

ПОЛЕВИ СПЕКТРОМЕТРИЧНИ ИЗСЛЕДВАНИЯ НА СКАЛИ

Деница Борисова

Институт за космически изследвания и технологии – Българска академия на науките
e-mail: dborisova@stil.bas.bg

Ключови думи: физични принципи, спектрометрични измервания, скали и минерали

Резюме: Използването на дистанционните изследвания в науката и практиката започва още с разработването и конструирането на апаратура за провеждането на изследвания на обекти от разстояние като не се нарушава тяхната цялост. В тази работа областта на изследване е геологията. Основната цел при дистанционните изследвания в геологията е да се определи какъв е химичният състав на изследваните обекти, които попадат в полезрението на използваната апаратура при лабораторни, полеви дистанционни измервания на отразената слънчева радиация, и каква е структурата на химичните съединения и състоянието на елементите в тях, т.е. да си отговорим на въпроса: „Какъв вид е скалата?“. Полевите спектрометрични изследвания на скали са проведени с цел да се събере, състави и допълни каталог със спектрални характеристики на различни типове скали за тяхното надеждно разпознаване и установяване на техния минерален и химичен състав. Основните физични принципи, на които се базират експериментите са: разсейване, поглъщане (абсорбция) и отражение на слънчевата радиация във видимия диапазон на електромагнитния спектър (ЕМС). Полевите спектрални измервания са осъществени с проектирания и конструиран в секция „Системи за дистанционни изследвания“ към ИКИТ-БАН спектрометър ТОМС (Тематично Ориентиран Многоканален Спектрометър). Получените спектрални резултати от изследванията са сравнени с аналогични данни от спектрални библиотеки и съответстват по вид на отражателните спектри в същия диапазон от ЕМС, получени с други спектрометри.

FIELD SPECTROMETRIC MEASUREMENTS OF ROCKS

Denitsa Borisova

Space Research and Technology Institute – Bulgarian Academy of Sciences
e-mail: dborisova@stil.bas.bg

Keywords: physical principles, spectrometric measurements, rocks and minerals

Abstract: Application of remote sensing in science and practice begins with the development and design of equipment for carrying out research of objects remotely and without disturbing their integrity. In this paper, area of study is geology. The main goal in remote sensing in geology is to determine what is the chemical composition of the objects and structure of these chemicals within the field of view of the instrument either determined with a remote sensor in the lab, and on the field. Or in other words: “What kind of rock am I looking at?” Field spectrometric studies of rocks were performed to collect, compile and complete index with spectral characteristics of different rock types for the reliable detection and identification of their mineral and chemical composition. The experiments are based on main physical principles such as light scattering, absorption of light, and reflection of light in the visible range of the electromagnetic spectrum (EMS). Field spectral measurements were carried out with the TOMS (Thematically Oriented Multi-channel Spectrometer) designed and constructed in Remote Sensing Systems Department at SRTI-BAS. The results were compared with similar data from spectral libraries. They correspond to the shape of reflectance spectra in the same range of EMS obtained with other spectrometers.

Въведение

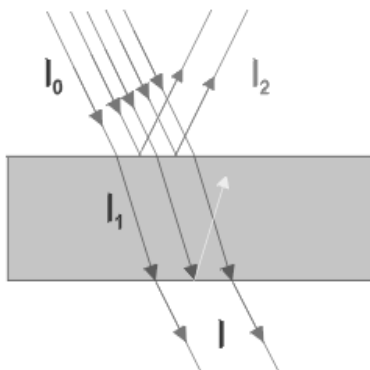
Дистанционните изследвания за множество задачи в науката и практиката започват с разработването и конструирането на подходящата за провеждането на тези изследвания апаратура. Изучават се различни типове обекти от разстояние като не се нарушава тяхната цялост. В тази работа областта на изследване е геологията, в частност – петрографията. Една от основните цели при дистанционните изследвания в тази област е да се определи какъв е

