

## СПЕКТРАЛНИ ОТРАЖАТЕЛНИ ХАРАКТЕРИСТИКИ НА МАГМЕНИ И МЕТАМОРФНИ СКАЛИ ВЪВ ВИДИМАТА И БЛИЗКАТА ИНФРАЧЕРВЕНА ОБЛАСТИ

Д. Крежова

Централна лаборатория по слънчево-  
земни въздействия (ЦЛСЗВ)  
Българска академия на науките  
София 1113, България

К. Величкова

Минно-геоложки университет  
"Св. Иван Рилски"  
София 1700, България

С. Приставова

Минно-геоложки университет  
"Св. Иван Рилски"  
София 1700, България

### РЕЗЮМЕ

Изследването на отразената от природните образувания слънчева радиация във видимата и близката инфрачервена (ИЧ) области на електромагнитния спектър и на настъпващите изменения в спектралното ѝ разпределение под влияние на различни фактори на околната среда е метод за аерокосмически и наземни дистанционни изследвания, който намира широко приложение в геологията, приложната геофизика, екологията и др. В работата са представени резултати от проведени изследвания на спектралните отражателни характеристики (СОХ) на скални образувания (магмени и метаморфни скали) с различен генезис и химичен състав и контрастни минерални компоненти в спектралния диапазон  $480 \div 810$  nm. Спектралните данни са получени с многоканалната спектрометрична система "Спектър 256", разработена в ЦЛСЗВ – БАН и използвана дълги години на пилотираната космическа станция "Мир". В лабораторни условия са изследвани СОХ на образци от ултрамафични (пироксенити) и базични (габро) магмени скали, гранитоиди (гранити, алкални гранити) и регионалнометаморфни скали – серпентинити, гнайси, гранатови амфиболити и кианитови шисти. Въз основа на спектралните данни и приложени статистически методи е изследвана и текстурата на някои скални видове и са идентифицирани подкласове обекти в рамките на общия спектрален клас в съответствие с минералния им състав.

### ВЪВЕДЕНИЕ

Спектрометричните измервания на отразената от природните образувания радиация във видимата и близката ИЧ области на електромагнитния спектър предоставят експресна и достоверна информация за целите на космическите и наземните дистанционни изследвания и за редица области на науката (геология, приложна геофизика, екология и др.). Спектралните данни, при високи спектрална и пространствена разделителна способности на използваната апаратура, дават възможност да се осъществи разпознаване на основни класове обекти, идентификация на техни разновидности и състояния, както и да се установи наличие на подкласове обекти в рамките на един спектрален клас.

Едно от приложенията на данните от дистанционните изследвания на природни обекти е опознаване на геоложки структури и образувания. Още с появата на космическите снимки и разработването на методи за използването им, разделянето на взаимосвързаните дешифровъчни признаци на геоложките обекти (преки, обуславящи се от излъчването на самите обекти и косвени, свързани със съответните особености на ландшафта) е извършвано в зависимост от поставяната геоложка задача (Трифонов и Шульц, 1986; Моралев и Чехихина, 1989; Wood and Lasserre, 1990; Salisbury *et al.*, 1992). Принципно значение има разделянето на дешифровъчните признаци на оптични и геометрични, тъй като методиката на използването им при разпознаване на геоложки образувания е различна. Оптичните спектрални признаци са най-информативни и характеризират яркостта на излъчването от повърхността на геоложките

образувания по спектъра на електромагнитните вълни. Геометричните признаци характеризират структурата и текстурата на пространственото разпределение на сигнали с различна яркост и при опознаване на геоложките образувания не е от значение дали те се проявяват като преки или косвени.

В зависимост от задачите на конкретно провежданите експерименти, наземните (лабораторни и полеви) дистанционни изследвания са много разнообразни, но се обособяват в две основни групи. Една част от тях е ориентирана към установяване на качествени връзки между параметрите на природните обекти и явления с информацията, която дават за тях аерокосмическите дистанционни изследвания. Друга част е насочена към изследване на взаимовръзката между различните компоненти и състояния на обектите и явленията и факторите, които им влияят. Данните от наземните спектрометрични измервания във видимата и ИЧ области на спектъра показват, че спектралните характеристики на елементарните природни обекти са строго индивидуални. Те бързо могат да бъдат обработени и идентифицирани и това определя водещото им място в общата стратегия на опознаване на природни обекти по данни от космически измервания (Mishev *et al.*, 1989; Salisbury and D'Aria, 1994; Мишев *и др.*, 1999). Поради това знанието на СОХ на характерни обекти от земната повърхност (почви, скали, вода, горска и селскостопанска растителност и др.) има основно значение за правилната интерпретация на данните от дистанционните изследвания.

Целта на настоящата работа е да се представят резултатите от изследвания в лабораторни условия на спек-

тралните отражателни характеристики на различни скални образувания във видимата и близката ИЧ области на електромагнитния спектър, както и тяхната приложимост за разпознаване на основни видове скали и техни разновидности с различен минерален състав.

## МАТЕРИАЛИ И МЕТОДИ

### Петрографска характеристика на изследваните скални образци

Обект на нашите изследвания са представителни скални образци от магмени и метаморфни скали. Спектрометрични измервания са проведени на пет основни вида магмени и четири вида метаморфни скали с различен генезис и химичен състав и контрастни минерални компоненти.

**Магмени скали:** Скалните образци от магмени скали принадлежат към пет главни класификационни групи: ултрамафични скали (пироксенит); базични скали (габро); среднобазични скали (диорит); кисели скали (гранит) и алкални скали (алкален гранодиорит).

*Пироксенитът* е едрозърнеста скала с масивна текстура и с тъмнозелен до черен цвят. Изграден е главно от пироксен (до 90%). Малко участие в скалата се пада на единични зърна оливин и рудни минерали.

*Габрото* (Фигура 1) е среднозърнеста скала с масивна текстура, тъмносивозелена на цвят. Главните скалообразуващи минерали са базичен плагиоклаз и амфибол в съотношение 1:2, което определя макроскопски мезократния характер на скалата и класифицирането ѝ като амфиболово габро.



Фигура 1. Спектрометрирана повърхност на габро

*Диоритът* е със средно- до дребнозърнеста структура, тъмносиво-зеленикав на цвят с масивна, на места такситова текстура. Единични епидотови прожилки процепват образеца. Минералният му състав е: главни скалообразуващи минерали - среден плагиоклаз и амфибол (до 90%); второстепенни минерали – единични зърна, главно от пироксен, биотит и кварц. Цветният индекс (М) на скалата е около 40 ÷ 45 %.

*Гранитът* е неравномернозърнест (дребно- до среднозърнест), светлосив на цвят с масивна текстура и минерален състав: главни скалообразуващи минерали - кисел плагиоклаз, калиев фелдшпат, кварц и биотит, и второстепенен минерал - амфибол. Поради неравномернозърнестия характер на гранита са проведени спектрометрични измервания на два образеца – единият, с дребнозърнеста структура, а другият с по-едрозърнеста до пегматитободобна структура, като и в двата фемичната компонента е бедна и индексът М е до 7% и могат да се определят като левкогранити.

*Алкален гранодиорит* - тъмно оцветена червено-розова скала с масивна текстура на места с петнист характер. Минерален състав: калиев фелдшпат (главно), кисел плагиоклаз, кварц, биотит, амфибол.

**Метаморфни скали:** Изследвани са образци на регионалнометаморфните скали: серпентинит, гнайс, амфиболит и кианитов шист.

