минералите и особено при организирането и провеждането на теренните спектрометрични измервания.

От автора

Съдържание

Благодарности.....	2
Съдържание.....	3
Списък на съкращенията.....	4
Въведение.....	5
1. Актуалност на темата.....	6
2. Цел и задачи на изследването.....	6
Глава 1. Състояние на проблема за определяне на спектралните отражателни характеристики на скали.....	7
1.1. Многоканални дистанционни изследвания на обекти от земната повърхност.....	8
1.2. Характеристики на спектрометричните, използвани за дистанционни изследвания на обекти от земната повърхност.....	8
1.2.1. Спектрални прибори за аерокосмически дистанционни изследвания.....	9
1.2.2. Спектрални прибори за наземни дистанционни изследвания.....	9
1.3. Предварителна обработка на спектралните данни от спектрометричните измервания.....	9
1.4. Информационно съдържание на спектралните данни от спектрометричните измервания. Спектрални смеси.....	10
1.5. Изводи към Глава 1.....	11
Глава 2. Методи за обработка, анализ и интерпретация на спектрални данни от спектрометрични измервания на скали.....	11
2.1. Спектрален коефициент на отражение.....	11
2.1.1. Изследвани повърхности на скалите.....	13
2.1.2. Химичен състав на минералите. Минерален състав на скалите.....	13
2.1.3. Симулационно моделиране на спектралните смеси.....	14
2.2. Спектрални преобразувания.....	14
2.2.1. Контрастни коефициенти.....	15
2.2.2. Цветови характеристики.....	15
2.3. Количествен подход при анализа на спектралните данни от спектрометричните измервания на скали.....	17
2.3.1. Линеен разделяне на спектрални смеси.....	17
2.3.2. Сравнителна интерпретация на спектралните данни.....	18
2.4. Изводи към Глава 2.....	19
Глава 3. Прилагане на методите за изследване на спектралните отражателни характеристики на скали.....	20
3.1. Планиране и провеждане на спектрометричните измервания.....	20
3.1.1. Обекти на изследването.....	20
3.1.2. Състав на измерванията.....	22
3.1.3. Апаратурен комплекс.....	23
3.2. Анализ на резултати, получени при спектрометричните измервания на скали, за изследване на спектралните им отражателни характеристики.....	24
3.3. Изводи към Глава 3.....	45
Приноси.....	46
Списък на публикациите по дисертацията.....	47
Списък на използваната литература в автореферата.....	48

Списък на съкращенията

на български

АЦП – аналогово-цифров преобразувател
ДИ – дистанционни изследвания
ЕМС – електромагнитен спектър
МГУ – Минно-геоложки университет
ООН – Организация на обединените нации
СОХ – спектрални отражателни характеристики
СКО – спектрален коефициент на отражение

на английски

ANVIR – Advanced Visible and Near Infrared Radiometer
ASTER – Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer
CCD – Charge-Coupled Device
CIE 1964 – Commission Internationale de l'Eclairage
GER – Geophysical & Environmental Research
ETM+ – Enhanced Thematic Mapper +
DN – Digital Numbers
EARSeL – European Association of Remote Sensing Laboratories
EOS – Earth Observing System
ERTS-1 – Earth Resource Thematic Satellite
FOV – Field Of View (поле на зрение на входната оптика)
GPS – Global Position System
GSD – Ground Sample Distance
IFOV – Instantaneous Field Of View
MOMS – Modular Optoelectronic Multispectral Scanner
MSS – Multispectral Scanner System
NASA – National Aeronautics and Space Administration
NASDA – National Space Development Agency of Japan
NDVI – Normalized Difference Vegetation Index
NIR – Near Infrared
OLI – Operational Land Imager
SAVI – Soil Adjusted Vegetation Index
SIRIS – Single beam visible/Infra-Red Intelligent Spectroradiometer
SWIR – Shortwave Infrared
TIR – Thermal Infrared
TM – Thematic mapper
TOMS – Thematically Oriented Multichannel Spectrometer
TVI – Transformed Vegetation Index
USGS – U. S. Geological Survey
UV – UltraViolet
VI – Vegetation Index (Вегетационен Индекс)
VIS – Visible
VNIR – Visible and Near Infrared

Въведение

Дистанционните изследвания се използват широко в различни области на човешката дейност, затова се налага да бъдат разработени различни методи за тяхното провеждане. Спектрометричните методи са свързани със спектралните характеристики на наблюдаваните обекти. Разликите в регистрираните от сензора стойности на измерваната лъчиста енергия се използват за изучаване на свойствата на наблюдавания обект, без контакт с него и без да се нарушава неговата цялост. Към настоящия момент съществуват множество методи за получаване на данни от дистанционни изследвания, които са реализирани в различни диапазони от електромагнитния спектър с различна спектрална, пространствена и радиометрична разделителна способност.

За по-задълбочено решаване на поставените задачи изследванията в дисертацията са ограничени в областта на петрографията. Петрографията е специален дял от геологията, който изучава състава, строежа, произхода, разпространението и формата на скалите. В настоящата работа на базата на сравнителен анализ са изследвани спектралните отражателни характеристики на скалите чрез спектрометрични измервания на тяхната отражателна способност. Всеки тип скала има различна отражателна способност, което води до различни стойности на спектралната яркост. При известни стойностит на спектралната яркост на скалите се повишава достоверността при разпознаване на геоложки обекти.

Данните, получени при дистанционните изследвания, съдържат информация за геоложките обекти, която пряко е свързана с техните спектрални отражателни характеристики. Генерирането и разширяването на база данни за спектралните отражателни характеристики на скалите е свързано с извличане на информация от аерокосмически данни и от наземни спектрометрични измервания. В този случай е необходимо да се проведат спектрометрични измервания на различни типове скали, заедно със съпътстващите ги ландшафтни обекти от различна височина през различни сезони, при което има различна степен на разкритие на скалите. Така генерираните бази данни (библиотеки от спектрални отражателни характеристики) намират широко приложение в системите за разпознаване на образите на геоложките обекти. Тематичният анализ на данните от спектрометричните измервания се състои в прилагането на следния алгоритъм:

- определяне на спектралните диапазони, в които се наблюдават изменения на спектралните свойства на наблюдаваните геоложки обекти;
- изследване на взаимовръзки между дистанционно измерените спектрални яркости с параметрите на изследваните геоложки обекти.

Верификацията на получените количествени резултати от проведения анализ се определя чрез провеждане едновременно на аерокосмически

наблюдения на изследваните обекти и наземни измервания на предварително избрани тестови полигони.

1. Актуалност на темата

Актуалността на разработваната тема произтича от основната цел на всяко дистанционно изследване в научната област “Дистанционни изследвания на Земята и планетите”, проведено в лаборатория, in-situ или от и в космоса – да се определи вида на обекта на изследване и неговите параметри.

В областта на геологията интерес представляват отличителните характеристики на обекта на изследване, като структура и грапавост на наблюдаваната повърхност, минерален и химичен състав. Кой диапазон от електромагнитния спектър /ЕМС/ да се използва и кои дължини на вълната да се изберат зависи от изследваните параметри на геоложките обекти и от наличието на подходи, методи и средства за получаване на данни в съответния спектрален диапазон. Съществуващите теоретични модели на взаимодействието между падащата лъчиста енергия върху изследвания геоложки обект за всяка област от ЕМС позволяват да се определят параметрите на обекта на базата на спектралните отражателни характеристики.

Актуалността на дисертацията е свързана с необходимостта от създаването на база данни /спектрални библиотеки/ за вида скали от територията на България.

2. Цел и задачи на изследването

Целта на дисертацията е да се предложи методика за спектрометрични измервания, чрез която да се създаде база данни от спектрални отражателни характеристики /спектрална библиотека/ за вида скали от територията на България и техния минерален състав, което е от значение за калибриране на спътникови сензори за дистанционни изследвания на природните ресурси, опазването на околната среда, геофизиката, геологията, петрографията, минералогията и не на последно място сравнителната планетология.

За постигане на целта са поставени следните **задачи**:

1. Да се планира провеждането на спектрометрични експериментите, което включва постановка на експериментите, избор на подходящи спектрометрични системи за ефективно събиране на данни и избор на скали за изследване.

2. Да се проведат планираните експерименти в два варианта:

а) лабораторни спектрометрични измервания на спектралните отражателни характеристики на петрографски образци от избрани скали (в нашия случай ще се ограничим до гранити) и скалообразуващите ги минерали в контролирани условия;

б) in-situ /теренни/ спектрометрични измервания на спектралните отражателни характеристики на избраните скали в естествени условия.

3. Да се изберат методи и да се синтезират алгоритми за интерпретация на измерените спектрални данни за разпознаване на вида на изследваните скали и за определяне на техния минералния състав.

4. Да се извърши сравнителен анализ на получената библиотека от спектрални отразителни характеристики с еталонни спектрални библиотеки за изследваните скали.

Глава 1.

Състояние на проблема за определяне на спектралните отразителни характеристики на скали

Представеният обзор по темата на дисертацията показва, че количественият подход при получаването, обработката и анализа на спектралните данни се е наложил в дистанционните изследвания /ДИ/ [3,4,5,122,139]. В дисертацията при линейното разделяне на спектралните смеси и сравнителната интерпретация на спектралните данни се използва количествен подход. Предпоставка за утвърждаването на този подход са многоканалните измервателни системи, при които получаваните данни са количествени в по-широки динамични и спектрални диапазони. Използването на количествения подход изисква добро познаване на същността на физиката на явлениято отражение, което е основно при провежданите измервания. Важно е да се определят изискванията към използваната апаратура и да се подберат специфични методи за обработка и анализ на данните.

В развитието на технологията за ДИ съществен етап е разработването на многоканални спектрометрични системи. Те осигуряват възможност да се получи по-точна и по-пълна количествена характеристика за действителната отразителна способност на геоложките обекти. Чрез многоканалните спектрометрични измервания се получават спектрални данни с високо информационно съдържание, които се използват като признак за разпознаване и в създаването на спектрални библиотеки [16,18,52,123]. Това позволява видова класификация на изследваните обекти и определяне на техни свойства или параметри. В голяма степен това важи за смесените класове скала-почва-растителност, чиито отразителни свойства са функция на редица геофизични, химични и структурни характеристики. Многоканалните спектрометри във видимия и близкия инфрачервен диапазон са придобили най-широко приложение и с тяхна помощ са получени засега най-съществените достижения при изследване на минерали [16-19], скали [16,17,20-22,120], почви [20,23-27,90] и растителност [20,28-31,90].

За целите на анализа, разпознаването и интерпретацията на спектралните образи, съдържащи се в спектралните данни, един от подходите е създаване на модели на взаимодействието на слънчевото излъчване с различните природни обекти [32-34].

При ДИ е важно да се провеждат експериментални изследвания, за да се допълнят и усъвършенстват моделите. Експерименталните изследвания могат да бъдат обединени в следните групи:

Изследвания, свързани с избора на брой, ширина и положение на спектралните интервали на спектрометричната апаратура, изисквания към чувствителността, точността, отношението сигнал/шум [12,13,35-39].

Провеждане на лабораторни, in-situ /теренни/ и аерокосмически експерименти за верификацията на методиката на изследванията и изучаване на отразителната способност на природни обекти и по-конкретно на минерали и скали, разглеждани като отделни обекти и като смеси от тях [17,40,90].

Изследване на различни фактори, които влияят върху спектралните отразителни характеристики на природни обекти, включително минерали и скали [5,13,46-48,90].

Анализ на съдържанието на данните от спектрометричните измервания за разпознаване и класификация на минерали и скали [51-58].

Разработка на алгоритми за линейно разделяне на спектралните смеси и за количествен анализ на данните [3,59-66,99,122,139].

Направеният обзор по темата на дисертацията показва, че при предишните изследвания вниманието е насочено към спектрометрични измервания на образци от минерали [5,16-19,52,53,55,56] и в [21,22,120] са изследвани скални образци.

1.1. Многоканални дистанционни изследвания на обекти от земната повърхност

Във връзка с планирането и провеждането на спектрометрични измервания на скали в този раздел накратко са изложени технологичните характеристики на спектрално-радиометричните сензори, използвани за ДИ на обекти (включително минерали и скали) от земната повърхност [9,12-13,67-69,71-74,77-94].

Системите за ДИ представляват многоканални спектрометрични сензори или са системи, формиращи изображение в различни спектрални канали на спектралния диапазон на измерване. Изискванията към спектрометричните системи за ДИ се изразяват в следното [3,10,70-73]:

- разширяване на динамичния диапазон на измерваната лъчиста енергия;
- повишаване на отношението сигнал/шум;
- повишаване на пространствената разделителна способност;
- увеличаване на броя на спектралните канали и намаляване на ширината им.

1.2. Характеристики на спекторрадиометрите, използвани за дистанционни изследвания на обекти от земната повърхност

Във връзка със създаването на спектрална библиотека за скали от територията на България в този раздел са представени спекторрадиометри,

които са използвани за измерване на спектрални отражателни характеристики на скали и минерали в еталонни спектрални библиотеки.

Първият специализиран носител за апаратура за ДИ е известен като ERTS-1 (Спътник за изследване на земните ресурси), впоследствие преименуван на Landsat

1.2.1. Спектрални прибори за аерокосмически дистанционни изследвания

Разработените и конструирани от български учени многоканални спектрометри Спектър-15, Спектър-15М и Спектър-256 [69,70,83] дълго време са използвани за космически и наземни дистанционни измервания.

1.2.2. Спектрални прибори за наземни дистанционни изследвания

Следните спектрорадиометри са използвани за измерване на спектрални отражателни характеристики на скали и минерали в еталонни спектрални библиотеки: SIRIS (Single beam visible/Infra-Red Intelligent Spectroradiometer) [84] и GER (Geophysical & Environmental Research) [85]. За валидация на измерванията със системата ASTER са проведени наземни измервания с три спектрални прибора, работещи в съответните диапазони от EMC за трите сензора на ASTER. Това са съответно спектрометър Beckman UV5240, спектрометър Perkin-Elmer Lambda 900 UV/VIS/NIR и спектрометър Nicolet 520FT-IR [88].

В последните години са създадени спектрометрични системи за получаване на високоинформативни спектрални данни. Най-съвременните спектрометри се отличават с голям брой канали и висока спектрална разделителна способност [87-89]. Лабораторните спектрометрични измервания, чиито резултати са представени в дисертацията, са проведени със спектрометрите ИСОХ-020 и SRM [69,90,144] и SPS-1 [91,92]. Теренните експерименти са проведени със спектрометър TOMS [93,94].

1.3. Предварителна обработка на спектралните данни от спектрометричните измервания

Предварителната обработка на спектралните данни от спектрометричните измервания включва най-общо следните операции:

- радиометрична корекция;
- координатна привръзка;
- корекция на апаратурните шумове;
- радиометрична калибровка спрямо еталонен обект (валидация);
- преобразуване на данните в подходящ за използване вид;
- въвеждане на допълнителни данни от наземни лабораторни и теренни измервания.

При извършените в дисертацията лабораторни и теренни спектрометрични измервания не се налага радиометрична корекция, а само координатна привръзка на данните от теренните измервания.

Корекцията на апаратурните шумове и радиометричната калибровка спрямо еталонния екран се извършват по време на провежданите експериментални измервания.

Получените масиви от данни се преобразуват до стойност на спектралния коефициент на отражение в проценти или като част от единицата като за целта се прилага необходимата нормировка (1.2a).

В дисертацията допълнителната информация за лабораторните измервания представлява:

- визуално описание на мономинералите и гранитите;
- процентно съдържание на скалообразуващите минерали в гранитите;
- процентно съдържание на химичните елементи и съединения (по литературни данни).

За теренните измервания са посочени районите на провеждане на измерванията с техните GPS координати.