химичният и минералният състав на изследваните обекти, които попадат в полезрението на използваната апаратура при лабораторни, полеви дистанционни измервания на отразената светлина, и каква е структурата на химичните съединения и състояниета на елементите в тях, т.е. да си отговорим на въпроса: „Какъв вид е скалата?“. Полевите спектрометрични изследвания на скали са проведени с цел да се събере, състави и/или допълни каталог със спектрални характеристики на различни типове скали за тяхното надеждно разпознаване и установяване на техния минерален и химичен състав. Основните физични принципи, на които се базират проведените експериментални измервания са: разсейване, поглъщане (абсорбция) и отражение на слънчевата радиация във видимия диапазон на електромагнитния спектър (ЕМС). Апаратурата, с която са осъществени полевите спектрални измервания, е спектрометър Тематично Ориентиран Многоканален Спектрометър (ТОМС). Той е проектиран и конструиран в секция „Системи за дистанционни изследвания“ към ИКИТ-БАН. Работният диапазон на спектрометъра е (400-900) nm. Получените данни първо са обработени с алгоритми за предварителна обработка и след това са сравнени с аналогични данни от спектрални библиотеки. Резултатите съответстват на получените с други спектрометри.

Физични принципи

Основните физични принципи, на които се базират проведените експериментални измервания са: разсейване, поглъщане (абсорбция) и отражение на слънчевата радиация във видимия диапазон ЕМС. Две основни дефиниции, които се отнасят за проведените измервания:

- Скалите са естествени минерални агрегати и така се разглеждат при проведените експерименти;
- Използва се уравнението на Хапке за моделиране на коефициента на отражение (r_λ) при открити скали [1]. Смисълът на това моделиране е, че с познаването на известни оптични константи на различните минерали, на ъгъла на падналата слънчева радиация и на енергията на достигналата до изследвания обект слънчева радиация, може да се моделира спектралният коефициент на отражение на скалите с различни размери на минералните зърна и с различно минерално съдържание.



Фиг. 1. Физични процеси в плътна прозрачна плоско-паралелна пластина

Какво става със слънчевата радиация, когато достигне до скалата? При достигане до изследвания обект (в случая – скалите) радиацията едновременно се разсейва като се отразява от минералните зърна и се пречупва през минералните зърна, и същевременно се поглъща (абсорбира) от минералните зърна. В този смисъл протичат едновременно физични процеси (Фиг.1.), за които са в сила съответните физични закони и зависимости, като:

- Закон на Буге-Ламберт (експоненциален закон на абсорбция):

$$(2) \quad I = I_0 e^{-kx}$$

където: I – интензитет на погълнатата слънчева радиация, [W/sr]; I_0 – интензитет на падналата слънчева радиация, [W/sr]; k – коефициент на поглъщане ($k = 4K/\lambda$), [m^{-1}]; x – разстоянието, на което интензитетът намалява е-пъти, [m].

- Интензитет на отразената слънчева радиация I_2 , [W/sr]:

$$(3) \quad I_2 = I_0 \left(\frac{n-1}{n+1} \right)^2, \text{ където}$$

$$(4) \quad R = \left(\frac{n-1}{n+1} \right)^2,$$

като в уравнение (4) R се нарича коефициент на отражение, определя се за два вида среди и не зависи от посоката на разпространение, а n е относителният индекс на пречупване на отразяващата среда.

- Спектрален коефициент на отражение (измерен в полеви условия):

$$(3) \quad r_\lambda = L_\lambda / L_{calib}$$

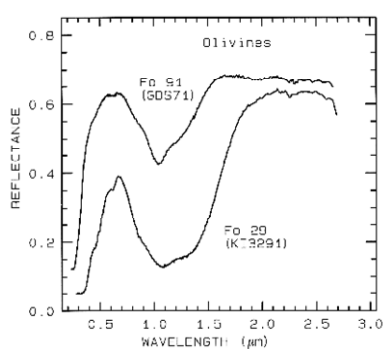
представлява критерий за способността на една повърхност да отразява слънчевата радиация, който критерий е равен на съотношението на отразената слънчева радиация от изследвания обект за всяка дължина на вълната L_λ , [W/(m².sr)] към отразената слънчева радиация от калибрирана референтна повърхност за същата дължина на вълната L_{calib} , [W/(m².sr)] в еднакви условия на провеждане на измерванията. Изчертана като функционална зависимост на r_λ от λ получената графика се нарича спектър или спектрална крива, или спектрална отражателна характеристика.

