

Uporaba daljinskega zaznavanja - satelitskih posnetkov v inženirski geologiji (območje Črnega Kala)

The application of remote sensing - satellite imagery in engineering geology (study area of Črni Kal, Slovenia)

Marko Komac

Geološki zavod Slovenije,
Dimičeva 14, SI-1000 Ljubljana, Slovenija,
E-mail: mkomac@geo-zs.si

Mihael Ribičič

Gradbeni inštitut ZRMK,
Dimičeva 12, SI-1000 Ljubljana, Slovenija,
E-mail: mribicic@gi-zrmk.si

Ključne besede: daljinsko zaznavanje, satelitski posnetki, Landsat 5 TM, klasifikacija

Key words: remote sensing, satellite imagery, Landsat 5 TM, classification

Povzetek

Cilj prispevka je odgovoriti na vprašanje uporabnosti satelitskih posnetkov pri geološkem kartiranju večjih meril (1:10.000 in več). Poskušali smo ugotoviti primerenost daljinskega zaznavanja pri ugotavljanju litologije in prisotnosti prelomov. Ta dva faktorja sta le del celote, ki določa stabilnost površine in posredno vpliva na gradnjo linearnih objektov kot so ceste, železnice, razni vodi, itd. Kot osnovni podatki za nadaljnjo digitalno obdelavo podatkov so bili vzeti satelitski posnetki območja Črnega Kala, posneti s satelitom Landsat 5 TM. Osnovnim posnetkom je bilo povečano (raztegnjeno) območje kontrasta z namenom, da se povečajo razlike med elementi na njih. Obdelava z Laplaceovim in 2dfdxdy filtroma je dala kot rezultat posnetke s poudarjenimi elementi in njihovimi robovi. Med možnimi barvnimi zloženki so bile za nadaljnjo obdelavo izbrane najprimernejše. Za klasificiranje barvnih zloženkov smo uporabili dve metodi. Za barvno zloženko iz osnovnih posnetkov 1, 2 in 7 smo uporabili nenadzorovano klasifikacijo in za barvno zloženko iz osnovnih posnetkov 2, 4 in 6 nadzorovano klasifikacijo. S primerjavo z geološko karto smo dobili rezultate natančnosti klasifikacije. Natančnost nenadzirane klasifikacije je dosegla 56,5%, natančnost nadzirane klasifikacije pa 65,2%.

Abstract

Main purpose of this paper is to provide an answer to the question of usefulness of satellite images in engineering geological mapping on larger scales (1:10.000 or larger). We tried to determine if the remote sensing (RS) is suitable for locating fac-

tors such as lithology and presence of faults. These factors, among others, define stability of the surface and indirectly affect on construction of linear infrastructure objects e.g. roads, railroads, various pipelines etc. On Landsat TM images of Črni Kal area, a digital image processing was conducted. Stretching of contrast was performed on basic TM bands images for purpose to enhance and separate image features. Filtering with Laplace and 2d fxdy filters produced images that emphasise edges and entities. Before classification of images was performed, most suitable colour composites were selected. Two different classification methods were used, an unsupervised classification for colour composite of bands 1, 2 and 7, and supervised classification for colour composite of bands 2, 4 and 6. After the classification, the accuracy for both classification methods were calculated - accuracy of geology features for unsupervised classification reached a 56,5%, and for supervised classification it reached a 65,2%.

Uvod

V geologiji je vse bolj čutiti potrebo po sodelovanju z drugimi področji znanosti. Dandanes je uporaba računalniških sistemov praktično neizogibna, saj je z njimi obdelava številnih podatkov veliko enostavnejša, učinkovitejša in nepristranska. Vse vede, ki se ukvarjajo s prostorsko problematiko, se srečujejo z ogromnim številom podatkov. **Geografski informacijski sistem**, krajše **GIS**, je računalniško podprt sistem, s katerim je mogoča obdelava prostorskih informacij. Največja prednost tega sistema je v možnosti upoštevanja in prepletanja podatkov različnih strok, saj vemo, da prostorski faktorji niso vezani le sami nase, temveč so vedno v soodvisnosti z drugimi faktorji (npr. - plazenje brežin je med drugim odvisno tudi od poraščenosti terena, ki je odvisna od prsti, ta pa je odvisna med drugim od klime, itd.).

Eden izmed pomembnih virov pridobivanja prostorskih podatkov je daljinsko zaznavanje. Daljinsko zaznavanje omogoča splošen pregled nad obravnavanim območjem, kljub potencialni težki dostopnosti. Obenem omogoča prihranek časa in najrazličnejše aplikacije. Nasproti prednostim stojijo omejitve daljinskega zaznavanja, od katerih je najpomembnejša natančnost podatkov.

Daljinsko zaznavanje

Daljinsko zaznavanje je pridobivanje podatkov o objektu s pomočjo elektromagnetnega valovanja s pomočjo senzorjev na zračnih ali vesoljskih platformah in interpretacija le-teh podatkov.