1.4. Информационно съдържание на спектралните данни от спектрометричните измервания. Спектрални смеси

Спектрометричните измервания на земната повърхност са част от ДИ като в дисертацията ще се ограничим върху измервания на отразената лъчиста енергия от изследваните обекти.

Една от най-използваните количествени характеристики на отражателните свойства на обектите на изследване е спектралният коефициент на отражение r [9,12,47,69,90].

Спектралният коефициент на отражение /СКО/

$$(1.2a.) \quad r_{\lambda} = \frac{L_{\lambda}}{L_{calib}}$$

представлява количествен критерий за оценка на способността на определена повърхност да отразява лъчистата енергия. Този критерий изразява отношението на отразената лъчиста енергия от изследвания обект за всяка

дължина на вълната L_{λ} , [$W/(m^2 \cdot sr)$] към отразената лъчиста енергия от калибрирана еталонна повърхност за същата дължина на вълната L_{calib} , [$W/(m^2 \cdot sr)$] в еднакви условия на провеждане на измерванията. Изчертана

като зависимост на r_{λ} от λ получената графика се нарича спектрална отражателна характеристика или спектър на отражение.

Информацията, която трябва да бъде получена, обикновено се отнася до определяне на вида на изследваните обекти, техни свойства и параметри, изменение на състоянието им във времето и пространството.

В ДИ смесен клас обекти се нарича елементът /pixel=пиксел/, в който има повече от едни клас обекти, като всеки от тях се характеризира със своите спектрални признаци. Дали в един пиксел попадат повече от един клас

обекти зависи от входната оптика и разстоянието до изследвания обект, което се определя от моментното зрително поле /Instantaneous Field Of View (IFOV)/ на оптичната система.

Получените данни за спектралното отражение на смесения клас се определят от отражателните свойства на всеки от компонентите в смесения клас и от процентното (дяловото) му участие (заеманата относителна площ спрямо цялата изследвана). Получените спектрални данни се наричат спектрални смеси [34,60,95].

Във връзка с целта на дисертацията изследваните граници се разглеждат като смес от скалообразуващите ги минерали, моделирана с линейна функция, и накратко се използва понятието линейна смес.

1.5. Изводи към Глава 1

На базата на направения анализ на проблема, свързан с измерване на спектрални отражателни характеристики на скали, могат да се направят следните изводи:

1. Съществуват малък брой изследвания на спектралните отражателни характеристики на скали от територията на България. Техният брой е недостатъчен за създаване на база данни от спектрални отражателни характеристики /спектрална библиотека/ за вида скали от територията на България и техния минерален състав. Това налага извършването на такъв вид изследвания, които са предмет на дисертацията.

2. Анализирани са подходи, методи и средства за изследване на спектрални отражателни характеристики на скали. На базата на анализа може да се направи извода, че спектрометричните измервания на скали в лабораторни и естествени условия са подходящи за определяне на спектралните отражателни характеристики на скали.

3. Разгледани са различни приложения на спектралните отражателни характеристики за верифициране на различни видове сензори за дистанционни изследвания. В този случай може да се направи извода, че създаването на база данни от спектрални отражателни характеристики /спектрална библиотека/ за вида скали от територията на България и техния минерален състав има широко практическо приложение.

Глава 2.

Методи за обработка, анализ и интерпретация на спектрални данни от спектрометрични измервания на скали

Представеното в тази глава изложение е свързано с постигане с целта на дисертацията и решаване на поставените в нея задачи. За целта са избрани съответните методи за обработка, анализ и интерпретация на спектрални данни от спектрометрични измервания на скали.

2.1. Спектрален коефициент на отражение

Като резултат от обработката на първичните спектрални данни, измерени с помощта на спектрометри, са получени спектралният коефициент на отражение и спектралните отражателни характеристики на петрографски

образци гранити. Извършено е изследване на получените спектралните отражателни характеристики на гранитите с цел създаването на база данни от спектрални отражателни характеристики /спектрална библиотека/. Генерираната база данни съдържа информация за вида на изследваната скала, нейната структура и минерален състав, района на вземане на петрографския образец и на проведените теренни спектрометрични измервания.

Спектралният коефициент на отражение като количествен критерий за оценка на отражателните свойства на обекта на изследване, в този случай петрографски образци от гранити, се използва за разпознаване на вида на обекта и при линейното разделяне на спектралните смеси.

Резултантният спектрален коефициент на отражение за смесен клас се получава от следния израз:

$$(2.2) \quad r_{\Sigma}(\lambda_i) = p_1 r_1(\lambda_i) + p_2 r_2(\lambda_i) + \dots + p_m r_m(\lambda_i) = \sum_{j=1}^m p_j r_j(\lambda_i)$$

където $r_{\Sigma}(\lambda)$ са резултантните спектрални коефициенти на отражение на смесения клас, $r_i(\lambda)$ – спектралният коефициент на отражение от всеки компонент (чисти клас) в спектралната смес, P_i – относителното дялово участие (процентно съдържание) на всеки компонент.

Когато в изследваната смес попадат три природни обекта може да се запише следното, аналогично на (2.2):

$$(2.6) \quad r_{rsv}(\lambda) = p_r r_r(\lambda) + p_s r_s(\lambda) + p_v r_v(\lambda)$$

където индексите за скала, почва и растителност са съответно r (*rock*), s (*soil*) и v (*vegetation*).

За определяне на съотношението на попадащите в спектрометрираната площ класове се използва дяловото участие P за съответните основни скалообразуващи минерали. Съгласно принципа на адитивност на отразената лъчиста енергия [9,97], спектралният коефициент на отражение на смесения

клас от минерали, изграждащи гранитите, $r_{\Sigma}(\lambda)$ за дадена дължина на вълната λ , авторът на дисертацията определя от следния израз:

$$(2.7) \quad r_{\Sigma}(\lambda) = p_{Fsp} r_{Fsp}(\lambda) + p_Q r_Q(\lambda) + p_{Bio} r_{Bio}(\lambda) + p_{Mu} r_{Mu}(\lambda) + p_{Amf} r_{Amf}(\lambda)$$

като

$$(2.8) \quad p_{Fsp} + p_Q + p_{Bio} + p_{Mu} + p_{Amf} = 1$$

където P е дяловото участие, отговарящ на процентното съдържание на съответните минерали: Fsp – фелдшпати, Q – кварц, Bio – биотит, Mu –

мусковит и Amf – амфибол. В случаите, когато участието на минералите мусковит и амфибол е много малко (до 5%), в изчисленията тези членове на уравнение (2.8), респективно в (2.7), се пренебрегват.

2.1.1. Изследвани повърхности на скалите

Във връзка със създаването на спектрална библиотека за вида скали от територията на България в този раздел се разглежда по-подробно влиянието на структурата на повърхността на изследваните скали върху регистрираните спектрални данни. Тя е от особено значение, защото е свързана непосредствено с разпределението на отразената от повърхността лъчиста енергия [5,17,34,46].

При досегашните изследвания в тази насока са изследвани основно с минерални образци. В дисертацията е направен анализ на влиянието на зърнестата структура на изследваните петрографски образци от гранити върху получените спектрални данни. Установено е влиянието на размера на основните скалообразуващи минерали.

В дисертацията изследваните петрографски образци от гранити и минерали имат ортотропни отразяващи повърхности.

В областта на петрографията изследваните петрографски образци от гранити и минерали са с естествена грапавост. Изследваните в дисертацията петрографски образци от гранити и минерали според представените критерии са условно гладки, тъй като изчислените стойности по критерия на Релей и Шифрин клонят към 0.

2.1.2. Химичен състав на минералите. Минерален състав на скалите

Във връзка с избора на методи за определяне на минералния състав на изследваните петрографски образци от гранити в този раздел са представени основни физични процеси, от които зависи спектралната отразителна способност на изследваните мономинерали, скали и скалообразуващи минерали.

При проведените за целта на дисертацията спектрометрични измервания на петрографски образци от гранити се установи, че се наблюдава минимум в спектралния диапазон $(0.8-1.0) \mu m$ в получените спектрални отразителни характеристики, който съгласно [17,120] е свързан с наличието на желязо в изследваните скали.

Във връзка със създаването на спектрална библиотека за вида скали от територията на България и за определяне на минералния състав на изследваните петрографски образци от гранити е представено влиянието на минералния състав върху спектралните данни от спектрометричните измервания.

Основен фактор, който влияе върху измерванията на спектралните коефициенти на отражение от скали, е видът на скалообразуващите ги минерали, т.е. минералният състав. В дисертацията получените спектрални данни от проведените лабораторни спектрометрични измервания показват, че минералният състав на изследваните гранити пряко влияе върху стойностите

на спектралния коефициент на отражение, което допълва резултатите при [5,21,98].

2.1.3. Симуляционно моделиране на спектралните смеси

В дисертацията във връзка с разпознаването на вида на изследваните скали по спектрални данни от спектрометрични измервания са разгледани следните две групи смесени класове:

първа група, гранитите като смесен клас от скалообразуващите ги минерали;

втора група, при която смесеният клас се формира в следните комбинации:

- скала-почва;
- скала-растителност;
- скала-почва-растителност.

В съответствие с това е направено симуляционно моделиране на спектралните данни от спектрометричните измервания на петрографски образци от гранити, кафява горска почва и зелена растителност като са използвани формулите за дву- и трикомпонентни спектрални смеси (2.6).

2.2. Спектрални преобразувания

В дисертацията във връзка с разпознаването на вида на изследваните скали по спектрални данни от спектрометрични измервания в този раздел са описани някои спектрални преобразувания.

За конкретните случаи в ДИ се разработват подходящи спектрални преобразувания, които са свързани с вида на обекта на изследване и със специфични негови свойства и параметри. Разпознаването на различни обекти се състои в изследването на характерните особености в техните спектрални коефициенти на отражение и в тяхната спектрална отражателна характеристика. Преобразуването на получената спектрална отражателна характеристика се използва, за да се подобри анализът и интерпретацията на спектралните данни.

В дисертацията изборът на спектралните преобразувания е свързан със задачата за определяне на вида на изследвания природен обект – скала и за определяне на минералния състав на изследваните гранити. За основа послужи спецификата на спектралните отражателни характеристики на двете групи смесени класове, които са изследвани.

В т.2.2.1. и т.2.2.2. е представено преобразуването на спектралните данни по два подходящи за целта на дисертацията начина, наречени съответно “контрастни коефициенти” и “цветови характеристики”. Понятието контрастен коефициент е въведено в дисертацията като количествен показател за определяне процентното съдържание на смесите в скалите на базата на спектрални отражателни характеристики.

2.2.1. Контрастни коефициенти

Чрез контрастните коефициенти в дисертацията се изследват характерни особености в спектралната отражателна характеристика на изследваните гранити.

Контрастните коефициенти са различно чувствителни към изследваните фактори – химичен състав на минералите и минерален състав на скалите; дялово участие на чистите класове в смесения клас. От тези фактори зависят характерните особености, които се наблюдават в спектралните отражателни характеристики на изследваните гранити и на смесения клас, в който участват гранити.

При изследването на получените спектрални отражателни характеристики на гранитите се наблюдава минимум в спектралния диапазон (0.8-1.0) μm . Този минимум се дължи на поглъщането на лъчистата енергия във видимата и близката инфрачервена области на ЕМС и се свързва с най-често срещания химичен елемент в минералите – желязото. Във връзка с това е предложен контрастен коефициент $[r(1.0\mu\text{m}) - r(0.8\mu\text{m})]/r(0.9\mu\text{m})$, по който да се определя количественото съдържание на желязо във вид на железни окиси в изследваните гранити.

Използването на контрастните коефициенти като спектрални преобразувания за изследване на смесени класове природни обекти има за цел по-ефективно приложение на получените спектрални данни. При изменение на дяловото участие на чистите класове в смесения клас се наблюдават вариации в спектралните коефициенти на отражение, което е напълно закономерно от гледна точка на механизма на формиране на резултантната спектрална отражателна характеристика на смесения клас.

В дисертацията при анализирането на моделираните спектрални смеси, които съдържат спектрални данни от спектрометрични измервания на зелена растителност, е използван като контрастен коефициент най-разпространеният нормиран разликов вегетационен индекс */NDVI/*. Изследвано е влиянието на дяловото участие на чистите класове.

2.2.2. Цветови характеристики

Във връзка с интерпретацията на измерените спектрални данни за разпознаване на вида на изследваните скали в този раздел са представени цветовите характеристики, чрез които да се анализират спектралните отражателни характеристики на изследваните петрографски образци от гранити и мономинерали. Изследваните в дисертацията цветови характеристики са цветови координати на изследваните обекти в цветовия локус, доминираща дължина на вълната, чистота на цвета.

Един от начините за измерване на цвета на един природен обект е определянето на цветовете му характеристики чрез използване на така наречените цветови координати. Това е едно рядко използвано спектрално преобразуване при изследване на смесени класове от природни обекти. В редица статии [104-109,141] се разглеждат цветовете координати *XYZ* на

цветовите стимули. Цветовите координати и специфичните цветови координати x, y, z са подходящо преобразуване на спектралните данни, получени при спектрометрични измервания, тъй като се използва цялата спектрална отражателна характеристика във видимия диапазон.

Цветовите координати XYZ на цветовите стимули най-често се определят спрямо стандартното излъчване D_{65} в системата CIE 1964 (Commission Internationale de l'Eclairage), спектралният състав на който е близък до този на слънчевата енергия.

Цветовите координати (x, y) са цетова характеристика, която се прилага при изследването на природни обекти.

Цветовата характеристика доминираща дължина на вълната λ_d се установява от пресечната точка на линията на цветовия локус и линията, свързваща цветовите координати (x, y) на стандартен източник на електромагнитно излъчване с цветовите координати (x, y) на изследвания природен обект (скала, почва, растителност, смесен клас). Чрез тази характеристика се определят границите, в които попадат различните големи групи природни обекти. Скалите, почвите и сухата растителност попадат в областта от жълт до червено-оранжев цвят или в спектралния диапазон (575-590) nm.

За смесения клас координатите на цвета зависят от спектралните отражателни характеристики на обектите и от тяхното относително дялово участие в изследвания елемент [110]. За смесения клас граници се получават следните цветови координати XYZ на цветовите стимули за смесен клас:

$$\begin{aligned}
 X_{\Sigma}(\lambda) &= \sum_{i=1}^{n=5} p_i r_i(\lambda) D_{65}(\lambda) \bar{x}_{10}(\lambda) \Delta\lambda \\
 Y_{\Sigma}(\lambda) &= \sum_{i=1}^{n=5} p_i r_i(\lambda) D_{65}(\lambda) \bar{y}_{10}(\lambda) \Delta\lambda \\
 Z_{\Sigma}(\lambda) &= \sum_{i=1}^{n=5} p_i r_i(\lambda) D_{65}(\lambda) \bar{z}_{10}(\lambda) \Delta\lambda
 \end{aligned}
 \tag{2.17}$$

където P_i е дяловото участие на всеки чист клас; $r_i(\lambda)$ е спектралният коефициент на отражение на съответния чист клас за дължина на вълната λ ; $D_{65}(\lambda)$ е стандартен източник на електромагнитно излъчване в CIE 1964 за съответната дължина на вълната λ ; $\bar{x}_{10}(\lambda)$, $\bar{y}_{10}(\lambda)$, $\bar{z}_{10}(\lambda)$ са функции на сумиране на равноенергетичен спектър за дължина на вълната λ , получен със спектрометър с $IFOV=10^\circ$; $\Delta\lambda$ е стъпката, с която се изчисляват цветовете координати XYZ на цветовете стимули. В конкретния случай стъпката $\Delta\lambda = 10nm$.