При анализа на получените криви графики се наблюдават характерни пикове, които се дължат на различни причини. Каква са причините за абсорбцията? Протичат два типа процеси: електронни и вибрационни.

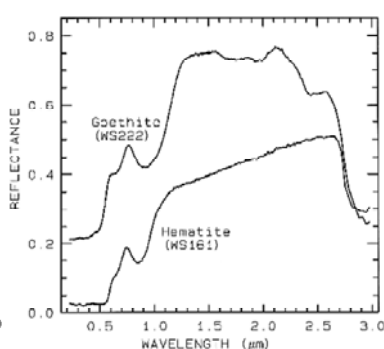
I. Електронни процеси

- Ефект в полето на кристала: Един електрон преминава от по-ниско на по-високо енергийно ниво чрез абсорбция на енергия, равна на един фотон. Проявява се при Ni, Cr, Co, Fe и абсорбционните ивици са тесни;
- Пренос на заряд: Един електрон се превръща в йон или лиганд чрез абсорбция на енергията на един фотон. Това води до широки абсорбционни ивици в ултравиолетовия (UV) и видимия (VIS) диапазон от ЕМС. Това определя червения цвят на железния окис;
- Зони на проводимост: Фотон с определена енергия причинява преместване на електрон в кристалната решетка на някои вещества. Това явление е характерно за диелектрици и се наблюдава във VIS и близкия инфрачервен (NIR) диапазони от ЕМС. Това е причината за жълтия цвят на сярата.

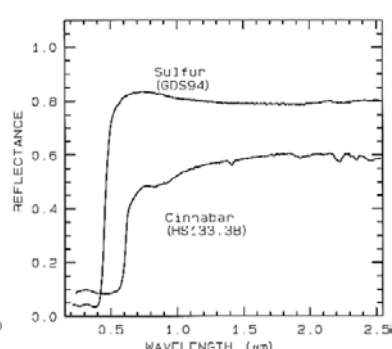
Резултатът от тези електронни процеси в отражателните спектри на някои вещества е представен на Фигури 2(а-в).



Фиг. 2а. Абсорбция при ефекта в полето на кристала, причинена от Fe²⁺ в оливин. Fe 29 е с 54% FeO, Fe 91 е с 8% FeO [2].



Фиг. 2б. Абсорбция при пренос на заряда, причинена от Fe²⁺. Fe₂O₃ (хематит) и FeOOH (гьотит) [3]



Фиг. 2в. Абсорбция при зони на проводимост, причинени от S (сяра) и HgS (цинабарит) [3]

II. Вибрационни процеси

При тези процеси връзките между атомите в молекулите трептят с честота, която зависи от вида на тези връзки и от атомните маси. Някои вещества имат съществени за разпознаването им вибрационни абсорбционни ивици, като например: вода, хидроксилни групи, карбонати, фосфати, борати, арсенати и други.

Материали и методи

Апаратурата, с която са проведени полевите спектрометрични измервания, е Тематично Ориентиран Многоканален Спектрометър – ТОМС (Фиг.3). Той е проектиран и конструиран в секция „Системи за дистанционни изследвания“ (СДИ) към ИКИТ-БАН в сътрудничество с държавния университет в щата Алабама, САЩ [4-5]. Основното измерително устройство на полевия спектрометър ТОМС е USB2000 (Фиг.3). Работният диапазон на спектрометъра е (400-900) nm. В получените данни чрез алгоритми за предварителна обработка [6-7] са въведени радиометрични, калибровъчни и статистически корекции, което е осъществено със софтуера на спектрометъра.