Prednosti in omejitve daljinskega zaznavanja

Glavne prednosti daljinskega zaznavanja glede na talne raziskave so:

- *splošen pregled* - daljinsko zaznavanje omogoča študijo različnih prostorskih oblik in njihovih odnosov
- *možnost opazovanja težko dostopnih/nedostopnih območij*
- *prihranek časa* - hitrejša pridobitev informacij o večjih ozemljih
- *multidisciplinarne aplikacije* - podatki se lahko uporabljajo na različnih področjih,
- *zmanjšanje stroškov*
- *razvoj omogoča vedno večjo natančnost dobljenih podatkov*

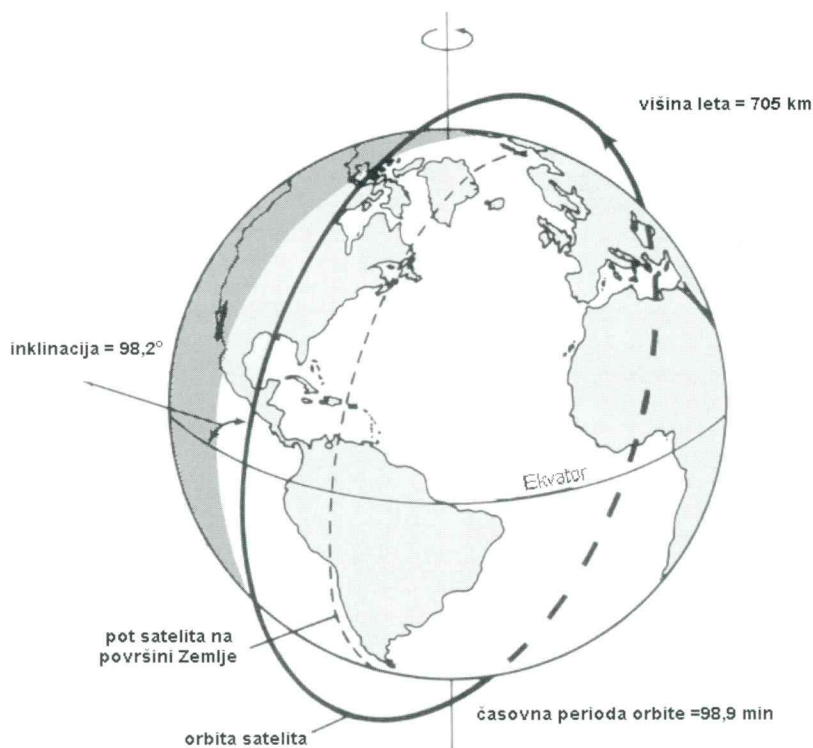
Omejitve daljinskega zaznavanja so:

- zahteve uporabnikov podatkov vedno korak pred tehniko daljinskega zaznavanja
- ločljivost in količina podatkov sta vedno nezadostna.

Misiji Landsat-4 in -5

Kot posledica uspešnih poskusov fotografiranja zemeljskega površja s človeško vodenimi misijami Mercury, Gemini in Apollo, je NASA razvila projekt za orbitalno opazovanje zemeljskih pojavov in zalog brez človeške posadke. Kot že omenjeno, se je projekt prvotno imenoval ERTS, kasneje pa je bil preimenovan v Landsat. S tem projektom je bil postavljen temelj projektom daljinskega zaznavanja in razvoja njegove tehnologije. Glavni razlogi za razvoj tega projekta so bili:

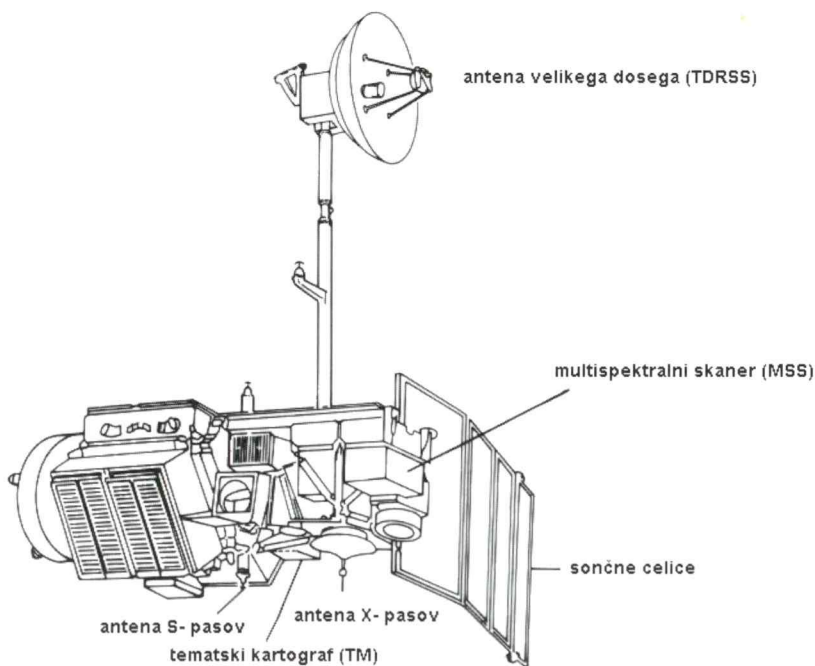
- pridobivanje podatkov z vsega sveta,
- neomejen dostop do podatkov, brez političnih omejitev,
- dostopnost podatkov brez potreb po posebej planiranih misijah,
- precej dobra geometrijska natančnost,
- digitalni podatki so primerni za nadaljno digitalno obdelavo in
- nizka cena.



