

A Mars felszínének kőzettani vizsgálata hiperspektrális felvételek alapján

Ládai András Dénes¹ doktorandusz, dr. Barsi Árpád¹ egyetemi docens,
Stéphane Le Mouelic² kutató mérnök, Christophe Sotin² egyetemi tanár,
Jean-Philippe Combe² doktorandusz és az OMEGA Team

¹BME Fotogrammetria és Térinformatika Tanszék

²Laboratoire de Planétologie et Géodynamique, Nantes

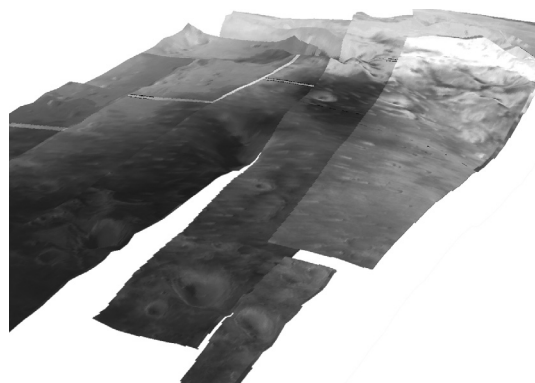
1. Bevezető

Érdekes munkálatok folynak a francia CNRS (Centre National de la Recherche Scientifique) kutatóintézet nantesi székhelyű Geodinamikai és Planetológiai Laboratóriumában (Laboratoire de Planétologie et Géodynamique). A 2003. június 2-án útnak indított Mars Express űrszonda hiperspektrális képeinek feldolgozása alapján határozzák meg a marsfelszíni kőzeteket. E cikk egy konkrét példán keresztül ismerteti a főként bolygó kutatásban használatos technika lehetőségeit. Cikkünk első szerzője, Ládai András Dénes két hónapon keresztül dolgozott együtt e nantesi kutatócsoporttal. Az ott töltött közös munka eredményeit mutatjuk be. A kutatási időt az öt nantesi Rotary Club finanszírozta.

A szonda OMEGA nevű műszere készíti a hiperspektrális felvételeket a látható és infravörös tartományban (0,35–5,2 μm közötti intervallumban). A képek térbeli felbontása 350 m és 10 km között változik, a Mars felszínétől való távolság függvényében (a pálya ellipszis alakú). Ez a spektrális tartomány lehetővé teszi a fő atmoszférikus gázok, különböző jégfajták és a felszíni kőzetek karakterisztikus elnyelődési görbéjének meghatározását, majd a további feldolgozások során a meghatározott anyagok térképi megjelenítését.

Az itt bemutatott munka a Syrtis Major területről készített felvételeken zajlott. Ez a terület geológiailag változatosnak tűnik, s az előzetes kutatások alapján érdekes jelenségeket figyeltek már meg. A mágneses mező méréséből erős anomáliákat mutattak ki, s ez nagy koncentrációjú vasoxid előfordulásra enged következtetni.

A nyers adatok első feldolgozása (adatok beolvasása, koordinátarendszerbe való tájékoztatás és mozaikolás – 1. ábra) során hamar kiderült: az adatok minősége nem minden esetben megfelelő, így a feldolgozást nem hajthatjuk végre a teljes, meglévő spektrumon. A látható tartományt teljes



1. ábra A hiperspektrális mozaik-felvételek (RGB megjelenítésben) a domborzatmodellen

egészében le kellett vágni, s az infravörös megrövidítésével csupán 1 és 2,6 μm hullámhossz között vizsgálhattuk biztonsággal a képeinket.

A hiperspektrális adatokat tartalmazó képek elemzése a minimális zaj frakció (Minimum Noise Fraction – MNF) transzformációval kezdődött. Az MNF transzformáció leredukálja a hiperspektrális adatok dimenziószámát, miközben kiszűri a zajjal terhelt részeket. Ez a lineáris transzformáció két egymást követő főkomponens analízist tartalmaz (PCA – Principal Components Analysis). Az első leválasztja az adatokból a zajt, majd újrászámítja. Ez a transzformált adatokban egységnyi varianciájú zajt eredményez, valamint egymástól lineárisan független csatornákat. A második egy egyszerű főkomponens analízis, mely már a zaj nélküli képen történik. A kapott MNF csatornák további csoportosításával a kívánt számú célspektrumokat (endmembers) állíthatjuk elő.