*Серпентинит (метаултрамафит)* - сивозелена на цвят плътна скала, изградена от минерали от серпентиновата група, хлорит, талк, рудни минерали и спорадични реликти от оливин и пироксен. Повърхнината, на която са провеждани измерванията е изградена предимно от талк-хлорит-серпентинови продукти.

*Амфиболит (метабазит)* - тъмнозелен, дребнозърнест, с масивна до неясноивичеста на места текстура и минерален състав: амфибол (60 ÷ 65%), гранат (до 5%), кисел плагиоклаз (20%), кварц, епидот и титанит. Макроскопски ясно е видим порфиروبластичният характер на граната.

*Гнайс (метагранит)* - биотитов гнайс с очно-ивичеста текстура и минерален състав: биотит, плагиоклаз, кварц (главни скалообразуващи минерали) и мусковит и калиев фелдшпат (второстепенни минерали). Скалата е с ясни белези на тектонска обработка и притежава на места белези на бластомилонитизация.

*Кианитов шист (метапелит)* - дребнозърнеста, розово-кафеникава на цвят фино шистозна скала с минерален състав – кианит (променен в серицит-мусковит), биотит, гранат и кварц. Скалата притежава силно изразена минерална линейност и порфиروبластна структура по минерала кианит. Измерени са два образеца – повърхността на първия (Фигура 2) е шистозна с кианитови порфиروبласти, а на втория е пукнатинна и кианитовите порфиروبласти отсъстват.

### Спектрометрични измервания на скалните образци – апаратура и методика

Измерванията на СОХ на скалните образци са проведени с многоканалната спектрометрична система "Спектър 256", разработена от учени и специалисти на ЦЛСЗВ – БАН във връзка с изпълнение на научната програма за полета на втория български космонавт и работила повече от 12 години на пилотираната орбитална космическа станция "Мир" (Mishev and Kovachev, 1888; Mishev et al., 1990). Конструктивно системата се състои от два блока –

спектрометричен и блок за регистрация на данните. В спектрометричния блок е монтиран фотоапарат, който е свързан оптически с него и работи в автоматичен режим. Чрез фотоапарата се осъществява привръзка на регистрираните спектрални данни с изследваните обекти.



Фигура. 2. Спектрометрирана повърхност на кианитов шист (образец 1)

Измерванията със системата “Спектър 256” в лабораторни условия се извършват на специализиран стенд, в състава на който освен системата участват оптична скамейка, оптична масичка, еталонен бял екран, подвижна платформа за поставяне на изследваните скални образци, светлинен източник с висока стабилност (три халогенни лампи и стабилизирани захранващи устройства на лампите). Белият екран е диск с диаметър 32 см, покрит с бариев сулфат, и има линейна спектрална характеристика във видимата и близката ИЧ области на спектъра. На оптичната масичка се поставя спектрометричния блок на системата, така че оптичната му ос да е хоризонтална, с възможност за финно и плавно преместване по осите X и Y, за да се осъществява сканиране на изследваните обекти. Белият екран и изследваните повърхности на скалните образци се разполагат перпендикулярно на оптичната ос на обектива на многоканалния спектрометър.

Спектрометричните измервания на скалните образци са проведени в режим на работа на системата “Спектър 256” 128 спектрални канала с полуширина на всеки един от тях 2.6 nm и пространствена разделителна способност 2 mm<sup>2</sup>. За една секунда с нея се регистрират 40 спектъра в спектралния диапазон 480 ÷ 810 nm.

Методиката за провеждане на измерванията включва: определяне на оптималните условия на осветяване на изследваните образци, така че регистрираната отразена радиация да има достатъчно висок динамичен диапазон в работния спектрален диапазон; определяне на оптималната площ от пробите за провеждане на спектрометричните измервания; определяне на минималния брой площи (пиксели), които е необходимо да се спектрометрира, така че получените СОХ с достатъчна достоверност да определят средната СОХ на обекта, разглеждан като спектрален клас.

Въз основа на предварителни експериментални изследвания ние проведехме измерванията на скалните образци в средно 25 ÷ 30 точки (пиксела) в зависимост от текстурата им, следващи непосредствено една след друга в хоризонтално направление. За всеки скален образец са регистрирани данни за: тъмнинен ток; отразената от изследваната площ радиация в определен брой пиксели; отразената от дифузен бял екран радиация и са определени спектралните коефициенти на отражение (СКО). За всяка спектрометрирана площ са регистрирани средно по 60 спектъра, а за белия екран и тъмнинния ток по 120.

Всеки природен обект отразява специфично падналата върху него радиация и това обуславя информативността на функцията на изменение на спектралната плътност на енергетичната яркост в абсолютни единици или на СКО - в относителни единици. Тези величини са многофакторни фотометрични функции, които зависят от физикохимичните и биологичните свойства на обектите.

Спектралният коефициент на отражение характеризира структурата на разсеяната от елементите на повърхността на природното образуване радиация, както по дължина на вълната, така и в зависимост от условията на осветяване. При условия на осветяване ( $\theta_0, \varphi_0$ ), в направление на регистриращата система ( $\theta, \varphi$ ) и обхват на дължините на вълните  $\lambda_i, \lambda_i + \Delta\lambda$ , СКО се определя от отношението

$$r(\lambda_i, \theta_0, \varphi_0, \theta, \varphi) = L(\lambda_i, \theta, \varphi) / L_0(\lambda_i, \theta_0, \varphi_0), \quad (1)$$

където:  $L(\lambda_i, \theta, \varphi)$  е спектралната плътност на енергетичната яркост на даден обект в направление ( $\theta, \varphi$ ) за дължина на вълната  $\lambda_i$ ;  $L_0(\lambda_i, \theta_0, \varphi_0)$  е спектралната плътност на енергетичната яркост на ортотропна напълно отразяваща повърхност, намираща се при същите условия на осветяване.