Sl. 1. Orbita satelita Landsat-4 (Lillesand & Kieffer, 1994)

Orbita

Satelita Landsat-4 in -5 sta bila izstreljena v periodično, cirkularno, Soncu sinhrono, bližnjo polarno orbito. Za razliko od prejšnjih misij je bila orbita spuščena z 900 na 705 km. Vzrok znižanja orbite je bila večja ločljivost dobljenih podatkov in možnost vračanja satelitov na Zemljo z vesoljskim plovilom (Columbia).



Sl. 2. Satelit Landsat-4 in njegova oprema (Lillesand & Kieffer, 1994)

Inklinacija orbite satelitov Landsat-4 in -5 glede na ekvator je $98,2^\circ$ (sl. 1). V enem dnevu preleti satelit dobrih 14,5 orbit, kar pomeni, da za eno orbito porabi okoli 99 minut. Zaradi zemeljske rotacije je razdalja med posameznimi preleti na tleh na ekvatorju 2752 km. Snemanje posameznega pasu se ponovi v 16 dneh. Časovna razlika med satelitoma Landsat-4 in -5 je 8 dni, torej so novi podatki o določenem ozemlju dostopni vsakih 8 dni. Satelit obkroži Zemljo pri obravnavanih misijah 233 krat v šestnajstih dneh. Preleti so oštevilčenih od 001 do 233, od vzhoda proti zahodu, začnjenši s pasom 001 na $64^\circ 36'$ zahodne geografske dolžine in na ekvatorju.

Vse podatke, razen podatkov dobljenih z multispektralnim skenerjem (MSS), ki so tudi zabeleženi na magnetnih trakovih, odda satelit senzorskim postajam na Zemlji. Te so razporejene po vsem svetu, tako da pokrivajo čim večje možno območje. Seveda ostajajo deli, ki jih senzorske postaje ne zajemajo. To so predvsem območja oceanov in nenaseljena območja.

Oprema satelitov Landsat-4 in -5

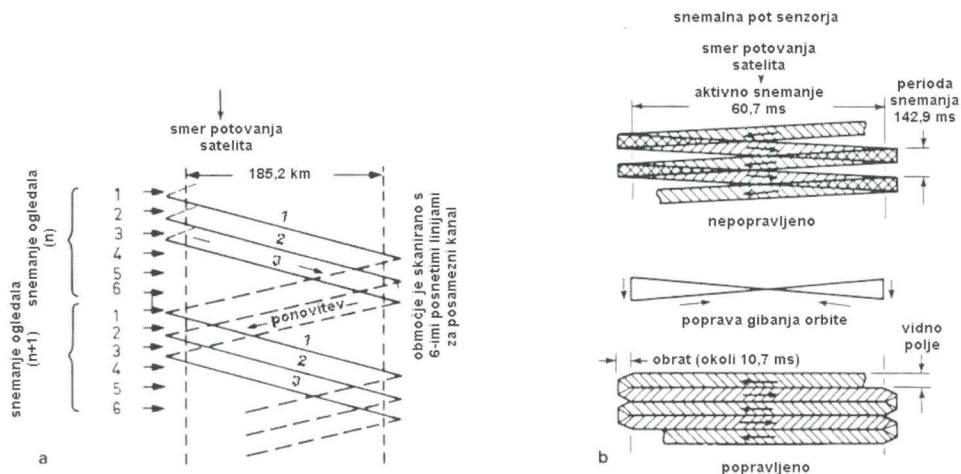
Satelita sta opremljena z multispektralnim skenerjem in s tematskim kartografom (TM). Njuna teža je približno 2000 kg, poleg senzorjev pa nosita še štiri $1,5 \times 2,3$ m plošče sončnih celic za napajanje, anteno velikega dosega za prenašanje podatkov med sateliti (TDRSS - Tracking and Data Relay Satellite System) in dve anteni (X-pas in S-pas) za oddajanje prejetih podatkov na Zemljo (sl. 2).

Multispektralni skener (**MSS**) uporablja nihajoče zrcalo za opazovanje (skeniranje) tal pravokotno na smer leta, ki niha okoli osi vzporedni s smerjo leta satelita. Širina pasu, skeniranega pravokotno na smer leta je 185 km (osnovna MSS scena ima velikost 185×185 km), ločljivost posnetka pa znaša 82 m (osnovna celica ima velikost 82×82 m). Zaradi velike hitrosti satelita (6,47 km/s) in nihanja zrcala s frekvenco 13,6 Hz, ima MSS šest vzporednih detektorjev. MSS zajema podatke s štirimi spektralnimi kanali (območja valovnih dolžin od 0,5 μ m do 1,1 μ m). To so: zelen (kanal 1), rdeč (kanal 2) in dva bližnja - IR kanala (kanala 3 in 4), prvi trije uprabljajo za ojačanje podatkov fotopomnoževalke, četrti pa uporablja silikonske fotodiode. Količina podatkov, ki jih lahko odda MSS senzor s pomočjo anten X-pasu in S-pasu na Zemljo je 15 Mb/s.