2. A spektrumok geológiai értékelése

A matematikai módszerrel szétválogatott spektrumokat a továbbiakban geológiai szakismeretek

segítségével dolgozhatjuk fel. A kapott görbék felismeréséhez és kellő biztonságu azonosításához szükséges a különböző ásványok és kristályszerkezetek laboratóriumban készült spektrális görbéinek ismerete. Természetesen könnyít a feladaton az, hogy nagyvonalakban tudjuk, „mit kell találnunk”, vagy legalábbis azt, mit felesleges keresnünk a Mars felszínén (például a Földön megszokott tengeri üledékes kőzet).

A zajjal terhelt, durva kiugrások eltávolítása után kezdődhet a szétválogatás. Nincs könnyű dolgunk, hiszen itt messze nem laboratóriumi körülmények között készültek a felvételek. A leképezés során a környezeti hatások jócskán beleszóltak a mérési eredmények alakulásába. Ezek egy jó része ismert, s a korrekciók során hatásuk minimálisra csökkenthető, azonban mindig maradnak ismeretlen faktorok. Meg kell említeni azt aényt is, hogy a természetes környezetben soha sem tiszta formában fordulnak elő az ásványok, azokat csak egymással keveredve találjuk meg. Nem beszélve egy pixel méretéről, mely több száz méter oldalhosszúságú négyzet alakú területet fed le a Mars felszínén. Ekkora területen tiszta, homogén ásványi előfordulást ne is reméljünk! A visszaverődő jel tehát a felszínén található mixtúra spektruma, az abban található ásványok együttesen formálják a görbe alakját előfordulási gyakoriságuknak megfelelően.

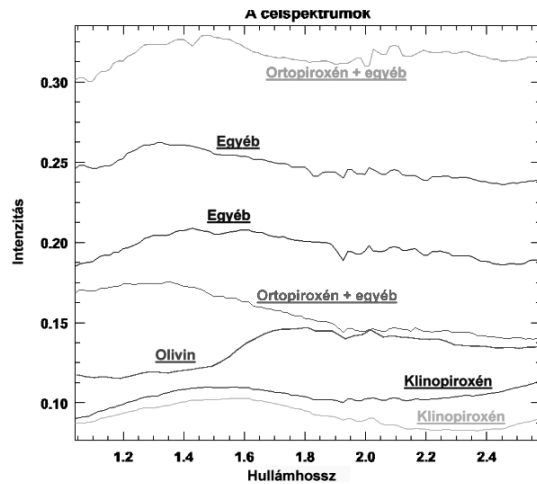
A spektrum alakjára még egyéb környezeti tulajdonságok is hatnak. A lágyan hullámzó felszín és a tarajos domborzat más-más módon befolyásolja az eredményeket. A szemcsenagyság különbözősége is komolyan átforgalmazhatja a görbéket: a finomodó méret intenzitás az értékét növeli, miközben az elnyelődés „gödreit” csökkenti.

Hogyan azonosíthatjuk tehát a kapott görbéinket? Első lépésként az általános alakját vesszük szemügyre, az meghatározza a vizsgálataink további irányait. A következőkben az egyes szakaszok meredekségét, az azokat egymástól elválasztó határpontok értékét, a megkülönböztethető szakaszok hosszát érdemes vizsgálni. A fényelnyelési tulajdonságokról árulkodnak a helyi és abszolút minimumok és maximumok, illetve inflexiósi pontok helye a hullámhossz számegeyenesén.

A legmarkánsabb görbéket a gyakorlott szem hamar felismeri, azonban nem árt összehasonlítani a laboratóriumi mérésekkel is. Példánkban az olivinre jellemző formát és elnyelődési helyeket találtuk meg a leghamarabb. A végeredmény egy beazonosított, névvel ellátott visszaverődési görbesereg (2. ábra).

3. Megjelenítés

Az ásványaink megnevezése után természetesen kíváncsiak vagyunk, hogy merre van azok lelőhelye. A vonatkozási rendszerbe beillesztett megjelenítésre több lehetőségünk is van. Az egyes spektrális görbékhez tartozó ásványok helyzeté-



2. ábra Az elnevezett osztályok

nek és kiterjedésének bemutatására a spektrális szög osztályozó (Spectral Angle Mapper – SAM) módszer a legalkalmasabb.