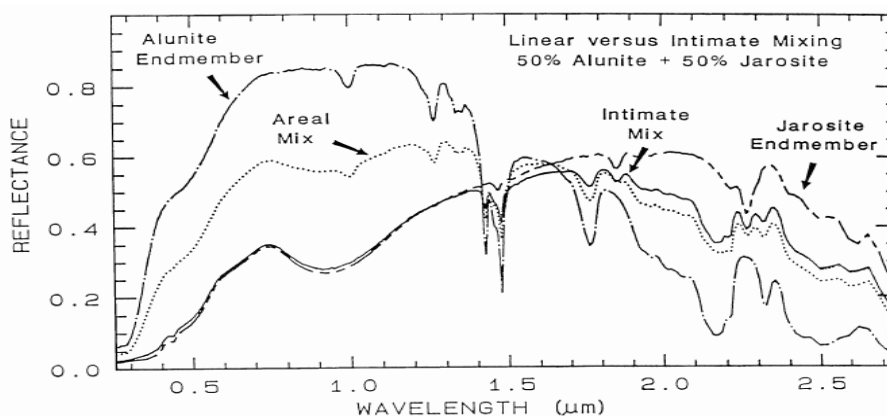
Фиг. 3. Полеви Тематично Ориентиран Многоканален Спектрометър (ТОМС)

Като част от предварителната обработка на получените данни в Таблица 1 е представена необходимата допълнителна информация за GPS-координатите на точките на измерване (GPS), атмосферните условия (atm) на измерване при полевите експерименти, времето за провеждане на едно измерване (t_i), броя на статистически усреднените спектри (λ_n) и разстоянието от обекта до входната оптика (H_{00}).

Таблица 1. Допълнителна информация за всеки експеримент

Обект на измерване	GPS	atm	t_i , ms	λ_n	H_{00} , cm
Монцитони и мъх	N42°35'18" E23°17'34"	Ясно, сянка	10	100	10
Гранити и мъх	N42°09'14" E23°19'53"	Ясно, сянка	10	100	10
Квацдиорити и мъх	N43°07'39" E23°08'04"	Ясно, сянка	10	100	10

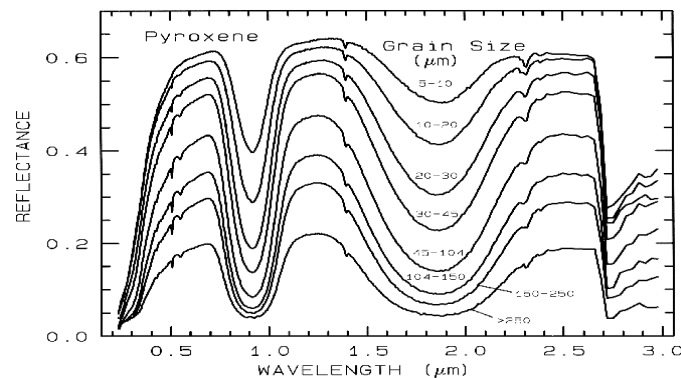
Един възможен краен резултат от анализа на данните е определянето на отделен клас обекти, попадащи напълно или частично в полезрението на използвания спектрометър ТОМС. Установяването на стойността на дяловото участие на отделния клас с необходимата статистическа достоверност, е съществена задача при анализа на получените данни. За да се реализира тази задача, скалните обекти се разглеждат и изследват като естествени минерални агрегати (смеси). Обединени са в четири основни групи смеси (Фиг. 4):



Фиг. 4. Четири основни групи смеси

- Линейна (площна) смес: Обектите в полезрението на сензора са оптически различни. В този случай сумарният коефициент на отражение за всяка дължина на вълната представлява линейна комбинация от коефициентите на отражение за всеки обект, умножен по дела, с който този обект участва в цялата наблюдавана площ;
- Вътрешна смес: Отделните вещества са като агрегат (например минералните зърна в скалите или почвите). В този случай сумарният коефициент на отражение е нелинейна комбинация от коефициентите на отражение за всяко от тях;
- Припокриваща се смес: Веществата се припокриват едно спрямо друго. Всеки слой ще има различна оптична плътност с различни оптични свойства;
- Молекулярна смес: Смесването се наблюдава на молекулно ниво (например разтвори). Сумарният коефициент на отражение е нелинеен.