Kanala 1 (zelen) in 2 (rdeč) se uporabljata za opazovanje urbanih območij, kjer ločljivost izboljšamo s kanalom 2 zaradi njegovega boljšega prodora skozi atmosfero. S kanalom 1 je moč opazovati vodne objekte, saj je njegova penetracija v vodo zelo dobra. Kanala 3 in 4 se uporabljata za razmejevanje vodnih objektov. Voda ima v območju bližnjega - IR spektra temne tone, prav tako stoječa voda, močvirja, slabo zaraščene vlažne organske zemljine in asfaltne površine. Kanala 2 in 4 igrata pomembno vlogo pri geoloških študijah, 2. kanal zaradi močnejših kontrastov med podatki in 4. kanal (bližnji - IR del spektra) zaradi zaznavanja prisotnosti ali odsotnosti vode v kamninah.

Tematski kartograf (**TM**) je predelan multispektralni skener, skener druge generacije. Deluje v sedmih območjih EM spektra, med 0,45 μ m in 12,5 μ m. Prav tako kot MSS, tudi TM uporablja nihajoče zrcalo za opazovanje tal v pasovih, pravokotnih na smer letenja. Glavne razlike med TM in MSS so:

- TM senzor zajema podatke s sedmimi spektralnimi kanali v vidnem (dodan je kanal za modro barvo), bližnjem, srednjem in termalnem- IR območju,
- izboljšana je spektralna ločljivost glavnih zemeljskih površinskih elementov,
- TM senzor lahko skenira določeno območje v obeh smereh nihanja zrcala (sl. 3b), medtem, ko MSS skenira le v eni smeri (sl. 3a),
- TM ima po 16 vzporednih senzorjev za vse kanale, razen za 6. kanal, ki jih ima le 4,
- TM ima večjo prostorsko, spektralno in radiometrično ločljivost. To mu omogoča 8-bitna (256 nivojev) številčna stopnja,
- vsi kanali imajo ločljivost 30 m (osnovna celica je velika 30×30 m), razen 6. kanala, ki ima ločljivost 120 m,
- možnost prenosa podatkov je pri TM 85 Mb/s.



Sl. 3. Smeri skeniranja za MSS (a) in TM (b) (Gupta, 1991)

Kanali 1, 2, 3, 4, 5 in 7 so med drugim namenjeni boljšemu ločevanju lastnosti vegetacije. Kanal 1 se uporablja pri določanju morske globine, kanala 5 in 7 sta idealna za ločevanje kamninskih tipov, kanal 5 se uporablja za ločevanje med oblaki in snegom, kanal 6 pa se uporablja za vrsto aplikacij termalnega kartiranja. Natančnejši podatki so opisani v tabeli 1. Za kanale 1-4, ki se nahajajo na primarni fokusni ravnini, se uporabljajo silikonska tipala, kanali 5-7 pa se nahajajo na sekundarni, ohlajeni fokusni ravnini zaradi povečanja radiometrične občutljivosti. Za kanala 5 in 7 se uporablja indijevo-antimonitovo (InSb) tipalo, za 6. kanal pa se uporablja živo srebrovo-kadmijevo-telurijsko (HgCdTe) tipalo.

Interpretacija podatkov

Z obdelavo posnetkov in fotografij dobimo skupine rezultatov za nadaljno interpretacijo in aplikacije. Dobljene rezultate se pošlje skozi postopek določitve geotehničnih elementov, kot so oblikovanost pokrajin, vodnih mrež, zemljin, vegetacije in njihovih razpoznavnih znakov, ki so barvni toni, tekstura, oblika, velikost, sence, vzorci in sorodstvene povezave. Način pojavljanja objekta na sliki je odvisen od območja zaznavanja senzorja, v tem primeru senzorjev MSS in TM. Vsi štirje kanali multispektralnega skenerja spadajo v skupino, ki zaznava valovne dolžine območja sončevega odboja, pri tematskem kartografu pa sodi v to skupino šest kanalov (modri, zeleni, rdeči, bližnji - IR in dva kanala za srednji - IR del spektra). Sedmi spada v termalno - IR območje. Različni objekti imajo različne razpoznavne lastnosti. Te so za posamezne objekte podane v tabeli 2.