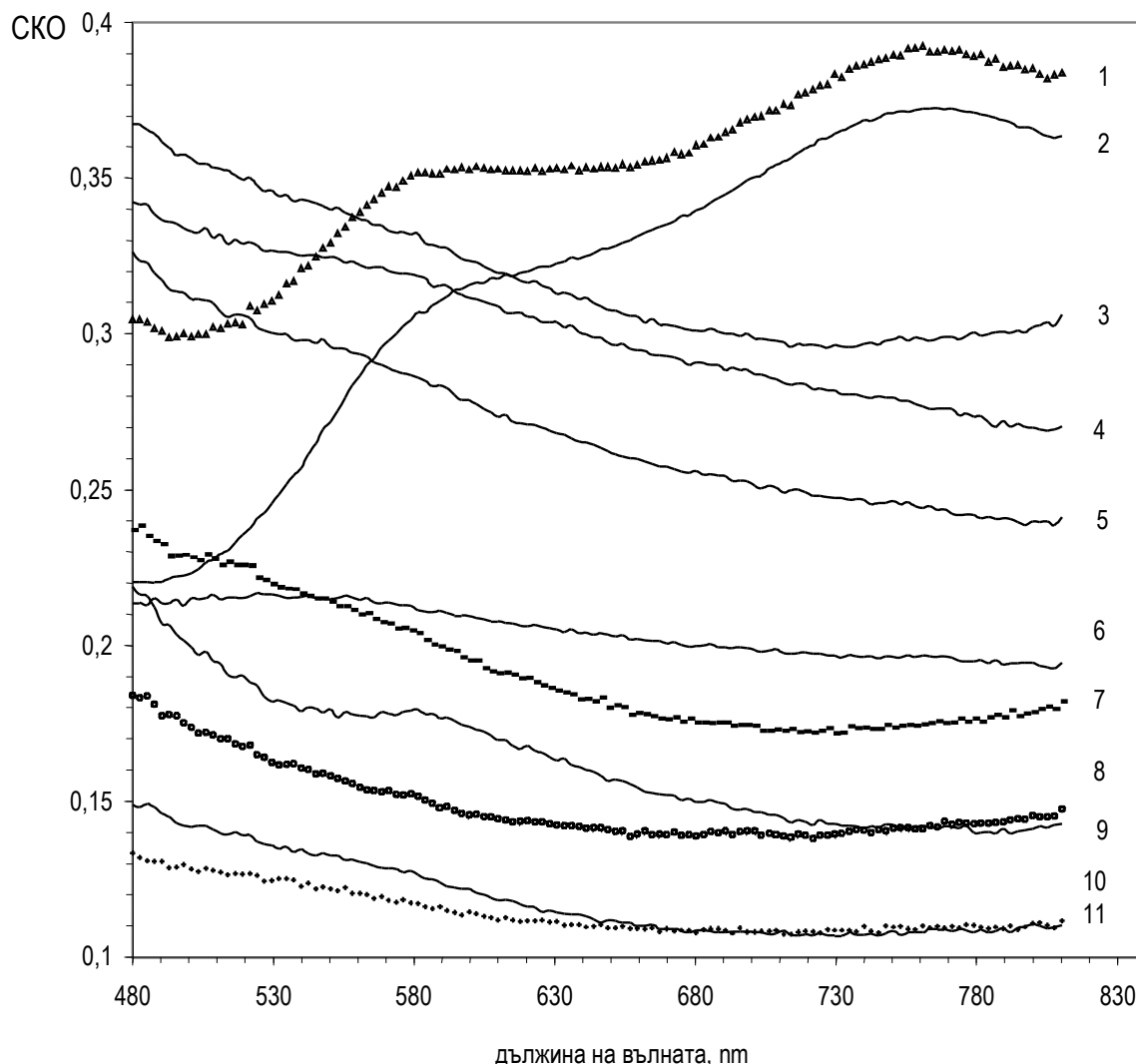
За определяне на СКО, регистрираните данни от системата “Спектър 256” се подлагат на предварителна обработка, включваща: осредняване на данните от една спектрометрирана площ, отчитане на тъмнинния ток, осредняване на данните за еталонния екран, осредняване на данните от всички спектрометрирани площи на един скален образец.

## РЕЗУЛТАТИ И ДИСКУСИЯ

На Фигура 3 са показани получените осреднени СОХ на изследваните повърхности на 11 скални образци. Могат да се отделят три ясно изразени групи СОХ. Най-голямата група обединява магмени скали с ултрабазичен (пироксенит), базичен (габро) и среднобазичен (диорит) състав и една базична метаморфна скала (амфиболит). Най-ниски стойности на СКО имат амфиболита (крива 10) и пироксенита (крива 11). Тези скали са най-тъмни на цвят и имат масивна текстура. Изградени са от различни фемични минерали, което се проявява в различията на

стойностите на СКО в спектралния диапазон 480 ÷ 650 нм. Този извод се потвърждава също от резултата на корелационния анализ, проведен за осреднените СОХ на

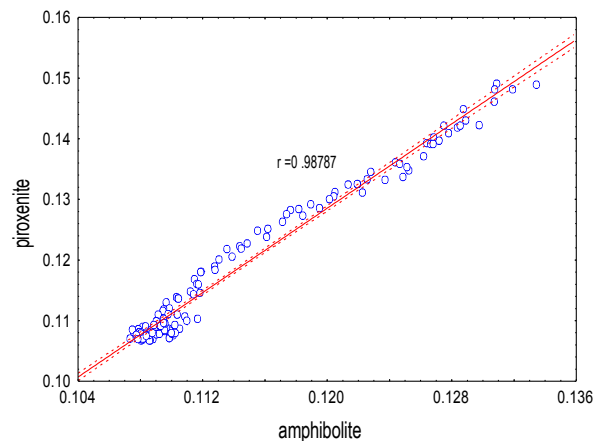
тези два скални образца. Фигура 4 илюстрира ниска степен на корелация в част от спектралния диапазон.



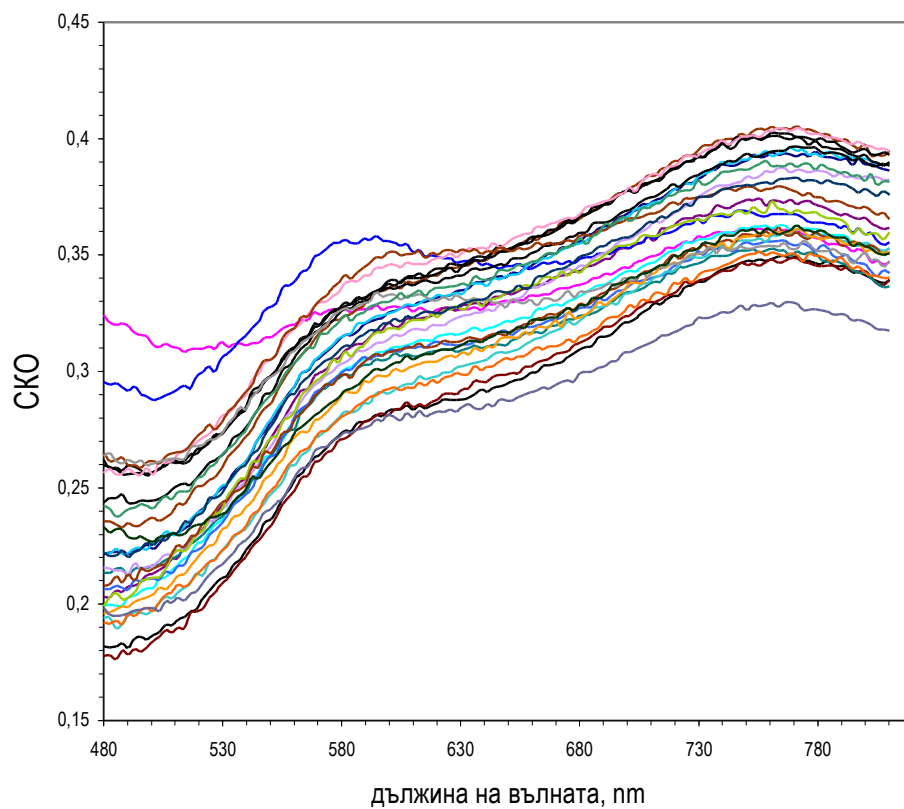
Фигура 3. Осреднени СОХ на скалните образци: 1) кианитов шист (образец 1); 2) кианитов шист (образец 2); 3) гнайс; 4) гранит (образец 1); 5) гранит (образец 2); 6) габро; 7) серпентинит; 8) диорит; 9) алкален гранодиорит; 10) амфиболит; 11) пироксенит

Осреднените СОХ на серпентинита (крива 7) и диорита (крива 8) имат приблизително еднакъв ход с разлика в стойностите на СКО  $\approx 0.07$  относителни единици в целия изследван спектрален диапазон. Осреднената СОХ (крива 6) на спектрометрираната площ от повърхността на габрото, показана на Фигура 1, има плавен ход и най-високи стойности за тази група спектрални характеристики в изследвания диапазон. Интересно е и поведението на хода на СОХ на алкалния гранодиорит (крива 9). Осреднените стойности на СКО на спектралната му характеристика имат най-голям динамичен диапазон (0.15 ÷ 0.23 относителни единици).