В дисертацията са изследвани цветовете характеристики на петрографските образци от гранити и съответните мономинерали.

2.3. Количествен подход при анализа на спектралните данни от спектрометричните измервания на скали

Във връзка със създаването на база данни /спектрална библиотека/ за вида скали от територията на България, техния минерален и химичен състав в този раздел е представен количествен подход за анализ на спектралните данни от спектрометричните измервания на изследваните мономинерали и петрографски образци от гранити.

Основна характеристика на ДИ през XXI век е широкото използване на алгоритми за количествена оценка на променливите параметри на земната повърхност и на повърхността на други планети, например Марс. Новите сензори имат много по-висока точност на измерване и са много по-добре калибрирани. Практическите алгоритми за количествена оценка на променливите параметри на земната повърхност по спектрални данни от ДИ обхващат отделните области, например: калибриране на сензорите; радиометрична корекция; координатна привръзка, оценка на различни биофизични и геофизични променливи.

В дисертацията се използва количествен подход при линейното разделяне на спектралните смеси и при сравнителната интерпретация на спектралните данни.

2.3.1. Линейно разделяне на спектрални смеси

В дисертацията изследваните петрографски образци от гранити се разглеждат като линейна смесица от скалообразуващите ги минерали. Линейното разделяне на спектралната смесица е реализирано чрез използването на процедури, които са представени в този раздел.

Законът за линейна суперпозиция на отразената лъчиста енергия (2.1) позволява по измереното интегрално отражение на смесищия клас $r_{\Sigma}(\lambda_i)$ и априорно известни спектрални отражателни характеристики на отделните класове $r_1(\lambda_i)$ и $r_2(\lambda_i)$ да бъдат определени пропорциите, с които тези

класове участват във формирането на общата отразителна характеристика, т.е. да бъдат определени P_1 и P_2 :

$$P_1 = \frac{r_{\Sigma}(\lambda_i) - r_2(\lambda_i)}{r_1(\lambda_i) - r_2(\lambda_i)} \quad (2.18)$$

$$P_2 = \frac{r_1(\lambda_i) - r_{\Sigma}(\lambda_i)}{r_1(\lambda_i) - r_2(\lambda_i)} \quad (2.19)$$

където P_1 и P_2 е дяловото участие на всеки чист клас в смесения клас; $r_{\Sigma}(\lambda_i)$ е резултантният спектрален коефициент на отражение на смесения клас за всяка дължина на вълната $\lambda_i (i=1, \dots, n)$; $r_1(\lambda_i)$ и $r_2(\lambda_i)$ са спектралните коефициенти на отражение на всеки чист клас.

Тази процедура служи за линейно разделяне на смесени класове и е в основата на решаването на задачи, свързани с разпознаването на обекти върху земната повърхност по спектрални отразителни характеристики и количествена оценка на дяловото им участие в смесените класове.

Във връзка с проведените спектрометрични измервания на гранитите, разглеждани като смесен клас от скалообразуващите ги минерали, получените спектрални данни са разделени линейно според формули (2.18) и (2.19). Установени са количествени зависимости между спектралните отразителни характеристики на изследваните петрографски образци гранити и дяловото участие на скалообразуващите минерали на гранитите. По този начин е определен минералния състав на изследваните образци от гранити.

Изследвани са спектралните отразителни характеристики на смесения клас скала-растителност, получени при теренните спектрометрични измервания. Направено е линейно разделяне на спектралната смес.

2.3.2. Сравнителна интерпретация на спектралните данни

Ефективната интерпретация на спектрални данни от спектрометрични измервания зависи от спектралните свойства на изследваните гранити. Сравнителната интерпретация на спектралните отразителни характеристики на изучаваните обекти в отделните спектрални диапазони на измерване дава възможност да се сравнят помежду им спектралните отразителни характеристики на различните обекти и да се определят информативните диапазони от ЕМС за отделните обекти на изследване. При анализа на спектралните данни се установява кой диапазон за изучаваните обекти съдържа необходимата информация за целите на дадено изследване. За големи групи обекти, например: почви, растителност, вода, са установени съществени различия във вида на спектралните им отразителни характеристики в отделните области от ЕМС, което показва различно

взаимодействие между лъчистата енергия и съответния обект на наблюдение. Когато се изучават близки по спектрални отражателни характеристики обекти (скали, минерали, почви), сравнителната интерпретация трябва да се извърши и по еталонни данни, които се обобщават в спектрални библиотеки.

Спектралните библиотеки представляват колекции от спектрални данни, които осигуряват еталонни спектри за редица процедури в ДИ като например, класификация на обекти от земната повърхност; линейно разделяне на спектрални смеси за разпознаване на чистите класове обекти в изследваните спектрални смеси. Спектралните библиотеки са полезни в ДИ на планетите.

Най-важното правило, което трябва да се съблюдава при тази сравнителна интерпретация е, че данните от различните спектрометри трябва да се сравняват само, когато са преобразувани до спектрален коефициент на отражение.

Съществуват множество достъпни спектрални библиотеки като тази на Геоложката служба на САЩ /USGS/ [16], които съдържат еталонни спектрални характеристики на много обекти, сред които основно внимание е обърнато на минералите. В тази спектрална библиотека са включени спектрални данни от лабораторни спектрометрични измервания, но липсват спектрални данни от теренни спектрометрични измервания.

Друга база данни, която включва и спектрални данни от теренни експерименти, е системата SPECCHIO в Лабораторията по дистанционни изследвания към Университета в Цюрих [123]. Достъпът до SPECCHIO е свободен след регистрация, като може както да се използват данните от базата, така и да се въвеждат данни, получени при провеждане на различни експерименти.

2.4. Изводи към Глава 2.

Избран е метод за определяне на спектралния коефициент на отражение на скали на базата на спектрометрични измервания в лабораторни и теренни условия.

За количествено определяне на разлики в спектралните отражателни характеристики на различните видове скали е предложен от автора контрастен коефициент. За количествено определяне на предложения контрастен коефициент е използвано симулационно моделиране на спектрални смеси. На базата спектрални преобразувания количествено са определени контрастни коефициенти и цветови характеристики на скалите.

Предложена е процедура за сравнителна интерпретация на спектралните данни от спектрометричните измервания на скали:

1. Сравнение на спектралните характеристики на обектите на изследване, получени с различни спектрометри.
2. Сравнение на получените експериментални спектрални данни с еталонни такива от спектрални библиотеки.
3. Сравнение на спектралните характеристики на групите обекти: минерали, скали, почва, растителност.

Глава 3.

Прилагане на методите за изследване на спектралните отразителни характеристики на скали

3.1. Планиране и провеждане на спектрометричните измервания

Провеждането на изследвания на спектралните отразителни характеристики на скали от територията на България, които са предмет на дисертацията, се налага от нуждата за създаване на база данни от спектрални отразителни характеристики /спектрална библиотека/ за вида скали от територията на България и техния минерален състав. Но съществуващият малък брой изследвания на спектралните отразителни характеристики на скали от територията на България не е достатъчен за тази цел. По тази причина е необходимо планиране на експерименти, при което да се проведат значителен обем спектрометрични измервания на изследваните скали.

В изпълнение на поставените задачи в дисертацията за постигане на нейната цел е направено планиране на експериментите. Планирането на експериментите като алгоритъм включва определянето на следните процедури:

- обект на изследването;
- състав на измерванията;
- условия на измерванията;
- апаратурен състав;
- брой на измерванията.

За целите на проведените спектрометрични измервания са използвани многоканални спектрометрични апаратурни комплекси, разработени в секция Системи за дистанционни изследвания. Броят на измерванията е по 10 повторения за всеки образец.

3.1.1. Обекти на изследването

В изпълнение на поставените задачи в дисертацията е планирано да се проведат лабораторни и теренни спектрометрични измервания на скали. Тези спектрометрични измервания имат за цел да се определят спектралните отразителни характеристики на гранити, които да се включат в база данни от спектрални отразителни характеристики /спектрална библиотека/ на скали от територията на България.

За основни обекти на изследването са избрани гранити, защото са едни от най-разпространените скали на земната кора (изграждат приблизително 70% от континенталната земна кора) и защото са скали с полиминерално съдържание. В дисертацията съпътстващи обекти на изследване са и основните скалообразуващи минерали, почвите и растителността в районите на разпространение на гранитите. Всички лабораторни и теренни експерименти включват тези обекти.

Основни обекти на проведените спектрометрични измервания са гранитите – общо 46 образеца, които са избрани като най-представителни за отделни райони от територията на България. Теренните измервания на

изследваните обекти са проведени по маршрути, съобразени с изследваните петрографски образци гранити.

В **Таблица 3.1.** са описани изследваните образци и е представено процентното съдържание на основните скалообразуващи минерали, които формират съответния вид гранити. Сред изследваните петрографски образци преобладават обикновените гранити. В следващите таблици тази последователност от групи, описани в **Таблица 3.1.**, ще бъде спазвана.

Съпътстващи обекти на изследване са отделните основни скалообразуващи минерали, които формират смесения клас гранити. Те са измерени като единични масивни образци от калиев фелдшпат, ортоклаз, кварц и мусковит и като част от петрографските образци гранити.

Скалите, които са изследвани при теренните спектрометрични измервания, са представени накратко в **Таблица 3.2.**

Таблица 3.1. Процентно съдържание на основните скалообразуващи минерали в изследваните гранити

вид скала	място на вземане	структура	KFsp,%	Pl, %	Q, %	Bio, %	Mu, %	Amf, %
Гранит (5 обр.)	Родопи	средно-зърнеста		50	35	15		
Порфиroidен гранит (4 обр.)	Хисар	среднозърн. порфири от К фелдшп.	10	30	40	10		10
Порфиroidен гранит (4 обр.)	Казанлъшко	едрозърн., порфири от плагиоклаз	15	35	25	5		20
Двуслюден гранит (3 обр.)	Панагюрище	среднозърнеста		45	45	5	5	
Порфи-roidен гранодиорит (4 обр.)	Елхово	дребнозърн порфири от К фелдшп.	10	50	10	5		25
Гранит (5 обр.)	Пирин	средно-зърнеста	20	25	45	10		
Гранит (5 обр.)	Пирин	дребно-до среднозърн.		40	40	20		
Гранит (5 обр.)	Средна гора	дребно-до средно-зърнеста	45		45	5		5
Гранит (5 обр.)	кар. Гранитово	средно-до едрозърнеста	30	20	40	10		
Гранит (6 обр.)	Рила	дребно-до средно-зърнеста		45	45	5		5

Таблица 3.2. Изследвани скални образци при теренните спектрометрични измервания

обект	местоположение, район
гранити и гранодиорити	р.Медетска, Същинска Средна гора
гранити	Кирилова поляна, Рила
диорити	Петрохан, Западна Стара планина
монцитони	хижа Алеко, Витоша

3.1.2. Състав на измерванията

В изпълнение на поставените задачи в дисертацията е определен следния конкретен състав на измерванията, който включва провеждането на планираните лабораторни и теренни спектрометрични измервания на гранити, почва и зелена растителност.

Лабораторните спектрометрични измервания на петрографски образци от гранити, мономинерали, почва и зелена растителност са проведени в контролирани условия. Контролираните условия при лабораторните спектрометрични измервания включват избор на електромагнитно лъчение и неговото позициониране; състоянието на изследваните образци от гранити, минерали и почва; точно определяне на изследваната площ; установяване и регулиране на спектрометъра в работно положение; предварително изчислено и зададено разстояние между обекта на изследване и входната оптика на спектрометъра.

В състава на измерванията се включват теренни спектрометрични измервания на гранити, почви и зелена растителност в района на открития рудник Асарел-Медет, от където са взети част от изследваните петрографски образци гранити.

При проведените спектрометрични измервания са получени следните спектрални данни:

1. Спектрални отражателни характеристики на петрографските образци гранити като смесен клас от основните скалообразуващи ги минерали.
2. Спектрални отражателни характеристики на мономинерали от скалообразуващите минерали и на скалообразуващите минерали за всеки образец.
3. Спектрални отражателни характеристики на почвени проби.
4. Спектрални отражателни характеристики на зелена растителност.

В изпълнение на задача 2.а) в дисертацията спектрометричните измервания на спектралните отражателни характеристики на гранити, мономинерали, почва и зелена растителност са проведени в лабораторни условия със спектрометрите ICOX-020, SRM и SPS-1, установени в надир спрямо изследваната повърхността. Осветяването на изследвания обект е осъществено с изкуствен източник на електромагнитно излъчване – халогенна лампа като са съблюдавани постоянни условия на осветеност.

При предварителната обработка на получените спектрални данни от лабораторните спектрометрични измервания са въведени корекция на

апаратурните шумове (измерен е тъмнинният ток) и е направена радиометрична калибровка спрямо еталонен екран (измерена е отразената лъчиста енергия от еталонна отразяваща повърхност).

В изпълнение на задача 2.б) са проведени теренни измервания със спектрометър TOMS. Измерванията са проведени при ясно време, на сянка, в часовия интервал от 11.30 до 13.30 часа.

Теренните спектрометрични измервания на следните видове скали: гранити, гранодиорити, диорити и монцитони са проведени по маршрути в Същинска Средна гора (Централно Средногорие), Рила, Западна Стара планина и Витоша, което е осъществено благодарение на съдействието на колегите от катедри „Приложна геофизика” и „Минералогия и петрография” към Минно-геоложкия университет /МГУ/ „Св. Иван Рилски”. От точките на измерване са взети стандартни петрографски образци, които са изследвани в лабораторни условия. Проведени са геоложки наблюдения, петрографски изследвания и фотодокументация на обектите на изследване.

В получените спектрални данни чрез алгоритми за предварителна обработка [124,125] са въведени корекция на апаратурните шумове и радиометрична калибровка спрямо еталонен екран, което е осъществено чрез специализираната програма на спектрометъра TOMS. Получените данни са измерени като средна стойност от зададени да се измерят по 100 спектъра за всяко измерване.

Таблица 3.3. Допълнителна информация за всеки експеримент

обект на измерване	GPS	планина	atm	t_i, ms	λ_n	H_{oo}, cm
гранити и гранодиорити	N42°38'04" E24°09'44"	Същинска Средна гора	Ясно, сянка	10	100	10
гранити	N42°09'14" E23°19'53"	Рила	Ясно, сянка	10	100	10
диорити	N43°07'39" E23°08'04"	Стара планина	Ясно, сянка	10	100	10
монцитони	N42°35'18" E23°17'34"	Витоша	Ясно, сянка	10	100	10

Като част от предварителната обработка на получените данни в **Таблица 3.3.** е представена необходимата допълнителна информация за координатната привръзка във вид на GPS-координатите на точките на измерване (*GPS*), атмосферните условия (*atm*) на измерване при теренните спектрометрични измервания, времето за провеждане на едно измерване (t_i), броя на статистически усреднените спектри (λ_n) и разстоянието от обекта до входната оптика (H_{oo}).

За определяне на спектралните коефициенти на отражение и в двете задачи е използвана еталонна отразителна повърхност.

3.1.3. Апаратурен комплекс

В изпълнение на поставените задачи в дисертацията са проведени планираните лабораторни и теренни спектрометрични измервания на петрографските образци гранити, мономинералите, почвените проби и

зелената растителност. За тази цел са използвани многоканални спектрометрични апаратурни комплекси, разработени в секция Системи за дистанционни изследвания.

В този раздел са представени използваните апаратурни комплекси, които включват спектрометрична система, еталонна отразяваща повърхност, изкуствен източник на електромагнитно излъчване, подвижен оптичен визьор, механична конструкция.

Спектрометър ИСОХ-020 [69,90] служи за измерване на спектралните коефициенти на отражение на природни обекти в наземни условия.