Tabela 1. Območja delovanja TM senzorjev misij Landsat-4 in -5
(Lillesand & Kiefer, 1994)

KANAL	λ (Mm)	SPEKTER	OSNOVNE APLIKACIJE KANALOV
1	0,45- 0,52	moder	Dobra penetracija vodnih teles; uporaben za obalno kartiranje, ločevanje poraščenih delov od golih, kartiranje tipov gozdov, opazovanje urbanih področij.
2	0,52- 0,60	zelen	Uporaben za merjenje vrhov zelene odbojnosti vegetacije za njeno ločevanje in ocenjevanje moči rasti, opazovanje urbanih območij.
3	0,63- 0,69	rdeč	Uporaben v območju zaznavanja absorbcije klorofila za ločevanje rastlinskih vrst, opazovanje urbanih območij.
4	0,76- 0,90	bližnji- ir	Uporaben za ugotavljanje tipov vegetacije, količine biomase, razmejevanje vodnih teles in za ločevanje zemljin glede na vsebnost vlage.
5	1,55- 1,75	srednji - ir	Uporaben za določanje vsebnosti vlage v rastlinah in zemljinah, ločevanje oblakov od snega.
6	10,4- 12,5	termalni- ir	Uporaben pri analiziranju količine vegetacije, ločevanje zemljin glede na vsebnost vlage in za aplikacije termalnega kartiranja.
7	2,08- 2,35	srednji- ir	Uporaben za ločevanje mineralov in kamnin in za določanje rastlinske vlage.

Interpretacija podatkov, posnetih v termalnem - IR območju

EM valovanje v območju od 3 μm do 35 μm imenujemo termalno - IR valovanje. Tako se imenuje zato, ker zajema zemeljsko sevanje, kot posledico njene lastne toplote, močnejše od energij odboja sončevega sevanja. Uporabne dele območja od 3 μm do 35 μm omejujejo pojavljanja atmosferskih oken (Gupta, 1991). Pri normalnih zemeljskih temperaturah ima sevanje črnega telesa vrh med 9 μm in 10 μm , atmosferska okna pa ležijo med 3 μm in 5 μm , med 8 μm in 14 μm in med 17 μm in 25 μm . Interpretacija podatkov v območju med 3 in 5 μm je zapletena zaradi prekrivanja z območjem sončevega odboja, območje med 17 in 25 μm pa še ni dovolj raziskano. Območje zajema podatkov je najprimernejše med 8 in 14 μm , za satelitsko opazovanje pa je območje opazovanja zaradi ozonske absorbcije pri 9,6 μm skraćeno na del spektra med 10,4 in 12,6 μm . Količina zemljine sevanje energije je odvisna od dveh faktorjev, *površinske temperature* in *stopnje izžarevanja*.

Površinska temperatura, imenujemo jo tudi kinetična temperatura, je odvisna od dveh skupin faktorjev, *toplotnih energijskih virov* in *termodinamičnih lastnosti materialov* (tabela 3).

Tabela 2. Razpoznavne lastnosti objektov (Gupta, 1991)

OBJEKT	MODRA λ	ZELENA λ	RDEČA λ	BL-IR λ	SR-IR 1 λ	SR-IR 2 λ	OPOMBE
<u>listnat gozd</u>		temen	zelo temen	svetel	svetel	temnejši	
<u>iglast gozd</u>		temen	zelo temendo	srednji temen	svetel	temnejši	lisast
<u>goli gozd</u>		svetlo siv	srednje siv do svetel	temni toni			
<u>njive, polja</u>		siva	sr. siva	svetla	svetlo siva	svetlo siva	ogolata polja, vzorci
<u>voda:</u> čista, globoka	temna	temna	črna	črna	črna	črna	
plitva, motna	svetla	svetla	siva	črna	črna	črna	
<u>zemljina:</u> neobdelana	svetla	svetlo siva	svetlo siva	temnejša	siva	temnejša	vzorci
močvirnata		svetlo siva	svetlo siva	temno siva do črna			nepravil., zaplate, mejijo na vodo
<u>sneg:</u> svež	bel	bel	bel	bel	zelo temen	zelo temen	
umazan, stopljen	bel	bel	bel	zelo temen	zelo temen	zelo temen	
<u>urbana območja</u>	svetla	svetlo siva	siva	temnejša			značilni vzorci
<u>infrastruktura</u>	svetlejša	svetlejša	svetlejša	temnejša			linearni vzorci
<u>gole kamnine</u>	svetlejše	svetlejše	sive	sive			
<u>limonit</u>	zelo temen	zelo temen	svetel	svetel			
<u>gline</u> (kaolinit)	svetle	svetle	svetle	svetle	svetle	zelo temne	

Aplikacije širokopasovnega daljinskega zaznavanja v geologiji

Geomorfologija

Geomorfološke značilnosti terena je najlažje opazovati na nočnih posnetkih zaradi razlik v temperaturah, ki so posledica nadmorske višine, vlage v tleh in vegetacije. Nasprotno temu pa dajo dnevni posnetki več podatkov o reliefu.