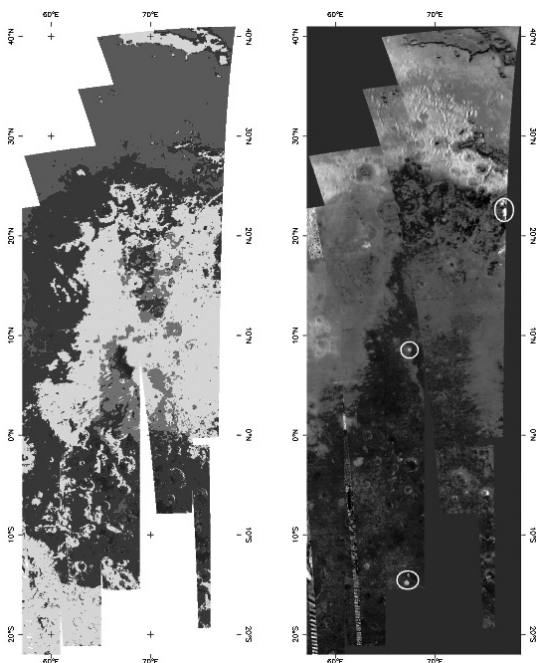
A SAM a végosztályok görbéi és az egyes pixelekhez tartozó spektrumok közötti korrelációt határozza meg, s az így kapott eredmények alapján sorolja be az egyes képpontokat a hozzá legközelebb álló osztályba. A végeredmény egy színezett tematikus térkép, melyen a megkülönböztetett spektrális görbék (azaz a megkülönböztetett ásványok) területi eloszlását figyelhetjük meg (3. ábra baloldali képe). E térkép segítségével további geológiai elemzéseket végezhetünk a vizsgált területen. Következtethetünk az egyes régiók kialakulásának körülményeire, azok idejére és sorrendjére.

4. Vizsgálatok az olivin kimutatására

A megnevezett ásványok közül a legérdekesebb talán az olivin. Annak előfordulása viszonylag fiatal vulkáni tevékenységről árulkodik. Az esetünkben piros színnel jelzett ásvány a SAM térkép szerint azonban igen kis előfordulású. Ezt az első, átfogó elemzést lefuttatva lényegében csak egy komolyabb lelőhelyet figyelhetünk meg (az itt megjelenített méretarányban ez nem is látszik). Ha a továbbiakban célirányosan az olivin előfordulá-

sát kívánjuk kutatni, erre is lehetőséget kínál a hiperspektrális analízis. Az UNMIX módszer kiválóan alkalmas adott spektrummal jellemzett pixelek megtalálására, illetve annak kimutatására, hogy azok milyen erős korrelációban vannak a kijelölt görbével.

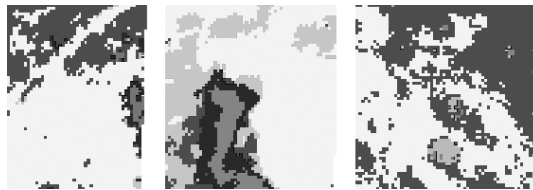
Az UNMIX eljárással meghatározhatjuk bármilyen multi- vagy hiperspektrális felvételen az anyagok relatív előfordulásának mértékét a spektrális jellemzőik segítségével. A vizsgált pixel spektruma és az UNMIX elemzésre kijelölt spektrum hasonlatossága és az anyagunk előfordulási százaléká között lineáris kombináció van. Ezt a viszonyt fejezi ki az UNMIX módszerrel előállított adatstruktúra, melyben a pixelek értéke 0 és 1 közötti értéket vehet fel. Ha például egy képponttal lefedett terület 25%-ban tartalmaz A anyagot, 30%-ban B anyagot, 45%-ban pedig C anyagot, akkor az egyes anyagokra kiértékelt UNMIX ké-



3. ábra A SAM és az UNMIX térkép

pen az aktuális pixel A esetben 0,25, B esetben 0,30, C esetben pedig 0,45 értéket vesz fel. A kép a pixeleket szürkeárnyalatban jeleníti meg, az 1 értéket a legvilágosabban, a 0 értéket pedig a fekete színnel jelöli. E módszerrel könnyen felkutathatjuk a keresett anyagunk vélt lelőhelyeit, melyet aztán alaposabb vizsgálatnak vethetünk alá.