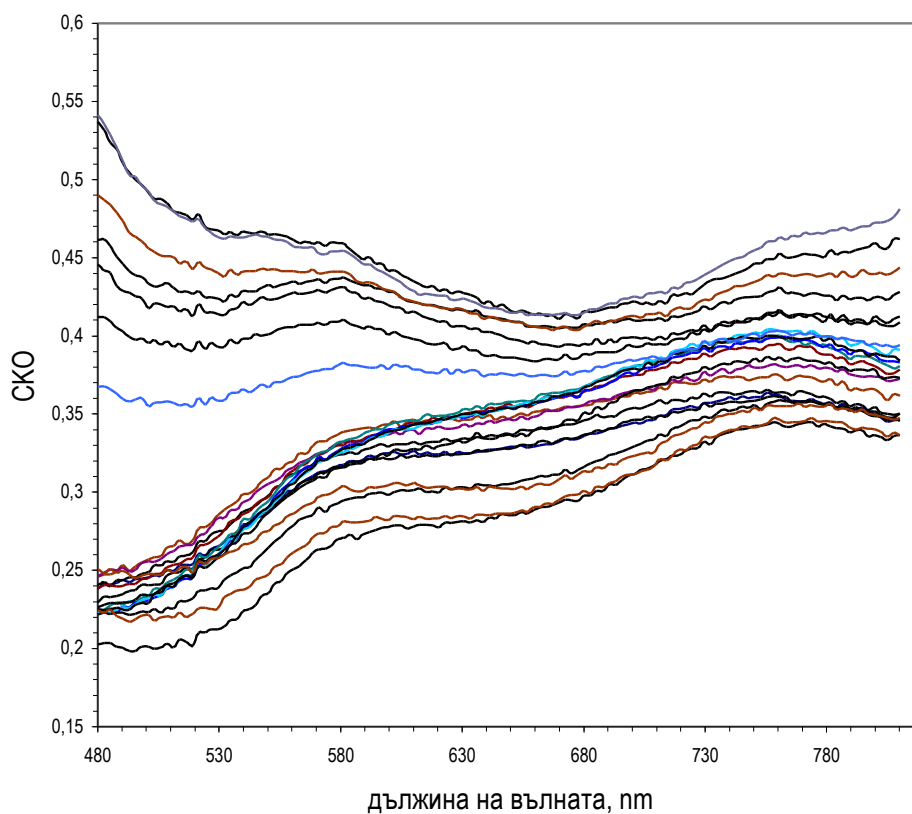
Втората група СОХ обединява гранитите (криви 4 и 5) и гнайс (крива 3), който е метаморфозирал гранит. Различната отражателна способност на изследваните повърхности на двата гранита отразява разликата в тяхната структура (едро и дребно зърнеста) и различното процентно участие на фемични и рудни минерали.



Фигура 4. Корелационен анализ на СОХ на амфиболит и пироксенит

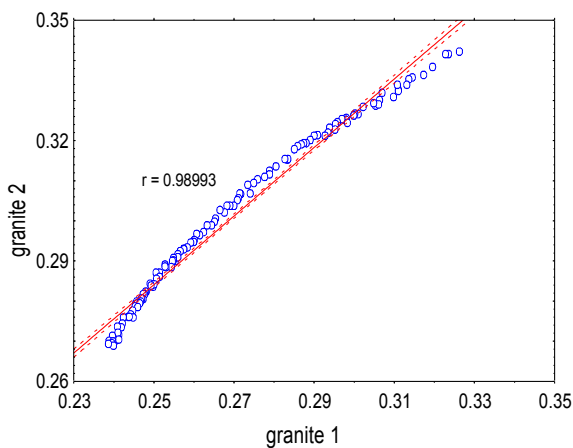


Фигура 5. Осреднени СОХ на спектрометрираните площи на кианитов шист (образец 1)



Фигура 6. Осреднени СОХ на спектрометрираните площи на кианитов шист (образец 2)

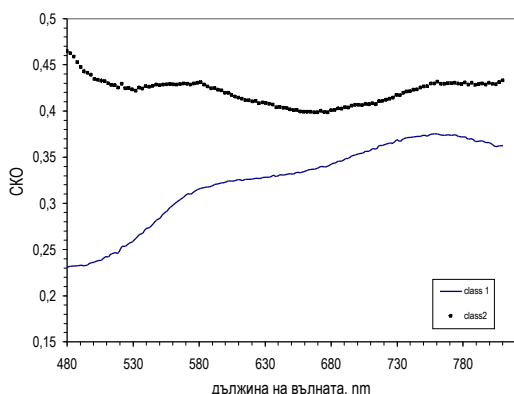




Фигура 7. Корелационен анализ на СОХ на два гранита

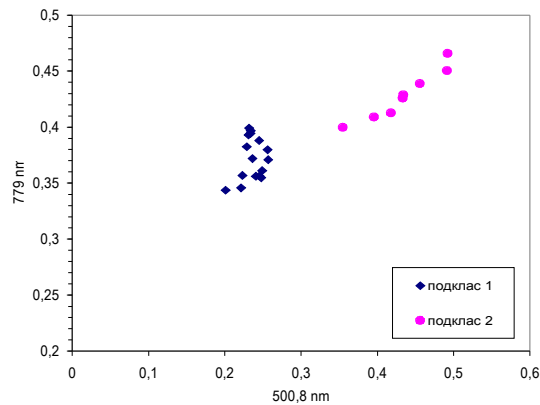
Корелационният анализ на осреднените СОХ на двата образеца гранит потвърждава сходството в състава им, независимо от неравномерността на зърната. Това се илюстрира на Фигура 7.

В третата група попадат кианитовите шисти (крива 1 и 2 на Фигура 3). Двете осреднени СОХ имат еднакъв ход. Изследваната повърхност на единия образец (крива 1) е шистозна със съдържание на едри сивосини на цвят кристали от кианит и нейната отражателна способност е по-висока от тази на повърхността на втория образец, където кристали на кианит отсъстват. На Фигура 5 са показани осреднените СОХ на 27 изследвани площи, измерени по пукнатинна плоскост на втория образец. СОХ формират един спектрален клас. На Фигура 6 са представени осреднените от 25 площи СОХ на образец 1 на кианитовия шист. Спектралните характеристики ясно се разграничават в два спектрални подкласа. Те отразяват разликата в текстурата на повърхността, дължаща се съответно на кианитовите порфиروبласти и дребнозърнестата кварц-биотитова маса. На Фигура 8 са показани осреднените СОХ на двата подкласа, а Фигура 9 илюстрира резултатите от проведения клъстерен анализ на СОХ на двата подкласа за дължини на вълните 500 nm и 779 nm.



Фигура 8. Осреднени СОХ на двата подкласа на образец 1 на кианитовия шист

Препоръчана за публикуване от катедра "Приложна геофизика", ГПФ



Фигура 9. Клъстерен анализ на двата подкласа на образец 1 на кианитовия шист

В заключение ще отбележим, че спектралните отражателни характеристики на изследваните скални образувания дават информация за текстурните им особености и допълват базата данни от наземни дистанционни изследвания, необходима за провеждане на аерокосмически геоложки проучвания по спектрални дешифровъчни признаци.