Tabela 3. Fizikalni faktorji vpliva na stopnjo izžarevanja in kinetično temperaturo materialov (Ellyett in Pratt, 1975)

SPREMENLJIVKA	FIZ. LASTNOSTI	TALNI IN ATM. FAKTORJI	PODFAKTORJI
stopnja izžarevanja	sestava	tip kamnine, zemljine, vegetacije	
	površinska geometrija	površinska oblika talnih objektov	
kinetična temperatura	fizikalne toplotne lastnosti materialov	sestava kamnin, zemljin	
		velikost delcev in poroznost vsebnost vlage	
	Faktorji energijskih virov	sončevo ogrevanje	letni čas
			zemljepisna širina oblaki
			višina sonca lokalni čas
			topografija in orientacija albedo
			atmosfersko vpijanje
		dolgo-valovno sevanje in prenos toplote na stiku ozračja in zemljine površine	temperatura tal
			stopnja izžarevanja temperatura ozračja hitrost vetra vlažnost
			temperatura neba oblaki dež
			nadmorska višina
		aktivni toplotni viri	vulkani fumarole, gejziri ogenj, termalni onesnaževalci

Strukturno kartiranje

Termalno- IR posnetki so nadvse uporabni pri strukturnem kartiranju. Strukturne oblike kot so prelomi, narivi ipd. so opazne zaradi termalnih lastnosti kamnin. Plastovitost in foliacija tvorita na posnetkih subparalelne linije zaradi razlik v kontrastu tvornih plasti. Prelomi in lineamenti so lahko povezani z izviri ali z gibanjem vode proti površini. Ti pojavi povzročajo evaporacijsko ohlajanje vzdolž prelomov.

Litološko kartiranje

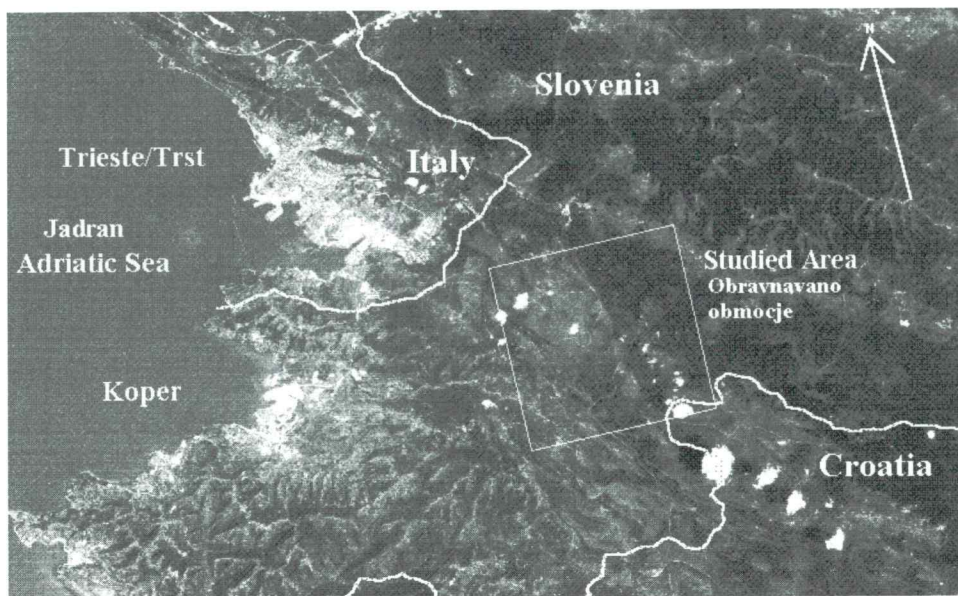
Pri litološkem kartiranju je tako kot pri strukturnem glavni faktor omejitve ločljivost posnetkov, ki znaša za 6. kanal LANDAST-ovih posnetkov 120 m. Zaradi tega se podatki, dobljeni s satelitskim daljinskim zaznavanjem v termalno - IR območju, le redko uporabljajo za taka kartiranja. Ker na termalne posnetke močno vpliva vlaga na površini, jih uporabljajo tudi za hidrogeološke raziskave talne vlage, plitvih vodonosnikov, jezer in izlivov sladke vode v morje.

Aplikacije v inženirski geologiji

Podatki, dobljeni pri daljinskem zaznavanju, se v vedno večji meri uporabljajo tudi v inženirski geologiji. To omogoča predvsem splošen pregled, ki ga učinkovito uporabljamo pri napovedovanju geoloških tveganj in podajanju možnih alternativ in rešitev. Pridobivanje podatkov skozi neko časovno obdobje omogoča spremljanje sprememb skozi čas in možnost analiz vrste „KAJ PA ČE?“.