Спектрометрична система SRM [69,90,119], която се използва за измерване на спектралните коефициенти на отражение на природни обекти

Спектрометрична система за дистанционни изследвания SPS-1 е разработена в секция Системи за дистанционни изследвания [91,92]. Използва се за провеждане на спектрометрични измервания на природни обекти в лабораторни условия.

Спектрометрична система за тематично ориентирани лабораторни, теренни и самолетни спектрометрични измервания Thematically Oriented Multichannel Spectrometer /TOMS/ Системата е разработена в секция Системи за дистанционни изследвания [93,94].

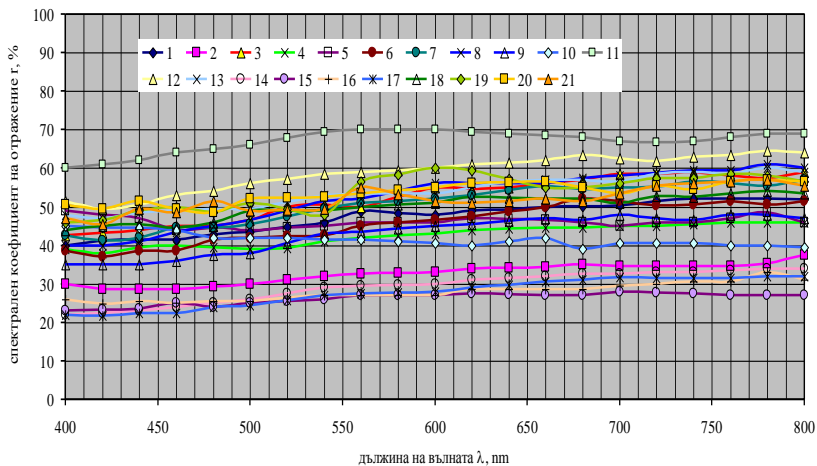
3.2. Анализ на резултати, получени при спектрометричните измервания на скали, за изследване на спектралните им отразителни характеристики

В този раздел са представени получените резултати от прилагането на методите за обработка, анализ и интерпретация за изследване на спектралните отразителни характеристики на скали. Описаните в Глава 2 методи са приложени самостоятелно и комбинирано. Изследвани са спектралните отразителни характеристики на гранитите във връзка с поставената цел на дисертацията. Чрез избраните методи са анализирани връзките между получените данни от спектрометричните измервания и свойствата и параметрите на изследваните гранити. Резултатите са представени и публикувани в [публ.1-публ.7].

В изпълнение на поставените задачи в дисертацията са проведени спектрометрични измервания в лабораторни условия. Получени са спектрални отразителни характеристики на изследваните петрографски образци гранити от измерванията с трите спектрометъра – ИСОХ-020, SRM и SPS-1. Резултати са представени на *Фигура 3.18а.*, *Фигура 3.18б.* и *Фигура 3.18в.*

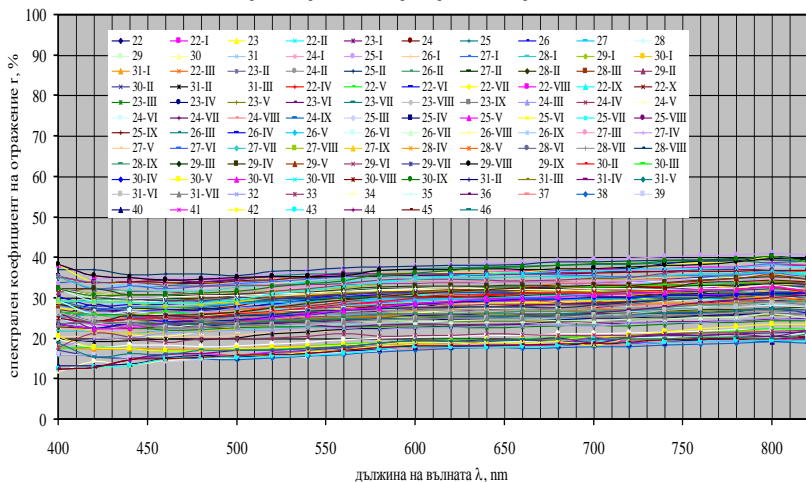
За всички използвани спектрометри се наблюдава, че спектралният коефициент на отражение от изследваните гранити равномерно нараства във видимия и близкия инфрачервен диапазон от ЕМС от 400 до 1100 nm.

Спектрални отразителни характеристики на гранити /ИСОХ-020/



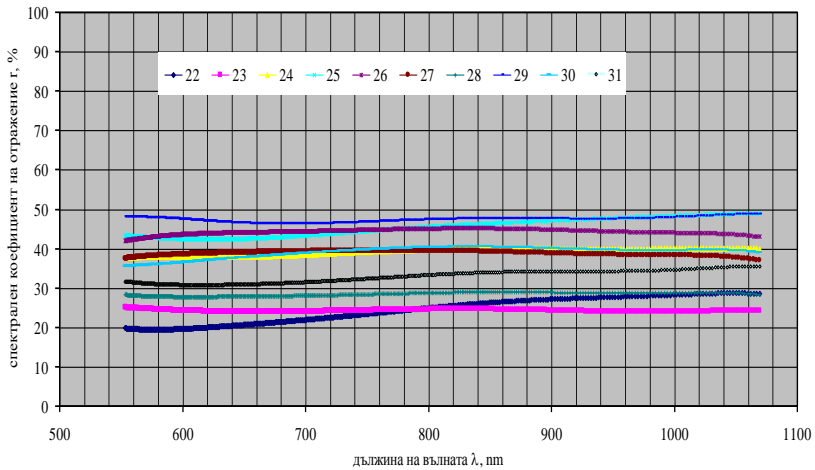
Фигура 3.18а. Спектрални отразителни характеристики на гранити, измерени със спектрометър ИСОХ-020

Спектрални отразителни характеристики на гранити /SRM/

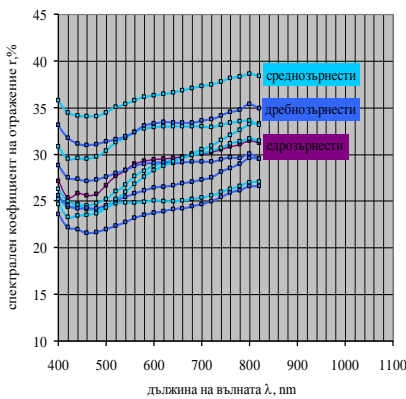


Фигура 3.18б. Спектрални отразителни характеристики на гранити, измерени със спектрометър SRM

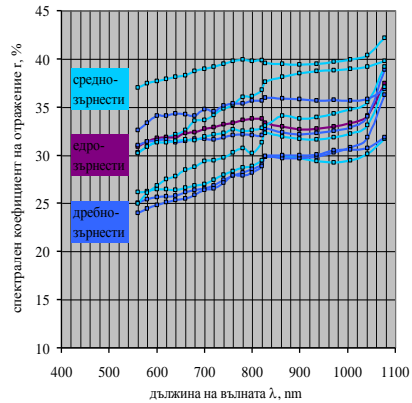
Спектрални отразителни характеристики на гранити /SPS-1/



Фигура 3.18в. Спектрални отразителни характеристики на гранити, измерени със спектрометър SPS-1



(а) – SRM



(б) – SPS-1

Фигура 3.18г. Спектрални отразителни характеристики на гранити с различна структура

За спектрометър ИСОХ-020 стойностите на спектралния коефициент на отражение на изследваните гранити в диапазона (400-800) nm са от 20% до 60%. За спектрометър SRM стойностите на спектралния коефициент на отражение на изследваните гранити в диапазона (400-820) nm са от 10% до 40%. За спектрометър SPS-1 стойностите на спектралния коефициент на отражение на изследваните гранити в диапазона (550-1100) nm са от 10% до 50%.

За провеждане на спектрометричните измервания са подбрани петрографски образци гранити с естествено грапави повърхности и със структура с различен размер на минералните зърна на скалообразуващите минерали. Подбраните образци гранити са с естествено грапави повърхности, тъй като целта е лабораторните спектрометрични измервания максимално да се доближат до провеждане на такива измервания в теренни условия. При рязани и шлифовани образци повърхността на изследване се доближава да гладка огледална повърхност, което затруднява спектрометричните измервания и се внася грешка в стойностите на измерения спектрален коефициент на отражение. За целите на дистанционните спектрометрични измервания е неподходящо да се използват шлифи от минерали и скали поради твърде тънката дебелина на шлифа, което би довело освен до отражение и до пропускане на падащата лъчиста енергия.

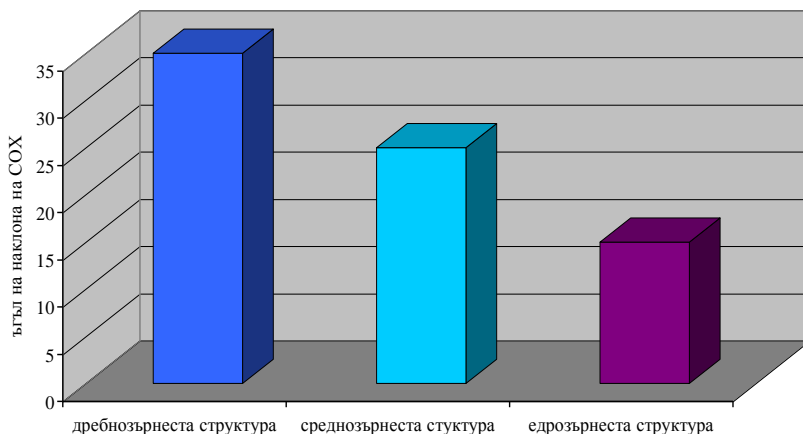
Направен е анализ на влиянието на изследваната повърхност на образците гранити върху данните от спектрометричните измервания. Според авторите на [5,98] сумарно отразената и погълната светлина от изследвания минерал зависи от размера на минералните зърна. Публикуваните резултати в [16] от проведени спектрометрични измервания на пироксен като функция на размера на минералните зърна. Установена е зависимостта на наклон на спектралната отражателна характеристика на минерала от размера на минерала. Тази зависимост е обратно пропорционална, т.е. при по-едрозърнест минерал наклонът на спектралната крива е по-малък.

На *Фигура 3.18г. (а) и (б)* са представени спектралните отражателни характеристики на изследваните гранити. Те са резултат от проведените лабораторни експерименти с две от използваните апаратури, съответно SRM и SPS-1. Видът на спектралните отражателни характеристики на изследваните гранити са подобни на този на почвите. Той се изразява в монотонно нарастване на стойностите на спектралния коефициент на отражение в спектралния диапазон на измерване. Затова в спектралния диапазон 0.55-0.8 μm спектралните отражателни характеристики могат да се апроксимират с права линия. Отличителен признак е наклонът на тази права, който се явява информационен признак на обектите и се различава за почвите и скалите.

За получените спектрални отражателни характеристики на изследваните гранити е направен анализ и е установено, че се наблюдава тази зависимост, която се изразява в ъгъла на наклона на спектралните отражателни характеристики. Изчислен е наклонът на спектралната отражателна характеристика в диапазона 0.55-0.8 μm .

На фигурите отбелязаната с виолетова линия спектрална отражателна характеристика на едрозърнестите гранити е почти хоризонтална или с много малък наклон (0-15). Показаните със светлосиня линия спектрални отражателни характеристики на среднозърнестите гранити имат наклон (15-30). Маркираните със синя линия спектрални отражателни характеристики на дребнозърнестите гранити нарастват под ъгъл над 30. Следователно,

получените стойности на спектралните коефициенти на отражение зависят от вида на структурата на изследваната повърхност на петрографския образец гранит, тоест от размера на скалообразуващите минерални зърна.



Фигура 3.19. Зависимост на ъгъла на наклона на спектралните отражателни характеристики на гранитите от структурата им

На **Фигура 3.19.** е представена зависимостта на ъгъла на наклона на спектралната отражателна характеристика от вида на структурата на изследваните гранити. Ъгълът на наклона на спектралната отражателна характеристика има стойност, която е усреднена за всеки вид на структура на изследваните гранити. Структурите са групирани като дребно-, средно- и едрозърнести. Наблюдава се, че ъгълът на наклона на спектралните отражателни характеристики на изследваните образци гранити намалява с увеличаване на размера на скалообразуващите минерали.

Тази зависимост може да се използва при сравнение на спектралните отражателни характеристики на близки скали за тяхното разпознаване.

Установените зависимости между вида на спектралните отражателни характеристики на изследваните гранити и тяхната структура са докладвани на ежегодната международна научна сесия на МГУ и са публикувани в Годишника на МГУ [публ.2].

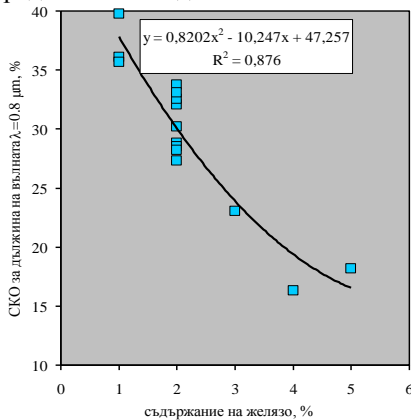
В изпълнение на поставените задачи измерените спектрални отражателни характеристики на гранити са изследвани във връзка с химичния и минерален състав на изследваните образци гранити.

В получените спектрални отражателни характеристики от проведените спектрометрични измервания на петрографски образци от гранити се установи, че се наблюдава минимум на стойността на спектралния коефициент на отражение в спектралния диапазон (0.8-1.0) μm . За установяване на количествена връзка между спектралния коефициент на

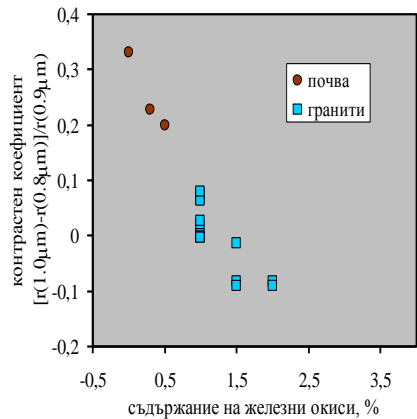
отражение и съдържанието на желязни окиси (FeO и Fe_2O_3) са анализирани спектралните отражателни характеристики на изследваните гранити.

На **Фигура 3.20.** е представена зависимостта на стойностите на спектралния коефициент на отражение за дължина на вълната $\lambda = 0.8\mu\text{m}$ от съдържанието на желязото. Наблюдава се, че с увеличаване на съдържанието на желязо стойностите на спектралния коефициент на отражение за дължина на вълната $\lambda = 0.8\mu\text{m}$ намаляват. Данните за съдържанието на желязо са за част от изследваните гранити ($n=10$). За тази извадка е направен анализ на спектралните данни. Установено е, че тази зависимост се апроксимира с полином от втора степен, чието уравнение е: $y = 47.2568 - 10.2473x + 0.8202x^2$.

Коефициентът на корелация е $r^2 = 0.84$ при доверителен интервал с $p < 0.05$. Тази корелация не е достатъчна да се направи извод за адекватност на предложения модел за по-голяма извадка.



Фигура 3.20. Зависимост на СКО за дължина на вълната $\lambda=0.8\mu\text{m}$ от съдържанието на желязо в изследваните гранити (извадка $n=10$)



Фигура 3.21. Зависимост на контрастния коефициент $[r(1.0\mu\text{m}) - r(0.8\mu\text{m})]/r(0.9\mu\text{m})$ от съдържанието на желязни окиси в гранит и кафява горска почва

В дисертацията са изследвани спектралните отражателни характеристики на гранитите и е предложен контрастен коефициент $[r(1.0\mu\text{m}) - r(0.8\mu\text{m})]/r(0.9\mu\text{m})$, по който да се определя количественото съдържание на желязо във вид на желязни окиси в изследваните гранити. Той е тестван за малък брой образци гранити и почвени проби.