#### ЛИТЕРАТУРА

- Мишев, Д., С. Ковачев, Т. Янев, Д. Крежова. 1999. Многоканалната спектрометрична система "Спектър 256" на борда на станцията "МИР" и след това. – В: Сб. Доклади "10 години космически проект Шипка". 1988. ИКИ-БАН, С., 104-111.
- Моралев, В., К. Чешихина. 1989. Спектрална отражателна способност "Черных сланцев" и възможност их распознавания на аерокосмических изображениях. – *Исследование Земли из Космоса*, 6, 84-87.
- Трифонов, В., С. Шульц. 1986. Особенности геологического применения космической информации. – *Исследование Земли из Космоса*, 1, 32-42.
- Mishev, D., S. Kovachev. 1988. Multichannel Spectrometric System "Spectrum 256" on Board of "Mir" Station. - *39th Congress IAF, India, Bangalore, IAF, 88-115*, 1-4.
- Mishev, D., S. Kovachev, D. Krezhova, Yu. Uzunov. 1989. Images and analysis of data obtained by Spectrum 256' Under the Program 'Georesource'. – *40th Congress IAF, Malaga, IAF, 89-167*, 1-5.
- Mishev, D. N., S. T. Kovachev, D. D. Krezhova. 1990. New Generation of Space Multichannel Spectrometric Systems. – *Compt. Rend. Acad. Bulg. Sci.*, 43, 1, 53-56.
- Salisbury J., D. D'Aria. 1994. Emissivity of terrestrial materials in the 3-5  $\mu\text{m}$  atmospheric window. – *Remote Sens. Environ.*, 47, 345-361.
- Salisbury J., L. Walter, N. Vergo, D. D'Aria. 1992. *Mid Infrared Spectra of Minerals*. John Hopkins University Press, Baltimore, 296 p.
- Wood, J., M. Lasserre, G. Fedosejevs. 1990. Analysis of mid-infrared spectral characteristics of rock outcrops and an evaluation of the Kahle Model in predicting outcrop thermal inertia. – *Remote Sens. Environ.*, 30, 345-361.

# SPECTRAL REFLECTANCE OF MAGMATIC AND METAMORPHIC ROCKS IN THE VISIBLE AND NEAR INFRARED RANGES

**D. Krezhova**

Solar Terrestrial Influences Laboratory (STIL)  
Bulgarian Academy of Sciences  
Acad. G. Bonchev Str., Bl. 3  
Sofia 1113, Bulgaria

**K. Velichkova**

University of Mining and Geology  
"St Ivan Rilski"  
Sofia 1700, Bulgaria

**S. Pristavova**

University of Mining and Geology  
"St Ivan Rilski"  
Sofia 1700, Bulgaria

## ABSTRACT

The investigation of reflected by natural formations solar radiation within the visible and near infrared ranges (NIR) of the electromagnetic spectrum and occurring changes in its spectral distribution under the action of various environmental factors is a well established technique for aerospace and ground remote sensing, which finds broad areas of application in geology, applied geophysics, ecology and others. In this report we present results from investigations of the spectral reflectance characteristics (SRC) of rock formations (magmatic and metamorphic rocks) with different genesis and chemical composition and contrasting mineral constituents in the spectral range 480 ÷ 810 nm. The spectral data were obtained using the multichannel spectrometric system 'Spectrum 256' developed in STIL-B.A.S., which has been operated for many years onboard the manned orbital space station 'MIR'. The studies of SRC were carried out under laboratory conditions on samples of ultramafic (pyroxenite) and basic (gabbro) magmatic rocks, granitoids (granites, alkaline type granites) as well as regional metamorphic rocks – serpentinite, gneiss, garnet bearing amphibolite and kyanite schist. On the basis of the spectral data and implemented statistical methods the texture of the rock types was analysed and for some of them there were identified spectral subclass objects belonging to a common spectral class in accordance with their mineral composition.

## INTRODUCTION

The spectrometric measurements of reflected by natural formations solar radiation in the visible and near infrared (NIR) ranges of the electromagnetic spectrum provide an express and reliable information for the objectives of cosmic and ground remote sensing and for various areas of science (geology, applied geology, ecology, etc.). At a high spectral and spatial resolution featured by the apparatus in use, the spectral data provide for the possibility to recognise main classes of objects, to identify their diversity and states, and to establish the presence of subclasses of objects within the frames of a single spectral class.

One of the applications of data from remote sensing of natural objects is the recognition of geological structures and formations. Already with coming into light of the aerocosmic photos and emerging methods for their usage, the interrelated decoding indications of the geological objects were separated into direct, involving the radiation of the objects themselves, and indirect, related to corresponding salient features of landscape. This was done on the basis of the geological objectives formulated (Trifonov and Schulz, 1986; Moralev and Cheschihina, 1989; Wood and Laserre, 1990; Salisbury *et al.*, 1992). The division of the decoding indications into optical and geometrical is of basic importance, because of differences in the methods applied for their use for recognition of geological formations. The optical spectral signs are most informative and characterise the brightness of radiation from the surface of the geological formations in the electromagnetic spectrum. The geometrical signs characterise the structure and the texture of the spatial distribution of signals with different brightness and in the recognition of geological formations it is of no importance if they manifest themselves as direct or indirect.

Depending upon the objectives to be achieved by the particular experiments being carried out, there is a variety of the ground (laboratory and field) remote sensing investigations but two main groups could be specified. A part of them is oriented to ascertain qualitative relationships between the parameters of the natural formations and phenomena on one

side and the information provided for the latter by the aerospace remote sensing on the other side. Another part is aimed to reveal the mutual relation between the different components and states of the objects and phenomena, and the factors which exert an influence upon them. The laboratory spectrometric measurements in the visible and NIR spectral ranges show that the spectral characteristics of the elementary natural species are strictly individual (Mishev *et al.*, 1989; Salisbury and D'Aria, 1994; Mishev *et al.* 1999). They can easily be subjected to treatment and identified which determines their leading place in the general strategy for recognition of natural formations based on data from aerospace measurements. Because of this, the knowledge of SRC of particular characteristic objects located on the Earth's surface (soils, rocks, water, forest and agricultural vegetation, etc.) is of primary importance for the correct and accurate interpretation of the data from remote sensing.

The aim of the present work is to report on results from laboratory investigations of spectral reflectance characteristics of different rock formations in the visible and near infrared ranges of the electromagnetic spectrum and their applicability for recognition of main types of rocks and their variety by texture and mineral composition.

## MATERIALS AND METHODS

### **Petrographic characteristic of the rock specimens under investigation**

The objects under study in the present report are representative specimens of magmatic and metamorphic rocks. The spectrometric measurements were carried out on five basic types of magmatic and four types of metamorphic rocks with different genesis and chemical composition and contrasting mineral constituents.



**Magmatic rocks:** The rock specimens of magmatic rocks belonged to five main classification groups: ultramafic rocks (pyroxenite); basic rocks (gabbro); mediumbasic rocks (diorite); acidic rocks (granite) and alkaline rocks (alkaline granite-diorite).

*Pyroxenite* is a coarse-grained rock of massive texture and coloured in dark green to black. It was built mainly of pyroxene (up to 90%). Small portions in the rock were single grains of olivine and ore minerals.