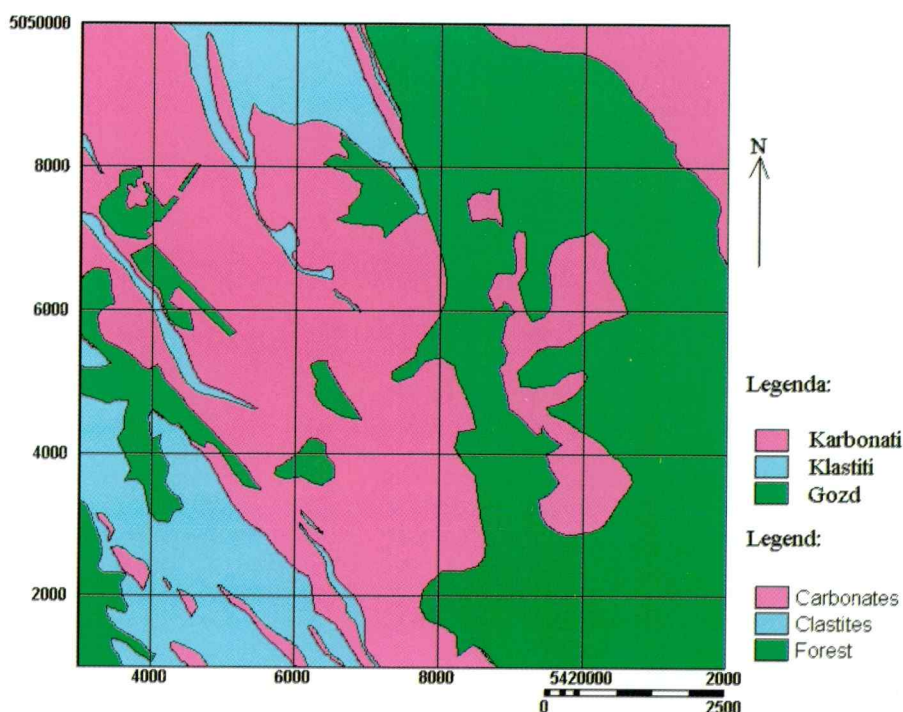
Inženirsko geološki problem določa stopnjo obravnavanja posameznih geoloških oblik in faktorjev. Podatki, ki jih običajno iščemo na satelitskih posnetkih so oblike reliefa, topografija, vodne mreže, litologija, struktura, orientacija, tipi zemljin, prisotnost površinske vlage in lastnosti preperevanja, uporabljajo pa se za:

- določanje obstoječih in napovedi možnih območij plazenj
- določanje najprimernejših tras linijskih objektov
- ocenjevanje ogroženosti zaradi potresov na podlagi neotektonike.



Sl. 4. Položaj obravnavanega območja

Fig. 4. Location of studied area and its surroundings



Sl. 5. Karta stanja na površini

Fig. 5. Real ground data

Obravnavano območje

Vir posnetkov, uporabljenih v tem prispevku so satelitski posnetki iz leta 1993, narejeni s tematskim kartografom (TM) satelita Landsat 5. Obravnavano območje Črna Kala (sl. 4) je bilo izbrano zaradi svoje pestre geologije, saj sestoji iz karbonatnih kamnin kredne starosti (apnenci in dolomiti; vzhodni del območja), paleocenskih apnencev (osrednji del območja) in klastitov (osrednji severni in jugozahodni del območja). Posamezne kamnine so bile združene glede na njihove litološke značilnosti. Gozd predstavlja pomembno oviro pri daljinskem zaznavanju, zato smo ga vključili v karto stanja na površini (sl. 5).

Geologija obravnavanega območja

Kamnine, ki sestavljajo obravnavano območje so kredne, paleocenske, eocenske in kvartarne starosti. Vir podatkov o geologiji je OGK SFRJ Trst ($M = 1:100.000$) (Pleničar et al. 1965) in Tolmač lista OGK SFRJ Trst (Pleničar et al. 1965).

Kreda

Kredne plasti zastopajo karbonatne kamnine, od katerih so najstarejše albijsko-cenomanijski ($K_{1,2}$) dolomiti, breča in apnenec. Nad temi leže plasti cenomanijsko-turonijskega ($K_{1,2}^{2,3}$) rudistnega apnenca z vložki dolomita. Sledijo plasti turonijsko-senonijskega ($K_{2,3}^{2,3}$) sivega in temno sivega apnenca, tem pa plasti temno sivega apnenca z giropleurami, danijske starosti (K_3^3).

Paleocen, eocen

Sem spadajo spodnjepaleocenski (${}_2Pc_1$) kozinski apnenec s haracejami, zgornjepaleocenski (Pc_2) miliolidni apnenec, spodnjeeocenski in srednje-eocenski (E_1) alveolinski apnenec, numulitni apnenec (Pc , E) in foraminiferni apnenec spodnjeeocenske (E_1) in srednjeeocenske (E_2) starosti. Foraminiferni apnenci so debeloplastnati in sive barve. Splošni vpad plasti prevladuje proti severovzhodu v naklonih od 20° do 40° . Narinjeni so v smeri proti jugozahodu na srednjeeocenski fliš, tako da je izoblikovana luskasta zgradba. Luske ter osi sinklinal in antiklinal se vlečejo v smeri SZ-JV. Apnenci so zelo zakraseli, na površini se pojavljajo škraplje in vrtače, pod površino pa kraške jame. Na dnu vrtač je apnenec prekrit s kraško ilovico. Nad slednjimi ležijo plasti laporja z globigerinami srednjeeocenske (spodnje lutecijske) (E_2) starosti, nad temi pa plasti menjavanja peščenjaka in laporja srednje serije eocenskih klastičnih kamnin (fliš). Fliš srednjeeocenske starosti je tanko ali debelo plastnat, ponekod prevladujejo plasti laporja, drugod peščenjaka ali apnenca. Generalni vpad flišnih plasti je proti severovzhodu pod nagibom od 20° do 30° .