На **Фигура 3.21.** са представени резултатите от изследването на предложеният контрастен коефициент, чрез който да може да се определи съдържанието на желязо по спектралните отражателни характеристики на изследваните скали. Предложеният контрастен коефициент е тестван само за наличната информация за малка извадка от измерените спектрални

отражателни характеристики на гранити и почви и се тества в момента за спектрални отражателни характеристики от минерали с по-високо съдържание на желязо. Наблюдава се, че стойността на контрастния коефициент намалява при увеличаване на съдържанието на железни окиси и в гранитите, и в почвите. Наблюдава се, че при изследваната зависимост на контрастния коефициент $[r(1.0\mu m) - r(0.8\mu m)]/r(0.9\mu m)$ от съдържанието на железни окиси в изследваните гранити и почви, скалите и почвите се групират по стойностите на предложения контрастен коефициент. Следователно, може да се направи извода, че тази зависимост може да се използва при разпознаването на скали и почви, които имат високо съдържание на желязо във вид на железни окиси.

Резултатите от тези изследвания са докладвани на ежегодната международна научна сесия на МГУ и публикувани в Годишника на МГУ [публ.3].

Във връзка с поставените задачи за определяне на вида скали и за определяне на минералния им състав, в дисертацията са изследвани и анализирани получените от спектрометричните измервания спектралните отражателни характеристики на гранитите като смесен клас от скалообразуващите ги минерали, групирани като светли и тъмни.

Анализирани са спектралните отражателни характеристики на гранитите чрез:

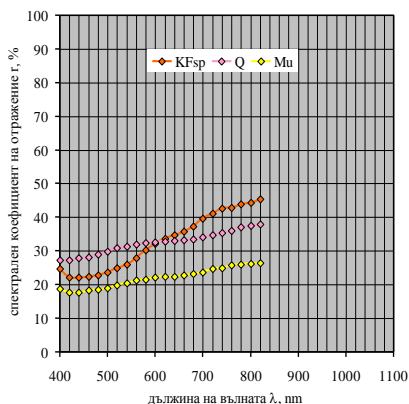
- изобразяване на спектралните коефициенти на отражение на гранитите в двумерно пространство за избрани дължини на вълната λ и формиране на базова скална линия;
- цветови характеристики на гранитите и мономинералите.

В изпълнение на поставената задача за определяне на минералния състав на скали са проведени спектрометрични измервания на отделни минерали или мономинерали, които изграждат изследваните образци гранити.

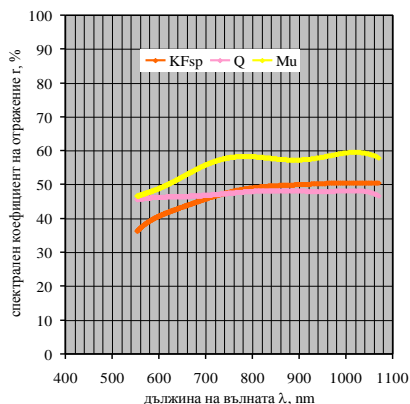
На **Фигура 3.22**, са показани спектралните отражателните характеристики на скалообразуващите минерали на гранитите във вид на мономинерални образци, измерени със спектрометрите SRM и SPS-1. Със спектрометър SPS-1 са проведени спектрометрични измервания на минерали, които изграждат изследваните образци гранити.

При сравнение на получените спектрални отражателни характеристики с двата спектрометъра се наблюдава разлика в стойностите на спектралния коефициент на отражение на изследваните минерали. Разликата се дължи на различната пространствена и спектрална разделителна способност на детекторите в двата спектрометъра. Това налага спектрометричните измервания да се проведат от различното разстояние между изследвания минерал и входната оптика. Въпреки тези установени разлики в стойностите на спектралния коефициент на отражение се наблюдава запазване на вида на спектралната отражателна характеристика в диапазона на измерване. Следователно, може да се направи извода, че получените спектрални

отражателни характеристики на изследваните минерали могат да се представят в спектрални библиотеки от спектрални отражателни характеристики на скали и минерали.



SRM



SPS-1

Фигура 3.22. Спектрални отражателни характеристики на изследваните скалообразуващи минерали, характерни за гранитите – калиев фелдшпат (KFsр), кварц (Q), мусковит (Mu)

В дисертацията изследваните петрографски образци гранити се разглеждат като смесен клас от основните скалообразуващи минерали, които са с различно процентно съдържание на тъмнооцветени /мафични, тъмни/ скалообразуващи минерали – биотит и амфибол и светлооцветени /салични, светли/ скалообразуващи минерали – кварц, калиев фелдшпат, плагиоклаз, мусковит.

На **Фигура 3.24.** са представени спектралните отражателни характеристики на гранити и гранодиорити, измерени със спектрометър ИСОХ-020. От тях са подбрани по 4 образца от двата вида скали, за да се направи анализ на техните спектрални отражателни характеристики по отношение на зависимостта на спектралния коефициент на отражение от съдържанието на светли минерали в тях.

Изследването на спектралните отражателни характеристики на гранити (gr) и гранодиорити (grd) показва, че групирането в два подкласа обекти според съдържанието на светло- и тъмнооцветени минерали е визуално ясно разграничимо по стойности на спектралния коефициент на отражение в целия разглеждан диапазон от дължини на вълните. При гранитите съдържанието на светли минерали е по-високо $P_l = 50 - 70\%$, което довежда до получаване на по-високи стойности на спектралния коефициент на отражение, докато при гранодиоритите количеството на тъмните минерали е по-голямо $P_d = 75 - 90\%$, което се изразява с по-ниски стойности на спектралния коефициент на отражение.

Стойностите на P_l и P_d за всеки образец са определени приблизително като за:

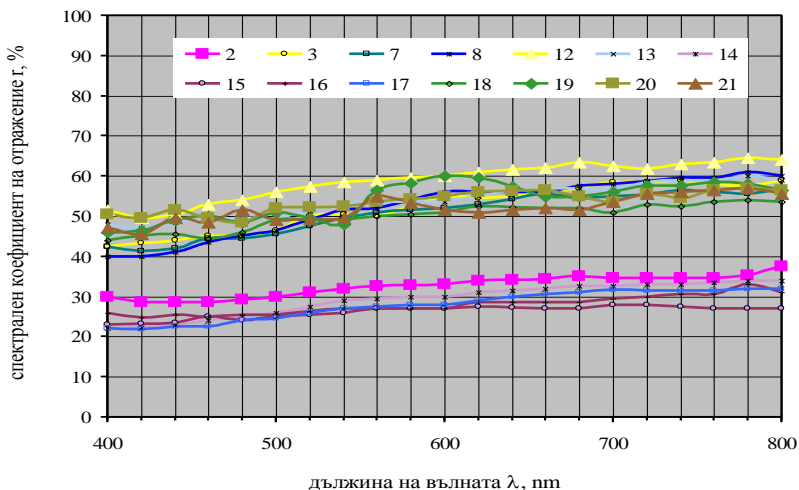
P_l : gr1-70% gr2-50% gr3-55% gr4-60%;

P_d : grd1-25% grd2-15% grd3-10% grd4-20%.

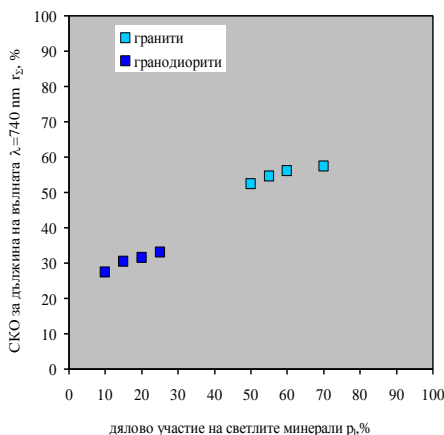
Наблюдава се, че стойностите на спектралните коефициенти на отражение се обособяват в границите 20-30% за гранодиоритите и 40-50% за гранитите.

След направеното изследване на спектралните отражателни характеристики на избраните гранити и гранодиорити може да се направи извода, че по стойностите на спектралния коефициент на отражение е възможно определянето на вида скали с еднакъв минерален състав, но с различно дялово участие на отделните групи минерали.

COX на гранити и гранодиорити



Фигура 3.24. Спектрални отражателни характеристики на гранити и гранодиорити, измерени със спектрометър ИСОХ-020



Фигура 3.25. Зависимост на спектралния коефициент на отражение /СКО/ $r_\Sigma(\lambda)$ на смесения клас за дължина на вълната $\lambda = 740 \text{ nm}$ от дяловото участие p_l на светлите минерали в гранитите и гранодиоритите

На **Фигура 3.25.** е показана зависимостта на спектралния коефициент на отражение $r_\Sigma(\lambda)$ на смесения клас гранити и гранодиорити от дяловото участие на светли минерали p_l в гранитите и гранодиоритите при дължина на вълната $\lambda = 740 \text{ nm}$.

Стойностите на дяловото участие p_l се групират от 10% до 30% за гранодиоритите и от 50% до 80% за гранитите, на които съответстват стойности на резултантния спектрален коефициент на отражение $r_\Sigma(\lambda = 740 \text{ nm}) = 28 - 32\%$ и $r_\Sigma(\lambda = 740 \text{ nm}) = 45 - 52\%$. Оформят се две групи стойности на спектралния коефициент на отражение на гранитите и гранодиоритите. Следователно, тази зависимост може да се използва при разпознаването на гранити и гранодиорити, които са еднакви по минерален състав, но с различно дялово участие на светлите и тъмните скалообразуващи минерали.

Спектралните отразителни характеристики на гранитите, получени от всички спектрометри и представени на **Фигури 3.18а. 3.18б. 3.18в. 3.18г.**, са изследвани по отношение на стойностите на спектралния коефициент на отражение на гранитите за разпознаване на вида скали и за определяне на връзката с минералния им състав. Избрани са дължините на вълните $R = 0.62 \mu\text{m}$ и $NIR = 0.76 \mu\text{m}$, защото в тези две области се наблюдава промяна в спектралната отразителна характеристика на скалообразуващите минерали.

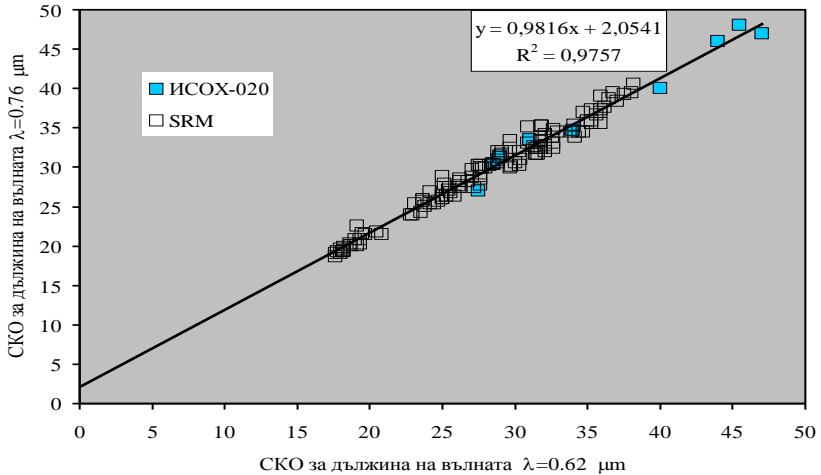
На **Фигура 3.26.** са представени спектралните коефициенти на отражение на гранити в двумерното пространство от две дължини на вълните $R = 0.62 \mu\text{m}$ и $NIR = 0.76 \mu\text{m}$, получени със спектрометри ИСОХ-020 и SRM. В двумерната координатната система R - NIR стойностите на спектралния

коэффициент на отражение за образците от гранити попадат на добре оформена линия, наречена базова скално-почвена или скална, аналогично на базовата почвена линия [20,101]. Базовата скална линия е определена и има вида $y = 0,9816x + 2,0541$ с коэффициент на корелация $R^2 = 0,9757$. Следователно, може да се направи извода, че получените стойности на спектралния коэффициент на отражение на гранити за двете дължини на вълната $R = 0.62\mu m$ и $NIR = 0.76\mu m$, изследвани в двумерното пространство от тях, може да се използва при разпознаването на гранити.

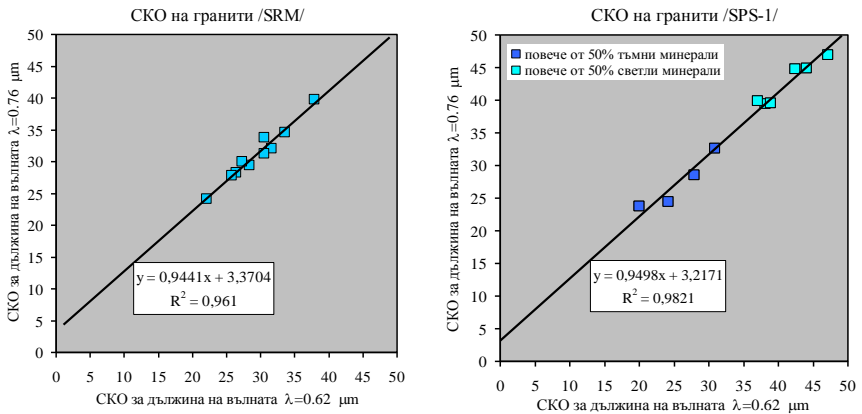
На **Фигура 3.27**, са представени спектралните коефициенти на отражение на гранити в двумерното пространство от две дължини на вълните $R = 0.62\mu m$ и $NIR = 0.76\mu m$, получени със спектрометри SRM и SPS-1. При направеното сравнение на стойностите на спектралните коефициенти на отражение на гранитите, получени с двата спектрометра, се установи, че по стойностите на спектралните коефициенти на отражение от SPS-1 може да се направи разделяне на групи според съдържанието на скалообразуващите минерали. Докато при получените спектрални коефициенти на отражение на гранити със SRM това разделяне не може да се направи. Тази разлика се дължи на спектралната разделителна способност на двата спектрометра, като тази на SPS-1 е по-висока. Следователно, за да се постигне по-точно определяне на минералния състав на гранити се налага използването на спектрометри с по-висока спектрална разделителна способност.

При сравнение на получените уравнения на базова скална линия за изследваните гранити е установено, че и при двете използвани спектрометрични системи /SRM и SPS-1/ наклонът на получената базова скална линия за изследваните гранити е много близък. Този факт показва, че изследването на спектралните коефициенти на отражение на гранити в двумерното пространство от две дължини на вълните $R = 0.62\mu m$ и $NIR = 0.76\mu m$, получени с различни спектрометри, може да се използва за разпознаване на вида скали. Относно определянето на минералния състав на скали се стига до извода, че се налага използването на спектрометри с по-висока спектрална разделителна способност.