*Gabbro* (Figure 1) is a medium-grained rock of massive texture, dark greyish-green of colour. The basic rock forming minerals were plagioclase and amphibole in a ratio of 1 : 2, which determines macroscopically the mesocratic character of the rock and its classification as amphibolic gabbro.



Figure 1. The measured surface of gabbro

*Diorite* is with a medium up to fine-grained structure, dark greyish-green coloured, with a massive, locally taxite texture. Single epidote veins cut the specimen. Its mineral composition is of primary rock forming minerals – medium plagioclase and amphibole (up to 90%), and minority minerals – single grains, mainly of pyroxene, biotite and quartz. The colour index (M) of the rock was of about 40 ÷ 45 %.

*Granite* is an unevenly grained (fine to medium-grained), light grey of colour, with a massive texture and a mineral composition of primary rock forming minerals – acidic plagioclase, K - feldspar, quartz and biotite, and minority minerals - amphibole. Because of the unevenly grained character of the granite the spectrometric measurements were performed on two specimens poor in the femic component with an index M up to 7%, and both cases could be specified as leucogranites. The first specimen was with a fine-grained structure, while the second one featured a more coarse-grained up to pegmatite-like texture.

*Alkaline granodiorite* – dark-coloured reddish-rose rock with a massive texture of locally spotted character. Mineral composition: K-feldspar (main), acidic plagioclase, quartz, biotite, amphibole.

**Metamorphic rocks:** Specimens of regional metamorphic rocks were studied, as follows: serpentinite, amphibolite, gneiss, and kyanite schist.

*Serpentinite (metaultramaphit)* – a greyish-green of colour dense rock built of minerals from the serpentinite group, chlorite, talc, ore minerals, and sporadic relicts of olivine and pyroxene. The surface upon which the measurements were taken was textured mainly of talc-chlorite-serpentinite products.

*Amphibolite (metabasit)* – dark green, fine-grained, with a massive up to locally unclear stripe texture, and mineral composition: amphibole (60 ÷ 65%), garnet (up to 5%), acidic plagioclase (20%), quartz, epidote, and titanate. Macroscopically, the porphyroblastic character of the garnet was clearly visible.

*Gneiss (metagranite)* – biotite gneiss with an augen-layered texture and mineral composition: plagioclase, quartz (primary rock forming minerals), and muscovite and K-feldspar (minority minerals). The rock is with clear signs of tectonic treatment and features local indications of blastomylonitisation.

*Kyanite schist (metapellite)* – fine-grained rose-brownish of colour schistose rock with a mineral composition of kyanite (modified into sericite-muscovite), biotite, granite, and quartz. The rock exhibits a strong mineral linearity and a porphyroblastic texture by the mineral kyanite. Two specimens were measured with surfaces of different texture. The surface of the first one (Figure 2) is schistose and with presence of kyanitic porphyroblasts, whereas the surface of the other specimen is pronouncedly cracked and with lacking kyanite porphyroblasts.

#### **Spectrometric measurements of the rock specimens – experimental set up and methods**

The SRC of the rock specimens studied were measured using the multichannel spectrometric system 'Spectrum 256'. This system was developed by scientists and specialists of STIL – BAS in connection with the implementation of the scientific program of the second Bulgarian cosmonaut, and for more than 12 years was operated successfully onboard the manned orbital space station 'MIR' (Mishev and Kovachev, 1988; Mishev *et al*, 1990). 'Spectrum 256' consists of two blocks - a spectrometric block and a block for data registration. The spectrometric block contains a built-in photographic camera, which is optically linked to it and is operating in an automatic mode. By means of this photo camera it is achieved the link between the spectral data recorded and the objects under study.

For the measurements under laboratory conditions it was used a special experimental set up. Besides the multichannel spectrometric system it incorporates an optical bench, an optical table, a standard white screen, a movable platform for fixing and adjustment of the specimens, and a light source of high stability (three halogen lamps each one energised by an individual regulated power supply). The white screen is a disk with a diameter of 32 cm, covered with barium sulphate, and featuring linear spectral characteristics in the visible and NIR spectral ranges. The spectrometric system MS is fixed with horizontally aligned optical axis on the optical table which allows for fine and smooth displacement about X and Y axes in order to realise the scanning of the studied objects. The white screen and the investigated surface of the rock specimens are

adjusted perpendicular to the optical axis of the objective of 'Spectrum 256'.



Figure 2. The measured surface of kyanite schist (Specimen 1)

The spectrometric measurements of rock specimens were carried out with 'Spectrum 256' used in an operational mode with 128 spectral channels, each of 2.6 nm halfwidth at a spatial resolution of 2 mm<sup>2</sup>. Each second the system is recording 40 spectra in the spectral range 480 ÷ 810 nm.

The measuring method includes: determination of the optimum conditions for illumination of the specimen studied, so that the recorded reflected radiation to possess a sufficiently high dynamic range in the visible and NIR spectral ranges; determination of the optimum area of the specimens for carrying out the spectrometric measurements; determination of the minimum number of areas (pixels), which is necessary to be spectrally measured, so that the SRCs obtained to yield with a sufficiently high reliability the averaged SRC of the object, considered as being a spectral class.

Based on preliminary experiments we have carried out the measurements of the rock specimens under study in 25-30 points (pixels) on average in dependence on the particular texture, chosen adjacent in the horizontal direction. For every rock specimen there are recorded the dark current; the reflected radiation by the investigated area within a given number of pixels; the reflected radiation by the diffuse white screen, and the spectral reflectivity coefficients are determined. For each spectrally measured area there are recorded by 60 spectra on average, and for the white screen and the dark current - by 120.

Every natural object reflects in a specific way the incident upon it radiation, and this determines to be informative the radiance in absolute units or the spectral reflectivity coefficient in relative units. These quantities are multiple-factor photometric functions, being dependent of physical and chemical properties and biological properties of the objects.

The spectral reflectivity coefficient  $r(\lambda_i, \theta_o, \varphi_o, \theta, \varphi)$  characterises the structure of the reflected by the natural

formation radiation by both wavelength and conditions of illumination. Under conditions of illumination  $(\theta_o, \varphi_o)$ , in the direction of the recording system  $(\theta, \varphi)$  and range of wavelengths  $\lambda_i, \lambda_i + \Delta\lambda$ , the spectral reflectivity coefficient is determined by

$$r(\lambda_i, \theta_o, \varphi_o, \theta, \varphi) = L(\lambda_i, \theta, \varphi) / L_o(\lambda_i, \theta_o, \varphi_o), \quad (1)$$

where  $L(\lambda_i, \theta, \varphi)$  is the radiance of a given object in direction  $(\theta, \varphi)$  at wavelength  $\lambda_i$ ,  $L_o(\lambda_i, \theta_o, \varphi_o)$  is the radiance of an orthotropic fully reflecting surface under identical conditions of illumination.

For determination of the spectral reflectivity coefficients the spectral data recorded by the system 'Spectrum 256' are subjected to a preliminary treatment. It includes averaging of the data of one area spectrally measured, accounting for the dark current, averaging of the data of the standard screen, averaging of the data of all areas being spectrally measured for each rock specimen.