Az általunk keresett ásvány tehát az olivin. A 3. ábra jobb képén láthatjuk eredményünket. Hamar



4. ábra A tanulmányterületek SAM térképei sorrendben

szemünkbe ötlik, hogy észak felé a kép egyre világosodik. Ez szabályos hibára utal, amit pár irányított mintavételezéssel ellenőrzünk is: néhány világos északi pixel spektrális görbáját lekérdezve kiderül, hogy azok görbéje nem hasonlít az olivinére. Ezt figyelembe véve, képiükön a fényerőt relatív módon kell értelmeznünk, vagyis mindig a környezetüktől erősen elütő világos területek árulkodnak az olivin jelenlétéről. Így szemrevételezve három olivinben gazdag területet találtunk, melyek SAM eredményeit megnézhetjük a 4. ábrán. Az első képen a SAM vizsgálat is kimutatja az olivin jelenlétét. A második területen ez már nem mondható el, ott ez a módszer nem bukkant rá a keresett ásványra. A megjelent forma azonban mindenképp figyelemre méltó, részletesebb vizsgálatot érdemes lefuttatni rajta. A harmadik területen két kráter látható, melynek anyaga jelentősen eltér a környezetétől, s az északiban néhány pixelnyit sikerült is kimutatni a szóban forgó ásványból.

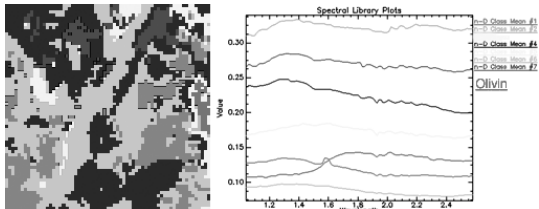
A továbbiakban ezen területeket részletesebben is megvizsgáljuk, hogy megállapítsuk, vajon helyes-e az UNMIX képünk alapján az olivin jelenlétének feltételezése.

5. Részletesebb elemzések

A részletesebb elemzéseket a nyers, feldolgozatlan adatokon végeztük el. A képeket nem illesztettük be koordináta-rendszerbe, s így nem is készítettünk belőlük mozaikot. Ezáltal az eredeti adatminőséggel dolgozhatunk, az interpolációs eljárásokat mellőzve. A részletesebb elemzések elvégzése több okból is érdekes. Megláthatjuk, miként változott az adatállomány megbízhatósága a különböző interpolációk következtében, másrészt a SAM és UNMIX módszereink megbízhatóságát tesztelhetjük le.

Az első, olivinben gazdag terület központi területének koordinátái 22-20-34 N és 77-07-24 E, s az ORB0422_4 jelű adatállomány foglalja magába. Az elemzés körülményein semmi változtatás nem történt, vagyis az átfogó analízissel megegyező kezdeti paraméterek mellett történt a vonatkozási rendszer nélküli kép kiértékelése, így bizto-

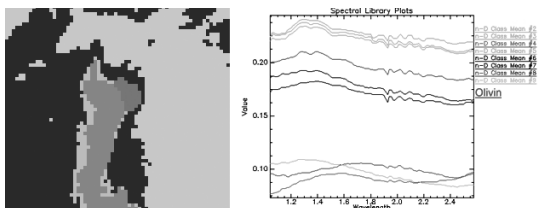
sítva az alapot az eredmények összehasonlítására (5. ábra). A kép jóval részletgazdagabb lett, hiszen kisebb területen, ugyanannyi „endmembers”-szel dolgoztunk. Az olivinnek vélt anyag spektrális görbéje azonban szinte teljesen megegyezik



5. ábra Az 1. számú mintaterület részletesebb elemzése

az első esetben kapottéval, s a SAM eredmény is hasonló képet mutat. E próba alapján megállapíthatjuk, hogy az interpolációs eljárások által okozott adatváltozások itt nem mértékadóak.