Спектрален коефициент на отражение на гранити



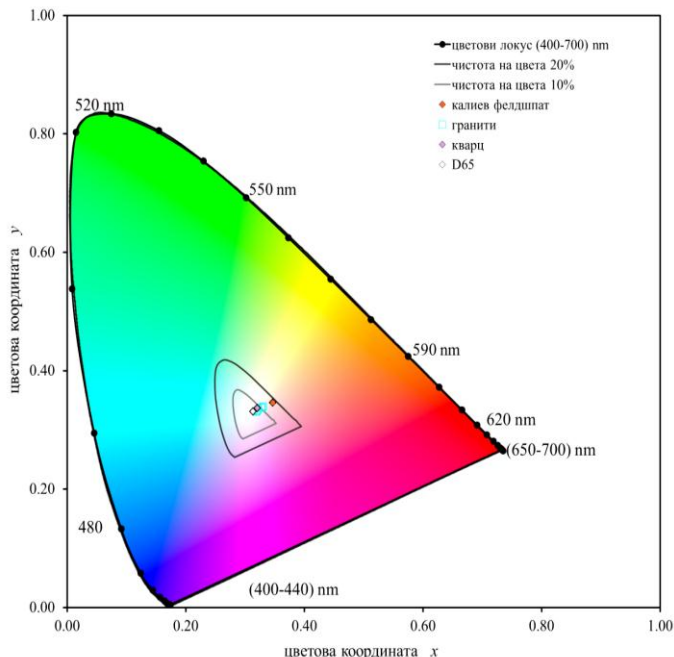
Фигура 3.26. СКО на гранити в двумерното пространство от две дължини на вълните $R = 0.62\mu m$ и $NIR = 0.76\mu m$, получени със спектрометри ИСОХ-020 и SRM



Фигура 3.27. СКО на гранити в двумерното пространство от две дължини на вълните $R = 0.62\mu m$ и $NIR = 0.76\mu m$, получени със спектрометри SRM и SPS-1

Изследването на спектралните отразителни характеристики на гранити е направено и чрез анализиране на цветовете характеристики на гранитите и мономинералите. За целта са изчислени цветови координати на изследваните гранити и мономинерали в цветовия локус, доминиращата дължина на вълната, чистотата на цвета. В дисертацията е направен анализ на цветовете

характеристики на гранитите, разгледани като смесен клас от скалообразуващите ги минерали, които са групирани според съдържанието на светли и тъмни минерали като светлооцветени гранити и тъмнооцветени гранити. Цветът на гранитите се обуславя от цвета на основните скалообразуващи ги минерали фелдшпати (Fsp) и кварц (Q) и от цветните биотит (Bio), мусковит (Mu) и амфибол (Amf) [127].

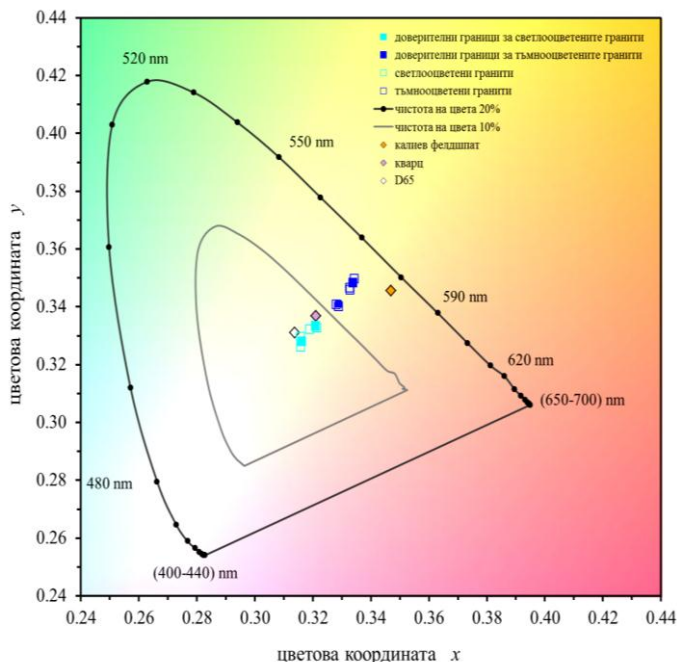


Фигура 3.28. Цветови локус с нанесени цветовете координати на изследваните гранити, кварц и фелдшпат

На **Фигура 3.28.** е представен цветовият локус, където са представени изчислените стойности на цветовете координати (x,y) на изследваните скални образци от гранити и мономинералите кварц и фелдшпат. Цветовите координати (x,y) са изчислени в спектралния диапазон (400-700) nm. Разположението им е в близост до цветовете координати (x,y) на белия и сивия цвят, което отразява реалния цвят на изследваните образци. След въвеждане на цветовете координати (x,y) за чистота на цвета 10% и 20% са получени стойности, които съответстват на получените резултати от различни автори [110,114]. Наситеността на цвета на природните обекти в повечето случаи не превишава 40%. Цветовите координати на природните обекти формират върху цветовия локус три големи общи групи [110,126] като скалите заедно с почвите и сухата растителност се концентрират в областта (575-590) nm.

Наблюдава се, че изчислените цветовите координати (x,y) на изследваните скални образци от гранити и мономинерали попадат в този диапазон. Следователно, може да се направи извода, че цветовите координати (x,y) на гранити може да се използват при разпознаване на вида скали по спектрални данни.

Цветът на гранитите варира от бял до сивочерен според съдържанието на основните за цвета скалообразуващи минерали. Чистотата на цвета по (2.16) е изчислена приблизително 10%, което отговаря на графичното представяне на резултатите.



Фигура 3.30. Цветови локус с 10% и 20% наситеност на цвета с нанесени цветовите координати и доверителните граници на изследваните светлоцветени гранити (повече от 50% светли минерали), тъмноцветени гранити (повече от 50% тъмни минерали), минералите кварц и фелдшпат

На **Фигура 3.30.** са показани цветовите координати (x,y) изследваните гранитни образци, които са групирани според съдържанието на светли- и тъмни скалообразуващи минерали, кварц и фелдшпат върху цветовия локус за 10% и 20% наситеност на цвета. Изчислени са доверителните граници за всяка група гранити (групирани според съдържанието на светлите основни скалообразуващи минерали) съответно по x (0.321,0.316) и (0.334,0.329) и по y (0.334,0.328) и (0.348,0.341). Наблюдава се добра разграничимост на двете групи гранити, чиято достоверност е проверена по Т-критерия на Стюдънт. Твърдението за достоверната различимост на двете групи се потвърждава от

T-критерия на Стюдънт, като се получават се следните резултати: $t_{\text{изч.}}$ за x и y съответно 15.7 и 9.4, което сравнено с $t_{\text{табл.}}=2.3$ ($p=0.05$) отговаря на горепосочените твърдения. Разположението им върху цветовата диаграма съответства на областта на цветността бял (сив) цвят по Кели (1943).

Отличават се координатите на оранжево-розовия фелдшпат, което намира реално отражение върху цветовия локус по отношение на областите на цветността по Кели (1943).

На **Фигура 3.30.** цветовете координати (x,y) на изучаваните гранити кореспондират с варианта на смесване на два цвята върху цветовия локус, с което практически доказват по [126], че цветовете координати (x,y) на един смесен клас от два обекта се разполагат върху правата линия, свързваща цветовете координати (x,y) на всеки отделен клас.

От получените резултати за цветовете координати (x,y) може да се направи извода, че те носят информация за реалните цветове на изследваните обекти и това може да се използва за разпознаване на вида скали по спектрални данни.

Изследването на спектралните отражателни характеристики на гранити и минерали, извършените изчисления на цветовете характеристики, получените резултати и направените изводи за приложението на цветовете характеристики на гранити за разпознаване на вида скали и за определяне на минералния им състав са представени в [публ.1, публ.3, публ.6]. Също така са докладвани на ежегодната международна научна сесия в МГУ и на ежегодния международен симпозиум “Съвременните технологии, образованието и професионалната практика в геодезията и свързаните с нея области”.

В изпълнение на поставените задачи за разпознаване на вида скали по спектрални данни от спектрометрични измервания са изследвани спектралните отражателни характеристики на следните смесени класове:

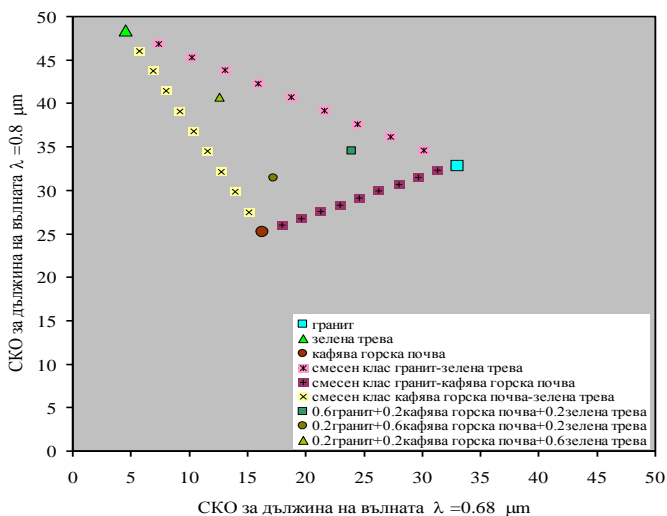
- двукомпонентен смесен клас „скала-почва”;
- двукомпонентен смесен клас „скала-растителност”;
- трикомпонентен смесен клас „скала-почва-растителност”.

Представени са резултатите от симулационното моделиране на смесени класове и направения анализ на спектралните данни по спектрален коефициент на отражение, ъгъл на наклона на спектралната отражателна характеристика и цветови характеристики.

На **Фигура 3.38.** са показани спектралните коефициенти на отражение на гранит, кафява горска почва, зелена растителност и техните 2- и 3-компонентни смеси в 2-D пространството на дължините на вълната $0.68\mu m - 0.8\mu m$. Избрани са тези дължини на вълните за изследване на спектралните отражателни характеристики на гранити, кафява горска почва, зелена растителност във връзка с изведената за каналите на Landsat TM линия на почвите. Наблюдава се, че стойностите за спектралните коефициенти на отражение на двукомпонентната спектрална смес между два чисти класа

попадат на линията, свързваща тези два класа, което се очаква при моделирани спектрални смеси. Стойностите на спектралния коефициент на отражение на трикомпонентните смеси се разполагат във формиращия триъгълник от стойностите на спектралния коефициент на отражение за чистите класове. След направен сравнителен анализ на **Фигура 3.38**. и **Фигура 3.26**. се установи, че:

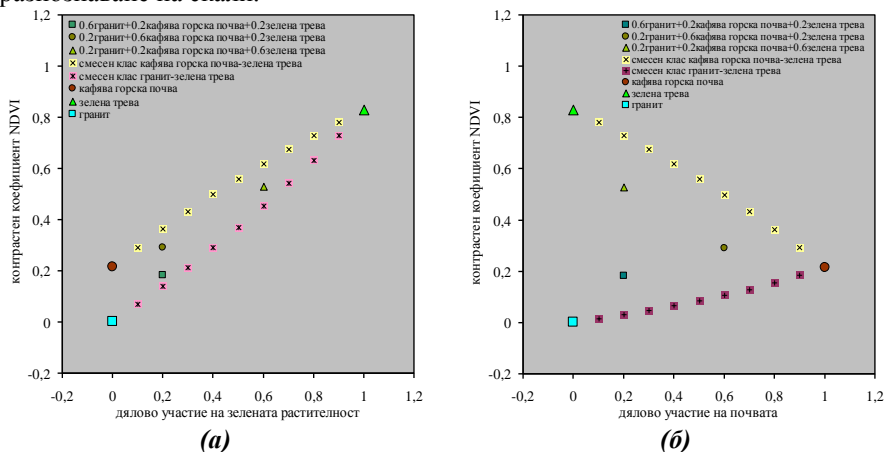
- Почвата и гранитът лежат на базовата “скално-почвена линия”, но координатите им съществено се отличават, което способства тяхната класификация.
- Местоположението на зелена растителност се определя от характерното за нея слабо отражение в червената област и високо в близката инфрачервена. То се намира извън базовата скално-почвена линия.
- Координатите на смесен клас от два класа обекти попадат на линията, свързваща съответните чисти класове, което се предполага поради линейното моделиране.
- Местоположението на смесения клас върху тази линия е пропорционално на дяла на всеки от чистите класове.



Фигура 3.38. Спектрален коефициент на отражение на гранит, кафява горска почва, зелена растителност и техни 2- и 3-компонентни спектрални смеси (0.6 гранит, 0.6 кафява горска почва, 0.6 зелена трева) в двумерното пространство от две дължини на вълните $0.68 \mu\text{m} - 0.8 \mu\text{m}$

- Координатите на смесен клас от три обекта се разполагат в триъгълника, образуван от линиите, свързващите трите чисти класа. Положението на тези точки зависи от пропорциите на участващите в смесения клас обекти.

Следователно може да се направи извода, че анализирането на спектралните данни в 2-D пространството на избрани дължини на вълната може да се използва за линейно разделяне на спектрални смеси и за разпознаване на скали.



Фигура 3.39. Връзка между контрастния коефициент *NDVI* и дяловото участие на тревата (а) и на кафявата горска почва (б) в 2- и 3-компонентните смеси от гранит, кафява горска почва и зелена трева

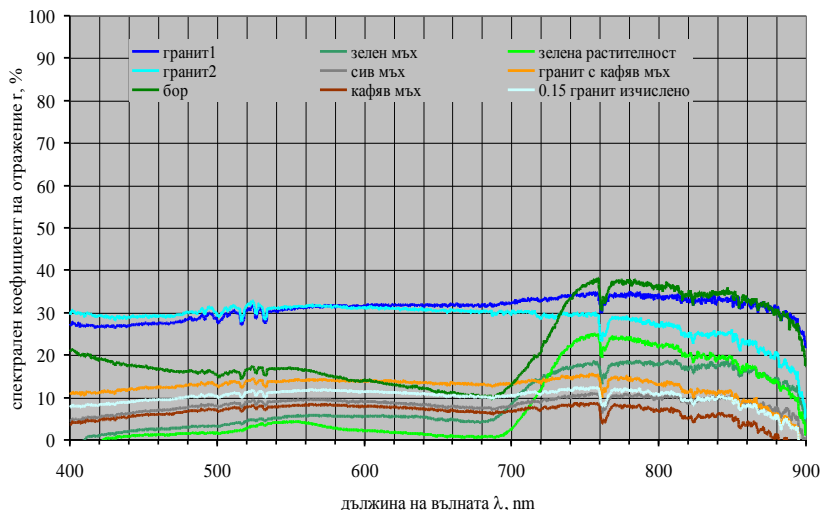
На **Фигура 3.39.** (а) и (б) е представено сравнение на промяната в стойностите на спектралния коефициент на отражение на спектралните смеси чрез *NDVI* в зависимост от дяловото участие на растителността и почвата. Стойностите на *NDVI* за трикомпонентните смеси попадат в триъгълниците, формирани от стойностите на *NDVI* за чистите класове. След направеното сравнение се установи, че това спектрално преобразуване може да се използва за определяне на промените в растителната покривка при дялово участие на почвата под 0.6.

Резултатите от прилагането на симулационното моделиране на спектралните данни в изследването на спектрални отразателни характеристики на скали, техния анализ и интерпретацията им са представени в [публ.4, публ.5] и докладвани на ежегодния симпозиум на EARSel и на ежегодната научна конференция с международно участие “Космос, екология, сигурност”.

За проверка на достоверността на получените количествени резултати за линейно разделяне на спектрални смеси и верификацията на методиката на изследванията са проведени in-situ спектрометрични измервания. При теренните спектрометрични измервания, проведени със спектрометъра TOMS, са получени следните спектрални отразателни характеристики на гранитите и съпътстващите ги обекти, които са представени на **Фигура 3.40.**

Въз основа на (2.18) е направено линейно разделяне на получените спектрални смеси за смесения клас гранит-кафяв мъх. След това е направено

възстановяване според дяловото участие на гранитите P_{gr} , което е представено на **Фигура 3.40.** (бледосиня линия $P_{gr} = 15\%$). Получените резултати показват, че използваният подход при анализа и интерпретацията на спектралните данни е правилен и може да се приложи за по-голям обем данни.



Фигура 3.40. Спектрални отразителни характеристики на гранити, мъх, зелена растителност и техни смеси от теренни спектрометрични измервания със спектрометър TOMS

За сравнителната интерпретация на спектралните данни при експерименталното изучаване на скали са проведени теренни спектрометрични измервания на гранити, почви и растителност в един от районите, от където са взети петрографските образци. Получените данни са сравнени с еталонни данни от спектрални библиотеки [52] и със спектрални данни от сензора ТМ на ресурсния спътник Landsat.