Друг фактор, който влияе върху спектрометричните измервания, е зърнестата структура на скалите, т.е. размера на минералните зърна. Разсейването на слънчевата радиация се проявява на повърхността на минералите и скалите, докато абсорбцията – вътре в тях. Дребнозърнестите минерали/скали имат по-високи стойности на отражението във VIS-NIR диапазон на ЕМС, отколкото едрозърнестите (Фиг. 5).

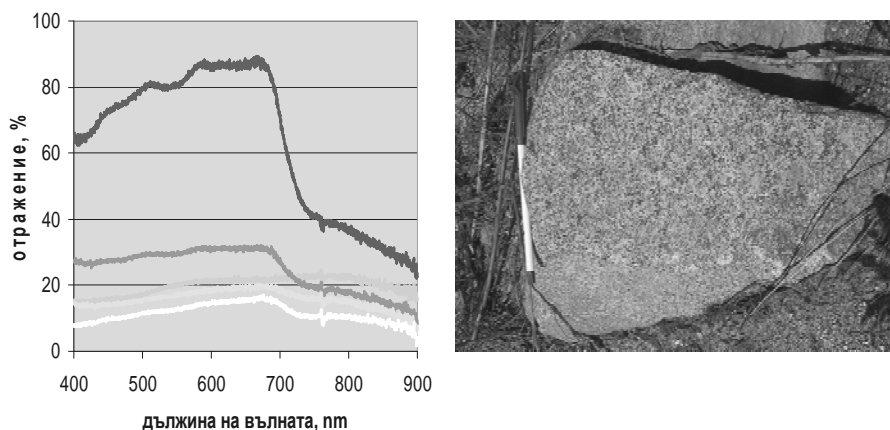


Фиг. 5. Спектрални характеристики на разнозърнест пироксен

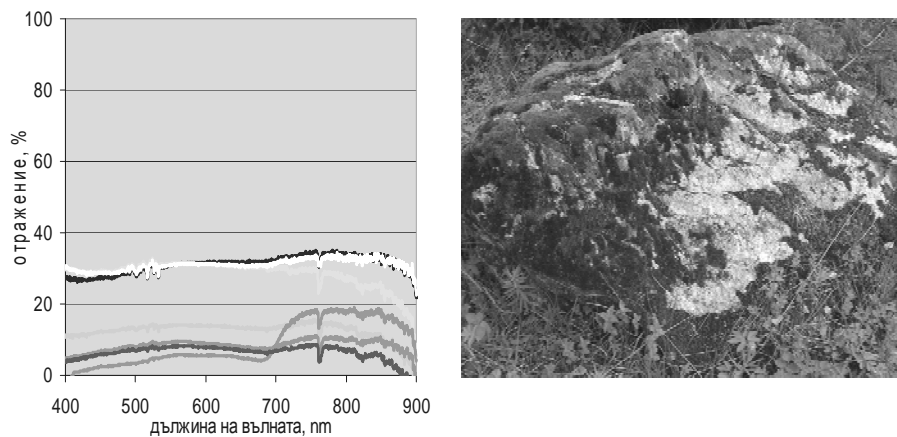
Получените и обработени данни са сравнени с аналогични данни от спектрални библиотеки. Спектралните библиотеки представляват колекции от спектри за множество минерали и скали, получени с измервателна апаратура с висока радиометрична и спектрална разделителна способности. Събраните спектри могат да бъдат сравняване с други спектри, за да бъдат по-точно идентифицирани обектите на сравнителните изследвания. Особено важно е да се отчете, че данните от различните спектрометри трябва да се сравняват само, когато са преобразувани до критерия за сравнимост - коефициента на отражение. Такива спектрални библиотеки са в основата за сравнителни дистанционни изследвания на скални обекти.