## RESULTS AND DISCUSSION

Figure 3 shows the averaged SRCs obtained for the investigated surfaces of the 11 rock specimens. Three clearly displayed groups of SRC can be separated. The most numerous group brings together magmatic rocks with ultrabasic (pyroxenite), basic (gabbro) and medium basic (diorite) constitution and one basic metamorphic rock (amphibolite). The lowest values of the spectral reflection coefficient are associated with the specimens of amphibolite (curve 10) and pyroxenite (curve 11). These rocks are the darkest of colour and feature a massive texture. They are built of various femic minerals, which is manifested by the differences in the spectral reflection coefficient values in the spectral range 480 ÷ 650 nm. This conclusion is confirmed also by the result from the correlation analysis of the averaged SRC of these two rock specimens. Figure 4 illustrates the low degree of correlation in a part of the spectral range.

The averaged SRC curves of the serpentine (curve 7) and diorite (curve 8) exhibit a roughly similar course with a difference in the value of SRC of about 0.07 relative units in the whole spectral range studied. The averaged SRC (curve 6) of the measured area from the surface of gabbro shown in Figure 1 has a rather smooth behaviour and for that group of SRC reaches the highest values. A special note deserves the behaviour of SRC of the alkaline granodiorite (curve 9). It is of particular interest because the averaged spectral reflection coefficient values of this group of spectral characteristics is featuring the highest dynamic range, 0.15 ÷ 0.23 relative units.

The second group of SRC comprises the granites (curves 4 and 5) and gneiss (curve 3), the latter being a metamorphosed granite. The difference in the reflection power of the surface of the two granites studied is related with their different texture (coarse or fine-grained) and the different proportion of femic and ore minerals.

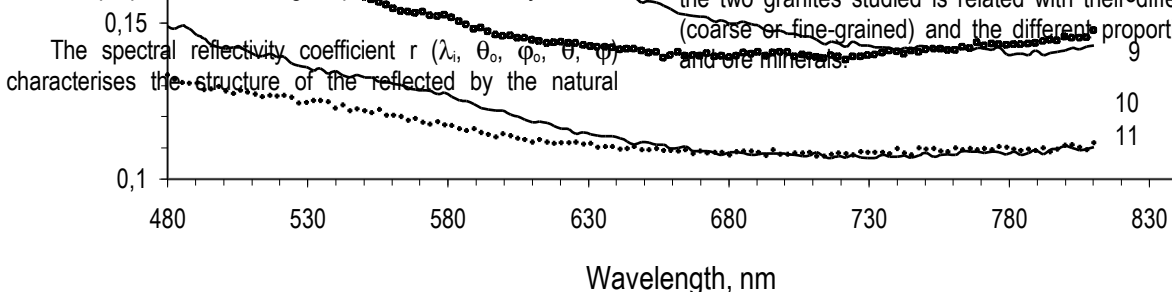


Figure 3. Average SRC of the rock specimens: 1) kyanite schist (specimen 1); 2) kyanite schist (specimen 2); 3) gneiss; 4) granite (specimen1); 5) granite (specimen2); 6) gabbro; 7) serpentinite; 8) diorite; 9) alkaline gneiss; 10) amphibolite; 11) pyroxenite

The correlation analysis of the averaged SRCs of the two specimens of granite confirmed the similarity of their constitution, irrespectively of the uneven grain size. This is illustrated in Figure 7.

In the third group of SRC fall the kyanite schist's (curves 1, and 2). The two averaged SRCs have a roughly identical behaviour. The surface of one of the specimens was schistose with presence of large greyish-blue crystals of kyanite and its reflective power is higher (curve 1) than that (curve 2) of the surface of the other representative of this type of rocks where crystals of kyanite were absent. Figure 5 shows the averaged SRC of 27 studied areas, measured on the cracked surface of the second specimen. The spectral reflectance characteristics form a single spectral class. Figure 6 displays the averaged SRC of 25 areas of sample 1 of the kyanite schist. The spectral characteristics are clearly differentiated into two spectral subclasses. Their presence reflects the differences in the texture of the surfaces due to the kyanite porphyroblasts and the fine-grained quartz-biotite body, respectively.

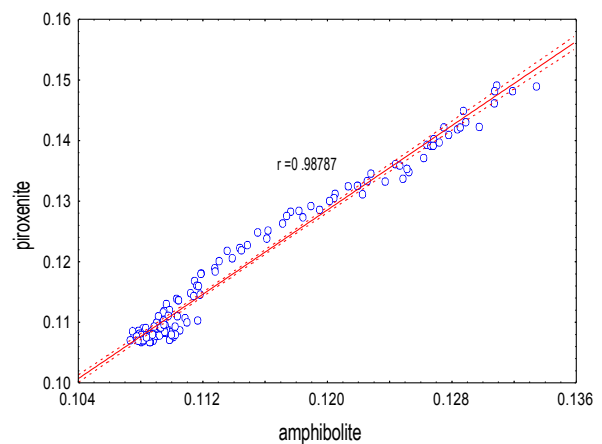


Figure 4. Correlation analysis of SRC of amphibolite and pyroxenite

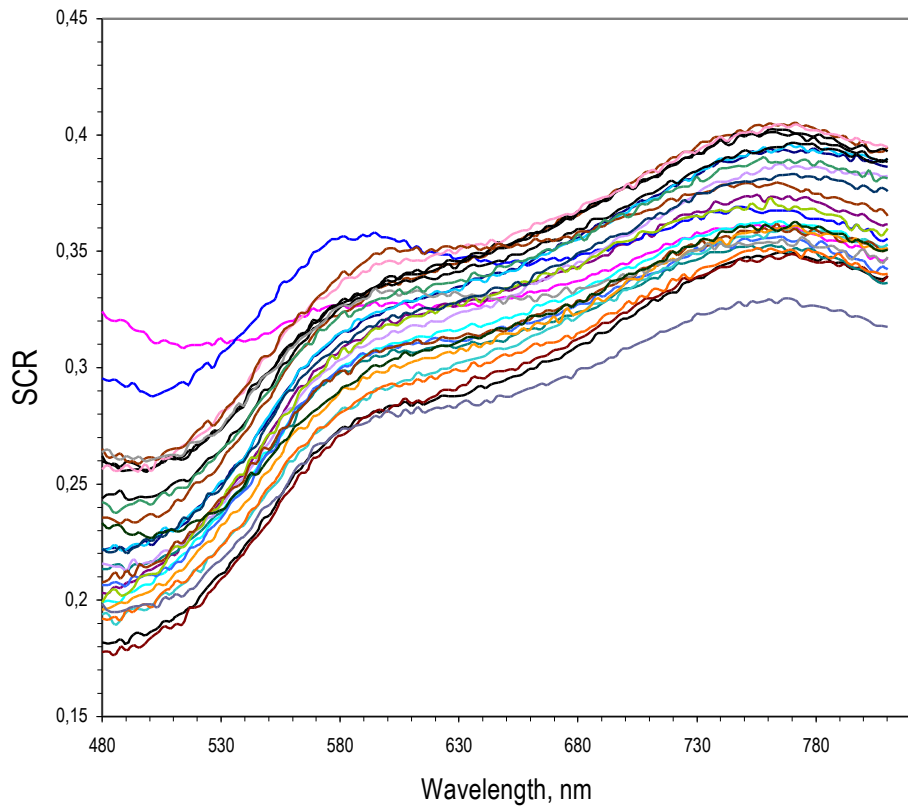


Figure 5. Averaged SRC of the measured areas of the kyanite schist (specimen 2)