A második elemzési terület azért érdekes, mert az UNMIX kimutatta a vizsgált ásvány jelenlétét, de a SAM térképen az nem jelent meg. És figyelemre méltó a környezetében lévő alakzat is. A ki-

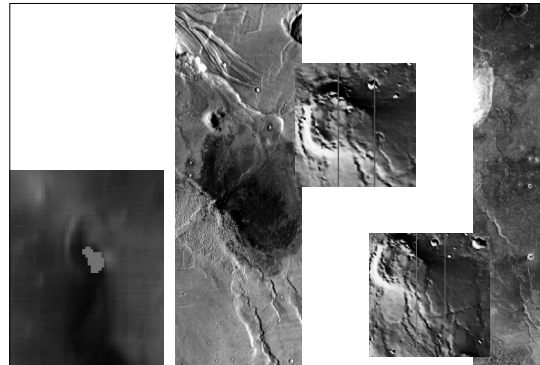


6. ábra A 2. számú mintaterület részletesebb elemzése

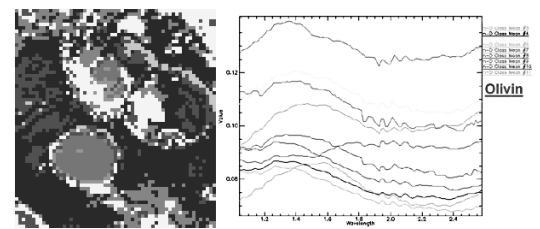
értékelés eredménye (mely szintén az előzőekkel azonos paraméterek mellett készült az ORB0488_3 jelű képből) a 6. ábrán megfigyelhető. A spektrum görbék között található egy, mely emlékeztet az olivinéra, bár kevésbé, mint az előző esetekben. Ha ezt ugyanazon jelkulccsal jelenítjük meg, láthatjuk az olivinben gazdag telep elhelyezkedését.

Lehetőségünk van megtekinteni a területet egyéb módon is: THEMIS képeken (THERmal EMission Imaging System, a 2001 Mars Odyssey program), melyek bárki számára hozzáférhetőek a világhálón keresztül. A THEMIS egy multispektrális rendszer, mely 10 infravörös és 5 látható tartományt foglal magába. A nappali és éjszakai infra felvételek felbontása 100 m körüli, a látható tartomány képei megközelítőleg 19 m pixelméretűek, s minden egyes felvételi sáv középpontjának adottak a földrajzi koordinátái. E jó minőségű képek alkalmasak arra, hogy a szakemberek megvizsgálhassák a Mars felületét részletesebben.

A képeken vulkanikus tevékenységre utaló alakzatokat láthatunk (7. ábra). Azt azonban, hogy pontosan hol is található az olivin telep, nem igazán lehet meghatározni teljes biztonsággal, hiszen a THEMIS adatokhoz nincs koordináta-rendszer kapcsolva. Csupán hozzávetőlegesen, a kere-



7. ábra Az RGB megjelenítés az olivindús területtel és két THEMIS felvétel-részlet



8. ábra A 3. számú mintaterület SAM megjelenítése és osztályai

sett hely környezetét határozhatjuk meg. A hely beazonosítását megkönnyítendő, megtekintettük a hiperspektrális adatokból készített RGB képen az olivinmezőt és környezetét.

A harmadik olivinben dús terület (ORB0488_2) különlegességét az adja, hogy egy kráter alját telíti teljesen, s annak északi szomszédja szintén dús-kál benne, míg a környezetükben máshol nem található. Legalábbis ez olvasható le az előzetes UNMIX elemzésről, s ezt igazolja az új vizsgálat SAM térképe is (8. ábra). A kapott spektrumok közül megint csak jól elkülöníthető az oliviné, mely gazdag előfordulásról tanúskodik.

Nos, ez a néhány részletesebb vizsgálat rávilágított arra, hogy érdemes elvégezni azokat, hiszen megerősíthetjük (vagy esetleg éppen cáfolhatjuk) az átfogó, de kevésbé részletes vizsgálatok eredményeit. S további, más jellegű adatok bevonásával még hitelesebbé tehetjük eredményeinket.

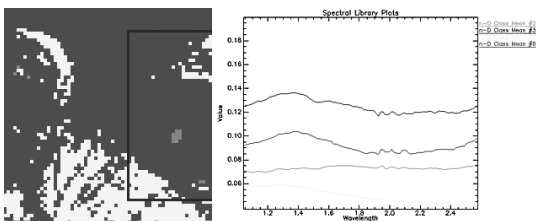
A következő vizsgálat indíttatása éppen fordítottja az eddigieknek. Ez esetben a THEMIS ada-

tok elemzése közben bukkant elő egy érdekes geológiai képződmény, mely okot adott a további vizsgálatokra. A képen (9. ábra), mintha folyók (vagy egyéb vízfolyások) formálta alakzatok mutatkoznának. Igen jól látható a domborzatmodellel, a THEMIS képeken, valamint a nagyfelbontású MOC (Mars Orbiter Camera a Mars Global Surveyor-on) képen is. Ez utóbbin azt is megfigyelhetjük, miként borítja el ezeket az árkokat finom homok. Geológus szemmel pillantva ezekre a természeti képződményekre, a vélemény egyértelmű: csak folyóvíz alakíthatta ki azokat.