На **Фигура 3.41. (а)** са представени спектралните отразителни характеристики на вода (синя линия, отражение 2%), кафяви почви (кафява линия, отражение 2-29%), гранит (сива линия, отражение 23-33%) и на трева (зелена линия с типичен отразителен максимум при $0.55\mu\text{m}$ и $(0.76 - 0.85)\mu\text{m}$ и минимум при $0.67\mu\text{m}$), които спектри са взети от спектрална библиотека USGS [52]. Те представляват еталонни спектрални отразителни характеристики и се използват за сравнение с резултатите от теренни спектрометрични измервания. На **Фигура 3.41. (б)** са показани спектралните отразителни характеристики на гранити, кафява горска почва и зелена растителност, получени при теренните спектрометрични измервания със спектрометричната система TOMS за периода 2008-2011 г. Спектралните

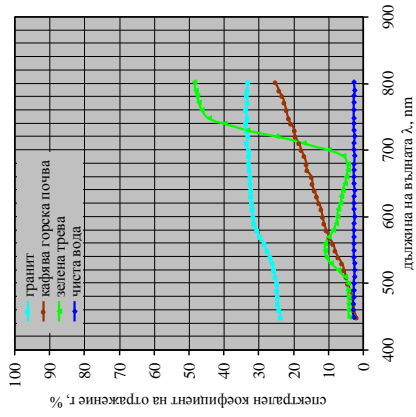
коэффициенти на отражение на гранитите и кафявата горска почва показват значителната разлика в стойностите в диапазона (0.6 – 0.8) μm . На **Фигура 3.41. (в)** е показано спектралното отражение от площта на откритката от открития рудник Медет, която включва смесения клас скали и почви. Спектралните данни се от Landsat TM за 2006 година. Избрана е 2006 година, тъй като тогава откритият рудник и откритката имат максималната площ от началото на работа на рудника до днес.

След направеното сравнение са наблюдава, че спектралните отражателни характеристики на гранити, кафява горска почва и зелена растителност от теренните спектрометрични измервания съответстват по вид на еталонните спектрални отражателни характеристики на същите обекти от спектрална библиотека USGS [52]. Следователно, получените в дисертацията спектрални отражателни характеристики на гранити от теренни спектрометрични могат да бъдат включени в спектрална библиотека на скали от територията на България.

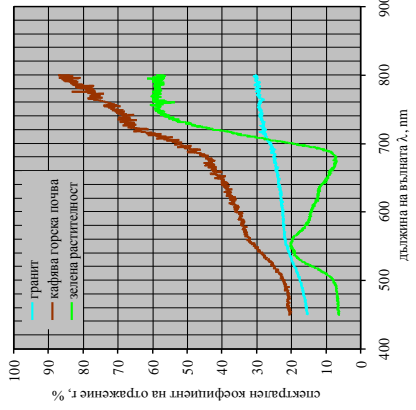
На **Фигура 3.42.** са показани спектралните отражателни характеристики на интрузивни кисели скали гранити, диорити и монзонити, получени при теренни спектрометрични измервания в Същинска Средна гора (р. Медетска), Рила (Кирилова поляна), Западна Стара планина и Витоша (Алеко). Наблюдава се, че спектралните отражателни характеристики от теренните спектрометрични измервания на трите типа скали се групират като се отличават спектралните отражателни характеристики на двата смесени класа – гранит с почва (Средногорие) и гранит с мъх (Рила).

На **Фигура 3.43.** е представена сравнителна интерпретация на тези спектри с еталонни от спектрални библиотеки.

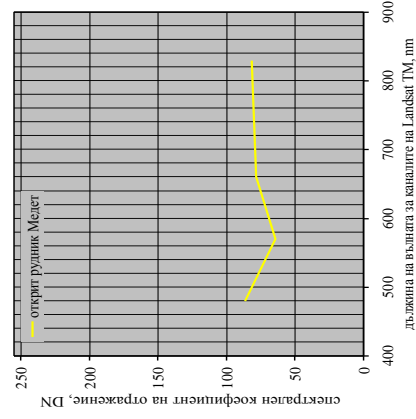
За сравнителната интерпретация на получените спектрални отражателни характеристики на гранити с еталонни такива от спектрални библиотеки са избрани гранити, които са със сходни по структура, минерално и химично съдържание образци. Спектралните отражателни характеристики от експерименталното изследване на гранити са сравнени с други спектрални отражателни характеристики, за да бъдат по-точно определени обектите на сравнителните анализи. Особено важно да се подчертае още веднъж, че данни от различни спектрометри трябва да бъдат сравнявани само когато се превърнати в критерий за сравнимост – спектрален коефициент на отражение. Такива спектрални библиотеки са в основата на сравнителните изследвания на скали от дистанционни наблюдения, включително и при сравнителната планетология.



(a)



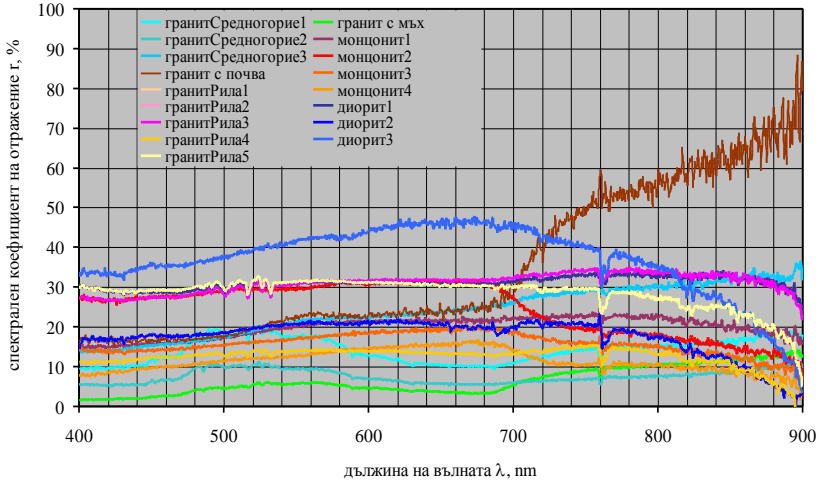
(б)



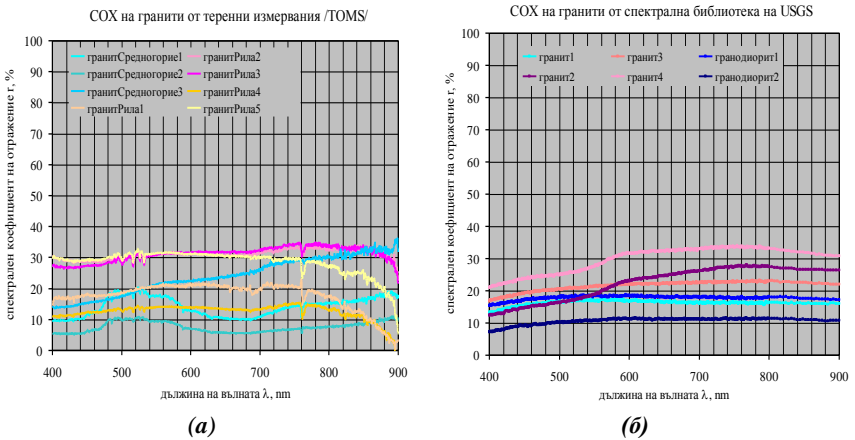
(в)

Фигура 3.41. Сравнителна интерпретация на спектрални отразителни характеристики на основни типове земно покритие в района на открития рудник Асарел-Медет: лабораторни /USGS [52]/ (а), теренни /TOMS/ (б) и спътникови /Landsat TM/ (в)

COX на интрузивни кисели скали от теренни измервания /TOMS/



Фигура 3.42. Спектрални отразителни характеристики на гранити, диорити и монцитонити от теренните спектрометрични измервания със спектрометър TOMS



Фигура 3.43. Сравнителна интерпретация на теренни (а) и еталонни [52] (б) спектрални отразителни характеристики на гранити

Резултатите от прилагането на количествения анализ на данните чрез линейно разделяне на спектрални смеси и сравнителна интерпретация на спектралните данни в експерименталното изучаване на скали са представени в [публ.5, публ.7] и докладвани на ежегодния симпозиум на EARSel и на ежегодната научна конференция с международно участие “Космос, екология, сигурност”.

3.3. Изводи към Глава 3

Определени са конкретните процедури за провеждане на лабораторни и теренни спектрометрични измервания на скали. Избрана е подходяща спектрометрична апаратура за провеждане на съответните лабораторни и теренни измервания на скали. Проведени са лабораторни и теренни спектрометрични измервания на гранити, мономинерали, почвени проби и зелена растителност. Генерирана е база данни от първични спектрални измервания за скали. Извършена е предварителна обработка на първични спектрални измервания за скали. В резултат на тази обработка са получени спектралните коефициенти на отражение на изследваните образци от скали. След анализ на получените резултати и обработката им е генерирана база данни на спектралните отражателни характеристики /спектрална библиотека/ на изследваните образци от скали.

Приноси

1. Избрани са спектрални интервали и са предложени спектрални преобразувания, които са най-подходящи за разпознаване на скални обекти по спектрални данни.
2. Предложен е контрастен коефициент за количествено определяне на разлики в спектралните отражателни характеристики на различните видове скали. Количественото определяне на контрастния коефициент е извършено на базата симулационното моделиране на спектрални смеси. Разработени са специфични спектрални преобразувания за количествено определяне на цветовите характеристики на скалите.
3. Предложена е методика за обработка и сравнителна интерпретация на спектралните данни от спектрометричните измервания на скали, която включва три етапа:
 - Обработка и сравнителен анализ на първични спектрални данни, измерени с помощта на различни спектрометри.
 - Сравнителен анализ на получените експериментални спектрални данни с еталонни такива от спектрални библиотеки.
 - Сравнителен анализ на спектралните отражателни характеристики на групите обекти: минерали, скали, почва, растителност.
4. Генерирана е база данни от първични спектрални измервания за скали на базата на получените резултати от спектрометричните измервания. След прилагане на предложената методика е създадена база данни на спектралните отражателни характеристики /спектрална библиотека/ на изследваните образци от скали.

Списък на публикациите по дисертацията

- [публ.1.] **Borisova D.** Colour coordinates of mixed class granites. *Compt. Rend. Acad. bulg. Sci.*, T.54, (11), pp.45-48, 2001. (5-year IF: 0.165)
- [публ.2.] **Borisova D.** Spectrometric measurements of granites and study of surface effects. *Annual UMG "St. Ivan Rilski"*, Part I: Geology and Geophysics, vol. 46, Sofia, Publishing House "St. Ivan Rilski", pp.327-329, 2003.
- [публ.3.] **Borisova D.** Granite reflectance spectra behaviour depends to its rock-forming minerals. *Annual UMG "St. Ivan Rilski"*, Part I: Geology and Geophysics, vol. 47, Sofia, Publishing House "St. Ivan Rilski", pp.233-236, 2004.
- [публ.4.] **Borisova D., R. Kancheva.** Rock, soil and vegetation reflectance data analysis for spectral mixture decomposition. *Proceedings of Scientific Conference with International Participation SES'2005, Book I*, Publishing House of Technical University, Sofia, pp.215-220, 2005.
- [публ.5.] **Borisova D., R. Kancheva, H. Nikolov.** Spectral mixture analysis of land covers. *Proceedings of 25th EARSeL Symposium Porto, Portugal, 2005 "Global Developments in Environmental Earth Observation from Space"*, Millpress, Rotterdam, pp.509-516, 2006.
- [публ.6.] **Борисова Д.** Спектрален метод за разпознаване на магмени скали. XXII Международен симпозиум "Съвременните технологии, образованието и професионалната практика в геодезията и свързаните с нея области", София, 33.pdf, ISBN 978-80-87159-29-3, 2012.
- [публ.7.] **Борисова Д.** Теренни спектрометрични изследвания на скали. *Proceedings of Eighth Scientific Conference with International Participation "Space, Ecology, Safety" (SES'2012)*, Sofia, стр. 322-327, 2013.

Списък на използваната литература в автореферата

- [3] Дистанционно зондирование: количественный подход. (1983), под ред. Ф. Свейн и Ш. Дейвис, М., Недра, 415
- [4] Dengsheng Lu, M. Batistella, E. Moran, (2002) Linear spectral mixture analysis of TM data for land-use and land-cover classification in Rondônia, Brazilian Amazon. vol.XXXIV, Part 4, ISPRS Commission IV, Symposium Geospatial Theory, Processing and Applications, <http://www.isprs.org/proceedings/XXXIV/part4/pdppapers/175.pdf>
- [5] Clark R., T. Roush, (1984) Reflectance spectroscopy: quantitative analysis techniques for remote sensing applications. *Journal of Geophysical Research*, 89, 6329-6340
- [9] Мишев Д., (1981) Дистанционни изследвания на Земята от Космоса. Издателство на БАН, София, 208
- [12] Slater P., (1980) *Remote Sensing, Optics and Optical Systems*. Massachusetts, Addison-Wesley Educational Publishers Inc., 592
- [13] Schaepman M., (1998) Calibration and characterization of a non-imaging field spectroradiometer supporting imaging spectrometer validation and hyperspectral sensor modelling. *University of Zurich (CH), Faculty of Sciences, Remote Sensing Series Vol. 31*, 145
- [16] Clark R., G. Swayze, A. Gallagher, T. King, W. Calvin, (1993) The U. S. Geological Survey, Digital Spectral Library: Version 1: 0.2 to 3.0 microns. U.S. Geological Survey Open File Report, vol.93, 1340
- [17] Clark R., (1999) Spectroscopy of rocks and minerals and principles of spectroscopy. In: *Manual of Remote Sensing*, (A.N. Rencz, ed.) John Wiley and Sons, New York, 3-58
- [18] Clark R., G. Swayze, A. Gallagher, T. King, W. Calvin, (2003) The U. S. G. S., Digital Spectral Library Ver. 05: Version 1: 0.2 to 3.0 um. U. S. Geol. Survey, Open File Report 03-395
- [19] Morris R., H. Lauer et al., (1985) Spectral and other physicochemical properties of submicron powders of hematite, maghemite, maghemite, goethite, and lepidochrosite. *Journal of Geophysical Research*, 90, 3126-3144
- [20] Elvidge C., R. Lyon, (1985) Influence of rock-soil spectral variation on the assessment of green biomass. *Remote Sensing of Environment*, 17 (3), 265-279
- [21] Spiridonov H., A. Krumov, K. Katzkov, S. Yovchev, (1980) Measurement results and conclusions on the spectral reflective coefficients of volcanites, granitoides and gneisses. *Remote Sensing and Mineral Exploration*, Pergamon Press, Oxford and New York, 157-163
- [22] Spiridonov H., A. Krumov, K. Katzkov, S. Yovchev, (1983) Measurement results and conclusions on the spectral reflectance coefficients of volcanites, granitoides and gneisses. *Space Research in Bulgaria*, 4, 59-69
- [23] Frazier B., Y. Cheng, (1989) Remote sensing of soils in the eastern Palouse region with Landsat TM. *Remote Sensing of Environment*, 28, 317-325
- [24] Georgiev G., R. Kancheva, (1995) Linear approximation of soil spectral reflection. *Soil sci., agrochem. & ecol.*, vol.XXX (1-6), 16-20
- [25] Neilman J., W. Boyd, (1986) Soil background effects on the spectral response of a three-component rangeland scene. *Remote Sensing of Environment*, 19, 127-137
- [26] Спиридонов Х., Л. Миленова, Е. Руменина, (1984) Определение спектральных отражательных характеристик некоторых типов почв, распространенных в Северной Болгарии. Сб. статей ИГ ЧСАН, 2, 61-65
- [27] Спиридонов Х., Р. Кынчева, (1984) Основные факторы динамики свойство отражения почвеного покрова. Сб. статей ИГ ЧСАН, 2, 75-79
- [28] Нильсон Т., Х. Роосталу, Ю. Кыдар, Ю. Росс, (1988) О корреляционной связи урожая зерна с коэффициентами спектральной яркости в различных фазах развития ячменя. Исследование Земли из космоса, №3, 67-73
- [29] Huete A., (1988) A soil-adjusted vegetation index (SAVI). *Remote Sensing of Environ.*, 25, 295-309
- [30] Васильев Л., Л. Ванечкова и др., (1988) Численные методы изучения почв и растительности по дистанционным данным. Сб. статей ИГ ЧСАН, 17, 169-263.
- [31] Kancheva R., (2003) Main principles in vegetation spectrometric studies. *Annual of the UMG "St. Iv. Rilski"*, Part I: Geology and Geophysics, Sofia, Publishing House "St. Ivan Rilski", 46, 387-390
- [32] Козодеров В., Сажина Л., (1983) Учет неизотропности отражения объектов земной поверхности в задаче радиационной коррекции космических изображений. Методы обработки и