Резултати

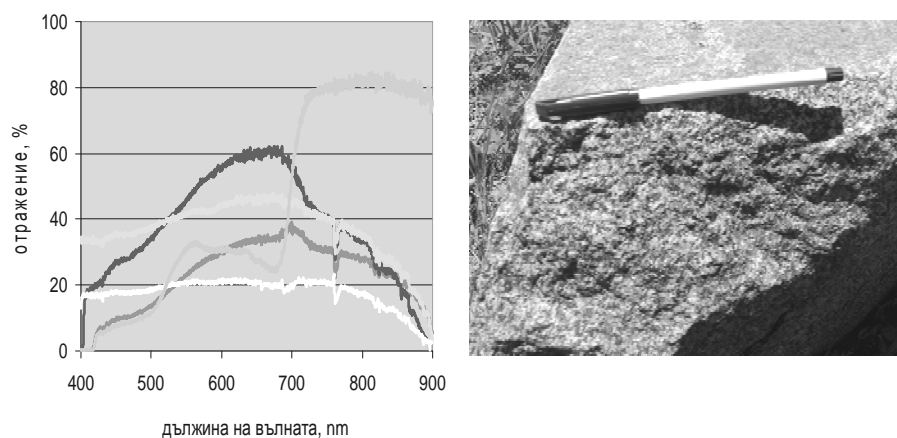
На Фигури 6(а-в) са представени спектралните характеристики на изследваните скали.



Фиг. 6а. Отражателни спектри на монцонити и мџх, Витоша, Алеко



Фиг. 6б. Отражателни спектри на гранити и мъх, Рила, Кирилова поляна



Фиг. 6в. Отражателни спектри на кварцдиорити и мъх, Западна Стара планина

Заклучения

- Отражателните спектри на скалите в настоящето изследване представляват линейна комбинация от коефициентите на отражение за отделните минерали, т.е. като линейна площна смес от скалообразуващите ги минерали.
- Изследваните скали със среднозърнеста структура имат стойности на спектралния коефициент на отражение между 20% и 40%.
- Получените със спектрометъра ТОМС отражателни характеристики на изследваните скали, съответстват по вид и стойности на спектралния коефициент на отражение в същия диапазон от ЕМС с данните от аналогични спектрометри, записани в известните спектрални библиотеки.

Благодарности: Работата е финансирана по Договор И01/8 с ДФНИ.

Литература:

1. Н а р к е, В. Bidirectional reflectance spectroscopy 1. Theory. J. Geophys. Res., 86, 3039-3054, 1981.
2. К i n g, T. and W. R i d l e y. Relation of the spectroscopic reflectance of olivine to mineral chemistry and some remote sensing implications. J. Geophys. Res., 92, 11457-11469, 1987.
3. C l a r k, R., G. S w a y z e, A. G a l l a g h e r, T. K i n g, W. C a l v i n. The U. S. Geological Survey, Digital Spectral Library: Version 1: 0.2 to 3.0 μm , U.S. Geological Survey, Open File Report 93-592, 1326, 1993.
4. П е т к о в, D., Н и к о л о в, and G. G e o r g i e v. Thematically Oriented Multichannel Spectrometer (TOMS). Aerospace Research in Bulgaria, 20, 51-54, 2005.
5. П е т к о в, D., А. К р у м о в, Н. Н и к о л о в, G. G e o r g i e v. Multichannel nadir spectrometer for thematically oriented remote sensing investigations. Proceedings of SES 2005, 227-231, 2005.
6. А т а н а с о в, V., and G. J e l e v. Algorithm for dark current characterization of imaging spectrometer. Aerospace Research in Bulgaria, 19, 77-83, 2004. А т а н а с о в, V., G. J e l e v, and L. K r a l e v a. Imaging spectrometer data correction. Scientific Conference with International Participation "Space, Ecology, Safety – SES'2005", Varna, Bulgaria, Conference Proceedings, Book 1, 221 – 226, 2005.