A feladat tehát adott: megvizsgálni e terület felszíni kőzeteinek összetételét, akad-e köztük olyan, mely kialakulásához vizes környezet szükséges. A feldolgozandó adat (ORB0521_2) sajnos erősen terhelt volt zajjal (műszerhiba), melyek kiszűrése után nem sok spektrumunk maradt (10. ábra). Ezek között azonban nem található egy sem, ami különösebben felkeltené az érdeklődésünket. A négyzettel bekeretezett területről van szó. Egy dolog azért megfigyelhető: más az összetétele a „folyómeder” szabdalta felszínnek, mint a környezetének, például a kráter aljának.

6. További lehetőségek

Mint az itt bemutatott példából is kitűnik, a hiperspektrális képelemzés sok új, hasznos lehetőséget rejt magában. A távérzékelés e tudományága lehetővé teszi a felszínborítottság részletes vizsgálatát, melynek eredményeképpen már igen nagy biztonsággal tudunk attribútum adatokat nyerni. Bármilyen területen alkalmazhatjuk e technikát, a távoli bolygók kutatása mellett Földünkön is hasz-



10. ábra A „vízmosás” és környezetének spektrális elemzése

nos tehet. A példánk analógiájára geológiai célokra alkalmazhatjuk, de növényzet borította területeken mezőgazdasági vagy erdészeti munkálatokat is szolgálhat. Gyors adatnyerési eljárást tesz lehetővé akár városi környezetben is.

Minél több kész, már megvizsgált területünk van, annál jobban bővül a spektrumok megismert

tárháza. Egyre finomodhat az osztályozó technika, s a beazonosított görbéket spektrális könyvtárakban (spektral library) tárolhatjuk, hogy bármikor egy újabb elemzéskor elővehessük, s akár automatikusan lefuttathassuk. E spektrális könyvtárak feltöltése még folyamatban van.

Ezúton mondunk köszönetet a Planetológiai és Geodinamikai Intézet munkatársainak, akik lehetővé tették, és segítették e kutatómunkát: *Christophe Sotin* egyetemi tanárnak, *Stéphane Le Mouélic* kutató mérnöknek és *Jean-Philippe Combe* doktorandusznak, valamint az OMEGA teamnek, aki az adatokat rendelkezésre bocsátotta.

IRODALOM:

Green, A. A.–Berman, M.–Switzer, B.–Craig, M. D., (1988): A transformation for ordering multispectral data in terms of image quality with implications for noise removal IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, v. 26, no. 1, p. 65–74

Czímber, K. (2000): Hiperspektrális felvételek alkalmazása az erdőtérképezésben, kézirat, Sopron

Mustard, J. F.–Poulet, F.–Gendrin, A.–Bibring, J.-P.–Langevin, Y.–Gondet, B.–Mangold, N.–Bellucci, G.–Altieri F. (2005): Olivine and Pyroxene Diversity in the Crust of Mars, Science Express, February

Mustard, J. F.–Poulet, F.–Gendrin, A.–Head, J. W.–Mangold, N.–Bibring, J.-P.–Langevin, Y.–Gondet, B.–Sotin, C.–Le Mouélic, S.–Pinet, P. and the OMEGA Science Team (2005): Crustal formation, volcanism, and alteration in the syrtis major region re-vealed by omega data, Lunar and Planetary Science XXXVI

Analyses géologiques de la surface de Mars utilisant le traitement d'image hyperspectrale

Ládai, A. D.–Barsi, Á.–Stéphane, Le Mouélic–Christophe, Sotin–Jean-Philippe Combe

Resumé

Le traitement d'image hyperspectrale permet d'analyser les minéraux principaux d'une surface examinée. L'instrument d'OMEGA de la sonde MARS Express fournit des données hyperspectrales de la surface de Mars depuis janvier 2004. Les auteurs de cette article faisaient des recherches de la territoire Syrtis Major. Cette article vous présente la méthode utilisée, les conditions et les résultats de cette recherche qui était coordonnée au Laboratoire de Planétologie et Géodynamique de Nantes.