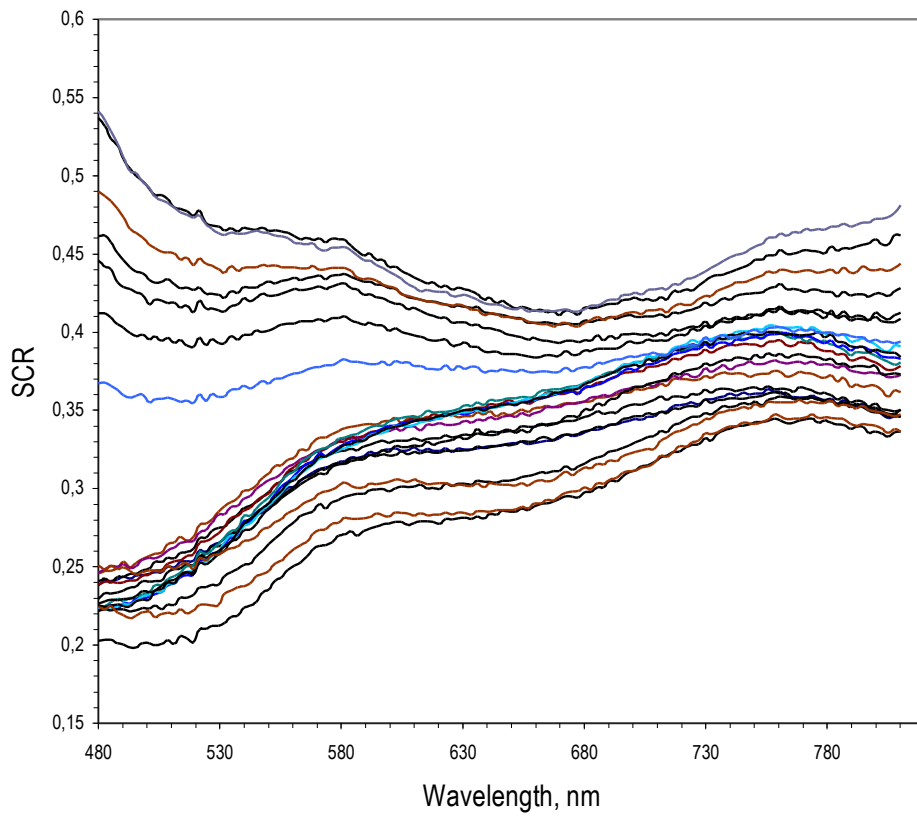


Figure 6. Averaged SRC of the measured areas of the kyanite schist (specimen 1)

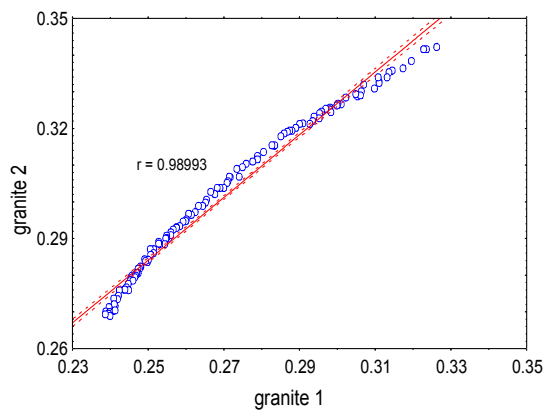


Figure 7. Correlation analysis of SRC of two granite specimens

Figure 8 presents the averaged SRCs of the two subclasses. The results from the cluster analysis of the SRC of the two subclasses are illustrated in Figure 9, where the case of carrying out such analysis for the wavelengths 500 nm and 779 nm is given as an example.

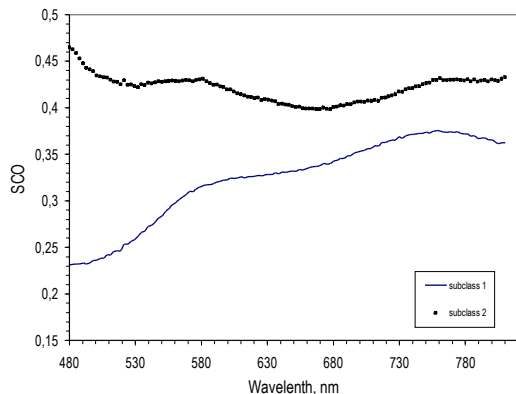


Figure 8. Averaged SRC of the two subclasses of specimen 1 of the kyanite schist

Concluding, we shall note that the spectral reflectance characteristics of studied rock formations give information for their texture features and contribute to the ground remote sensing database necessary for aerospace geological research by spectral indications.

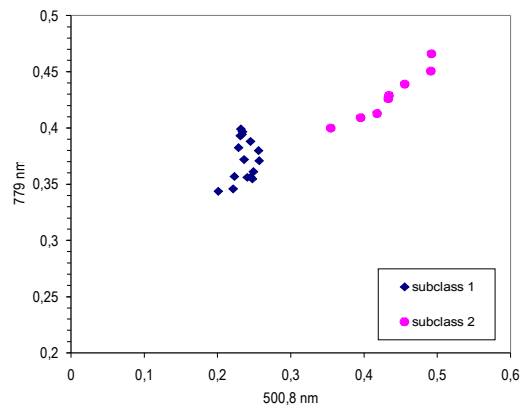


Figure 9. Cluster analysis of the two subclasses of specimen 1 of the kyanite schist

## REFERENCES

- Mishev, D., S. Kovachev, 1988. Multichannel Spectrometric System "Spectrum 256" on Board of "Mir" Station, 39th Congress IAF, India, Bangalore, IAF No 88-115, pp. 1-4.
- Mishev, D., S. Kovachev, D. Krezhova, Yu. Uzunov, 1989. Images and Analysis of data Obtained By Spectrum 256' Under the Program 'Georesource', 40th Congress IAF, Malaga, IAF No 89-167, pp. 1-5.
- Mishev, D. N., S. T. Kovachev, D. D. Krezhova, 1990. New Generation of Space Multichannel Spectrometric Systems, *Compt. rend. Acad. bulg. Sci.*, 43, No 1, pp. 53-56.
- Mishev, D., S. Kovachev, T. Yanev, D. Krezhova, 1999. The multichannel spectrometric system 'Spectrum 256' onboard the manned space station 'MIR' and afterwards, (in Bulgarian), Proceedings "10 Years from the Space Project Schipka" 1988, ISR-BAS, Sofia, pp. 104-111.
- Moralev, V., K. Cheschihina, 1989. Spectral reflectance of 'Black Schists' and the possibility for their recognition on aerospace images, (in Russian), Investigation of Earth from Space, № 6, pp. 84- 87.
- Salisbury J., L. Walter, N. Vergo, D. D'Aria, 1992. Mid Infrared Spectra of Minerals, John Hopkins University Press, Baltimore, pp. 1-296.
- Salisbury J., D. D'Aria, 1994. Emissivity of Terrestrial Mterials in the 3-5  $\mu\text{m}$  Atmospheric Window, *Remote Sens. Environ.*, 47, pp. 345-361.
- Trifonov, V., S. Schulz, 1986. Peculiarities in Geological Application of Space Information (in Russian), Investigation of Earth from Space, № 1, pp. 32- 42.
- Wood, J., M. Lasserre, G. Fedosejevs, 1990. Analysis of Mid-Infrared Spectral Characteristics of Rock Outcrops and an Evaluation of the Kahle Model in Predicting Outcrop Thermal Inertia, *Remote Sens. Environ.*, 30, pp. 345-361.