тематического анализа многозональной аэрокосмической видеoinформации. Л., Гидрометеиздат

[33] Verhoef W., (1984) Light scattering by leaf layers with application to canopy reflectance modelling: the SAIL model. *Remote Sensing of Environment*, 16 (2), 125-141

[34] Painter T., D. Roberts, R. Green, J. Dozier, (1998) The effect of grain size on spectral mixture analysis of snow-covered area from AVIRIS data. *Remote Sensing of Environment*, 65(3), 320-332

[35] Кондратьев К., Федченко П., (1982) Спектральная отражательная способность и распознавание растительности. Л., Гидрометеиздат, 216

[36] Miguel-Ayaz J., G. Biging, (1997) Comparison of single-stage and multi-stage classification approaches for cover type mapping with TM and SPOT data. *Remote Sensing of Environment*, 59, 92-104

[37] Beisl U., (2001) Correction of bidirectional effects in imaging spectrometer data. University of Zurich (CH), Faculty of Sciences, Remote Sensing Series, Vol. 37, 180

[38] Schopfer J., (2008) Spectrodirectional ground-based remote sensing using dual-view goniometry. University of Zurich (CH), Faculty of Sciences, Remote Sensing Series, Vol. 53, 93

[39] Swayze G., R. Clark, A. Goetz, T. Chrien, N. Gorelick, (2003) Effects of spectrometer band pass, sampling, and signal-to-noise ratio on spectral identification using the Tetracorder algorithm. *J. Geoph. Research (Planets)*, 108 (E9), 5105

[40] Clark R., G. Swayze, K. Livo, R. Kokaly, S. Sutley, J. Dalton, R. McDougal, C. Gent, (2003) Imaging spectroscopy: Earth and planetary remote sensing with the USGS Tetracorder and expert systems. *J. Geophys. Res.*, 108(E12), 5131

[46] Crowley J., (1986) Visible and Near-Infrared spectra of carbonate rocks: Reflectance variations related to petrographic texture and impurities. *Journal of Geophysical Research*, 91 (B5), 5001-5012

[47] Мардиросян Г., (2003) Аэрокосмические методы в экологии и изучаются на околнута среда. Част I. София, Академично издателство "Проф. Марин Дринов", 208

[48] Kimes D., (1983) Dynamics of directional reflectance factor distribution for vegetation canopies. *Applied Optics*, vol.22, 1364-1372

[51] Bell III J., (1996) Iron, sulfate, and hydrated minerals on Mars, In *Mineral Spectroscopy: A tribute to Roger Burns*, Geochemical Society, Special Publication 5, 359-380

[52] Clark R., G. Swayze, R. Wise, E. Livo, T. Hoefen, R. Kokaly, S. Sutley, (2007) USGS digital spectral library splib06a: U.S. Geological Survey, Digital Data Series 231, <http://speclab.cr.usgs.gov/spectral.lib06>

[53] Swayze G., R. Clark, S. Sutley, A. Gallagher, (1992) Ground-truthing AVIRIS mineral mapping at Cuprite, Nevada. AVIRIS workshop, vol.1, JPL publication 92-14, 47-49

[54] Gaffey S., (1987) Spectral reflectance of carbonate minerals in the visible and near infrared (0.35-2.55 μm): Anhydrous carbonate minerals. *Journal of Geophysical Research*, 92, 1429-1440

[55] King T., R. Clark, (1989) Spectral characteristics of chlorites and Mg-serpentes using high-resolution reflectance spectroscopy. *Journal of Geophysical Research-Solid Earth and Planets*, 94 (B10) 13997-14008

[56] Clark R., T. King, M. Klejwa, G. Swayze, N Vergo, (1990) High spectral resolution reflectance spectroscopy of minerals. *Journal of Geophysical Research*, 95 (B-8), 12653-12680

[57] Моралев В., К. Чешихина, (1989) Спектральная отражательная способность "черных сланцев" и возможность их распознавания на аэрокосмических изображениях. *Исследования Земли из космоса*, 6, 84-87

[58] Усманов Ф., Е. Рахимова, (1994) Распознавание горных пород по спектральной яркости на многозональных космических снимках. *Исследования Земли из космоса*, 2, 109-118

[59] Усманов Ф., Е. Рахимова, (1993) Моделирование спектров яркости горных пород как объектов дистанционной съемки в видимой и ближней инфракрасной области спектра. *Исследования Земли из космоса*, 3, 47-57

[60] Zhang J., B. Rivard, A. Sanchez-Azofeifa, (2004) Spectral unmixing of normalized reflectance data for the deconvolution of lichen and rock mixtures. *Remote Sensing of Environment*, 95(1), 57-66

[61] Keshava N., (2003) A survey of spectral unmixing algorithms. *MIT Lincoln Laboratory, Lincoln Laboratory Journal*, 14 (1), 55-78

[62] Huete A., (1986) Separation of soil-plant spectral mixtures by factor analysis. *Remote Sensing of Environment*, 19 (3), 237-251

- [63] Rowan L., J. Salisbury, M. Kingston, N. Vergo, N. Bostick, (1991) Evaluation of visible, near-infrared and thermal-infrared reflectance spectra for studying thermal alteration of Pierre shale, Wolcott, Colorado. *Journal of Geophysical Research*, 96 (B11), 18047-18057
- [64] Sunshine M., C. Pieters, (1998) Determining the composition of olivine from reflectance spectroscopy. *Journal of Geophysical Research-Planets*, 103 (E6), 13675-13688
- [65] Malley D., L. Yesmin, D. Wray, S. Edwards, (1999) Application of near-infrared spectroscopy in analysis of soil mineral nutrients. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 30 (7-8), 999-1012
- [66] Суйн Ф., (1985) Перспективные методы интерпретации для геоинформационных систем, ТИИЭР, т.73, 6, 93-102
- [67] Гушин Г., (1988) Методы, приборы и результаты измерения спектральной прозрачности атмосферы. Л., Гидрометеоздат, 200
- [68] Тарасов К., (1988) Светосильные спектральные приборы, М., Наука, 262
- [69] Мишев Д., Т. Добрев, Л. Гугов, (1987) Дистанционные методы в геофизиката и геологията. София, Техника, 272
- [70] Avanesov G., B. Bonev, F. Kempe, A. Bazilevsky, V. Boycheva, K. Chilkov, M. Danz, D. Dimitrov, T. Duzbury, P. Gramatikov, D. Halmann, J. Head, V. Heifets, V. Kolev, V. Kostenko, V. Kottsov, V. Krasavtsev, V. Krasikov, A. Krumov, A. Kuzmin, K. Losev, K. Lumme, D. Mishev, D. Möhlmann, K. Muinonen, V. Muravaev, S. Murchie, B. Murray, W. Neumann, L. Paul, D. Petkov, I. Petuchova, W. Pössel, B. Rebel, Yu. Shkuratov, S. Simeonov, B. Smith, A. Totev, Yu. Uzunov, V. Fedotov, G.-G. Weide, H. Zapfe, B. Zhukov, Ya. L. Ziman, (1989) Television observations of Phobos. *Nature*, 341, 585 – 587
- [71] Slater P., (1985) Survey of multispectral imaging systems for Earth observations. *Remote Sensing of Environment*, 17, 85-102
- [72] Мишев Д., С. Ковачев, (1983) Многозональная спектрометрическая система "Спектр-15М". Научное космическое приборостроение, М., Металлургия, вып.2, 15-21
- [73] Vane G., R. Green, T. Chrein, H. Enmark, E. Hansen, W. Porter, (1993) The airborne visible/infrared imaging spectrometer (AVIRIS). *Remote Sensing of Environment*, 44, 127-143
- [74] Елизаренко А., В. Соломатин, Ю. Якушков, (1984) Оптико-электронные системы в исследованиях природных ресурсов. Москва, Недра, 215
- [77] <http://edc.usgs.gov/products/satellite/tm.html>
- [78] Атанасов В., Б. Пеев, Н. Василев, В. Василев, (2000) Спектрална и пространствена разделителна способност на модел на видеоспектрометър. Седма национална конференция с международно участие "Съвременни проблеми на слънчево-земните въздействия", София, Сборник доклади, 151-154
- [79] *Handbook of optics*. (1995) Editor in chief: Michael Bass, McGraw-Hill Inc., USA, ISBN 0-07-047740-X
- [80] Скоков И., (1984) Оптические спектральные приборы. Москва, Машиностроение, 239
- [81] <http://science.nasa.gov/missions/moms/>
- [82] <http://suzaku.eorc.jaxa.jp/GLI2/adeos/Project/Avnir.html>
- [83] Mishev D., S. Kovachev, D. Petkov, (1989) Multichannel spectrometric system "Spectrum 256" for manned space objects. *Proceedings of the International Conference OPTICS '89, Varna*, 100-102
- [84] http://pds.nasa.gov/ds-view/pds/viewInstrumentProfile.jsp?INSTRUMENT_ID=SIRS&INSTRUMENT_HOST_ID=FEXP
- [85] Taranik J., A. Crosta, (1996) Remote sensing for geology and mineral resources, an assessment of tools for geoscientists in the future. *Int. archives of photogrammetry and remote sensing*, vol.XXXI, part B7, Vienna, 689-698
- [86] <http://asterweb.jpl.nasa.gov/instrument.asp>
- [87] <http://oceanoptics.com/>
- [88] Baldrige A., S. Hook, C. Grove, G. Rivera, (2009) The ASTER Spectral Library Version 2.0. *Remote Sensing of Environment*, 113, 711-715
- [89] <https://earthdata.nasa.gov/data/standards-and-references/nasa-earth-system-science-remote-sensors>
- [90] Кънчева Р., (1999) Оценка на състоянието на системата почва-растителност чрез използване на спектрометрични данни. Дисертация, София, 138

- [91] Илиев И., (2000) Спектрометрична система за слънчеви и атмосферни изследвания. Електротехника и електроника, 3-4, 43-47
- [92] Илиев И., (2000) Многоканални спектрометрични дистанционни изследвания на Слънцето и земната атмосфера. Дисертация, София, 140
- [93] Petkov D., H. Nikolov, G. Georgiev, (2005) Thematically Oriented Multichannel Spectrometer (TOMS). Aerospace Research in Bulgaria, 20, 51-54
- [94] Petkov D., A. Krumov, H. Nikolov, G. Georgiev, (2005) Multichannel nadir spectrometer for thematically oriented remote sensing investigations. Proceed. of SES 2005, Varna, 227-231.
- [97] Mishev D., (1991) Spectral characteristics of mixed classes of natural formations. Acta Astronautica, 25 (8/9), 443-446
- [98] Напке В., (1993) Introduction to the theory of reflectance and emission spectroscopy. Cambridge University Press, New York, 278
- [99] Painter T., J. Dozier (2004) The effect of anisotropic reflectance on imaging spectroscopy of snow properties. Remote Sensing of Environment, 89, 409-422
- [101] Чимитдоржиев Т., В.Ефременко, (1998) Об използването на различни индекси на вегетация в дистанционното зондирование на екосистемите. Иссл. Земли из космоса, 3, 49-56
- [104] Kancheva R., D. Mishev, (2000) Colorimetric characteristics for detection of plant chlorophyll variations. Comptes Rendus de l'Academie Bulgare des Sciences, 53 (4), 43-46
- [105] Mishev D., R. Kancheva, (1997) Color modeling of vegetation reflectance spectra for detection of chlorophyll concentration changes, Proceed. of 48-th Congress of the International Astronautical Federation, Turin, Italy, IAF-97-B.6.07
- [106] Escadafal R., M. Courault, (1989) Munsell soil color and soil reflectance in the visible spectral bands of Landsat MSS and TM data. Remote Sensing of Environment, 27, 37-46
- [107] Maticalli N., (1997) Soil color modeling for the visible and near-infrared bands of Landsat sensors using laboratory spectral measurements. Remote Sensing of Environment, 59, 14-28
- [108] Yanev T., D. Mishev, (1993) Probability density functions of color coordinates, Compt.Rend.Acad.bulg.Sci., 46 (11), 37-39
- [109] Kancheva R., (1997) Relationship between vegetation biophysical and colorimetric characteristics. Compt.Rend.Acad.bulg.Sci., 50 (7-8), 21-24
- [110] Mishev D., (1992) Colour coordinates of a mixed class. Compt. Rend. Acad. bulg. Sci., 45 (5), 51-54
- [113] Джадд Д., Г. Выщецкий, (1978) Цвет в науке и технике, Москва, Мир, 1978, 592
- [114] Mishev D., (1986) Spectral characteristics of natural objects. Sofia, Publ. House Bulg. Acad. of Sci., 192
- [119] Mishev D., A. Krumov, D. Petkov, B. Tsenov, S. Zhivkov, (1985) New generation of spectrometers for measurement of spectral reflective characteristics. Acta Astronautica, 12 (11), 973-975
- [120] Blom R., M. Abrams, G. Adams, (1980) Spectral reflectance and discrimination of plutonic rocks in the 0.45- to 2.45- μ m region. J. Geophys. Res., 85(B5), 2638-2648
- [122] Liang S., (2004) Quantitative remote sensing of land surfaces. John Wiley and Sons, 534
- [123] Hüni A., M. Kneubühler, (2007) SPECCHIO: a system for storing and sharing spectroradiometer data. SPIE Newsroom, online at <http://spie.org/x18220.xml>
- [124] Atanassov V., G. Jeleв, (2004) Algorithm for dark current characterization of imaging spectrometer. Aerospace Research in Bulgaria, 19, 77-83
- [125] Atanassov V., G. Jeleв, L. Kraleva, (2005) Imaging spectrometer data correction. Scientific Conference with International Participation "Space, Ecology, Safety – SES'2005", Varna, Bulgaria, Conference Proceedings, Book 1, 221-226
- [126] Карманов И., (1974) Спектральная отражающая способность и цвет почв, как показатели их свойств. Москва, Колос, 352
- [127] Стойнов С., С. Белев, (1976) Минералогия, петрография и полезни ископаеми-част I, С., Техника, 248
- [139] Ramsey M., P. Christensen, (1998) Mineral abundance determination: Quantitative deconvolution of thermal emission spectra. Journal of Geophysical Research: Solid Earth, 103(B1), 577-596
- [141] Ohno Y., (2000) CIE fundamentals for color measurements. Paper for IS&T NIP16 Conference, Vancouver, Canada, Oct. 16-20, 2000, 1-4
- [144] Мишев Д., (1985) Дистанционные исследования Земли из космоса. М., Мир, 150