Kvartar

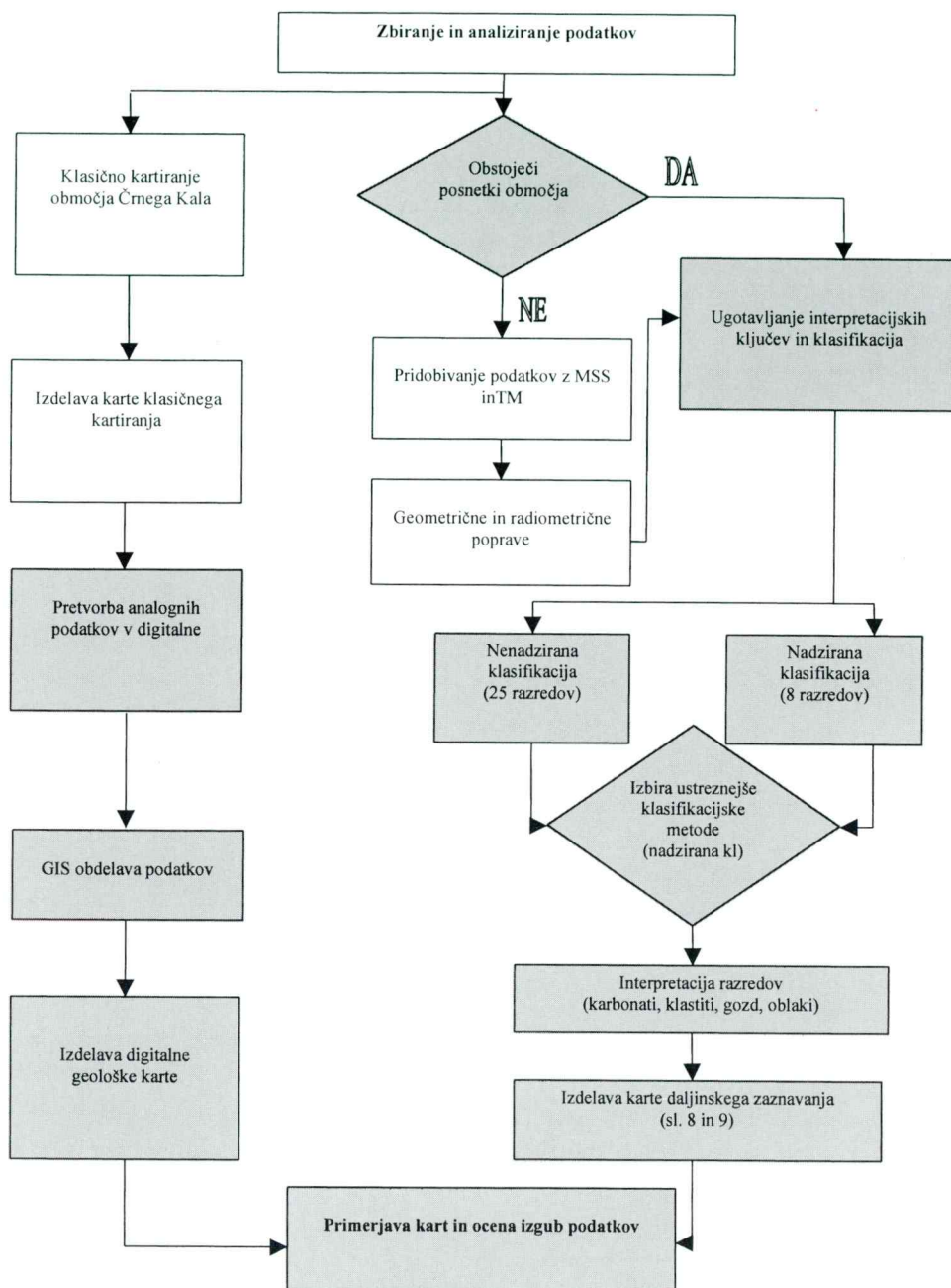
Flišna pobočja so ponekod prekrita z glinasto-grušnatimi nanosi s pobočij (Q_2) debeline od enega do več metrov. Grušč je ponekod sprijet v pobočno brečo.

Digitalna obdelava rastrskih posnetkov obravnavanega območja

Sl. 6 prikazuje izdelavo karte daljinskega zaznavanja za območje Črnega Kala in primerjavo rezultatov tega postopka z rezultati klasičnega geološkega kartiranja. Senčena polja ozančujejo izvedene korake na obravnavanem območju.

Raztegovanje kontrasta

Pri tej metodi se posnetkom umetno razširi številčni interval vrednosti celic. Za posnetke območja Črnega Kala smo uporabili metodo *histogramskega raztega*, pri kateri se natančneje razdeli vrednosti, ki se večkrat pojavljajo na posnetku (območja večje koncentracije celic). Posledica tega postopka so večje razlike in poudarek kontrasta med celicami na posnetku. Metoda je zelo uporabna za določevanje in izločevanje oblikov, ki predstavljajo oviro (s 1. kanalom), njihovih senc (s 4. in 5. kanalom) in za določitev gozdne površine (s 6. in 7. kanalom), služi pa le kot pomoč pri nadaljni obdelavi.

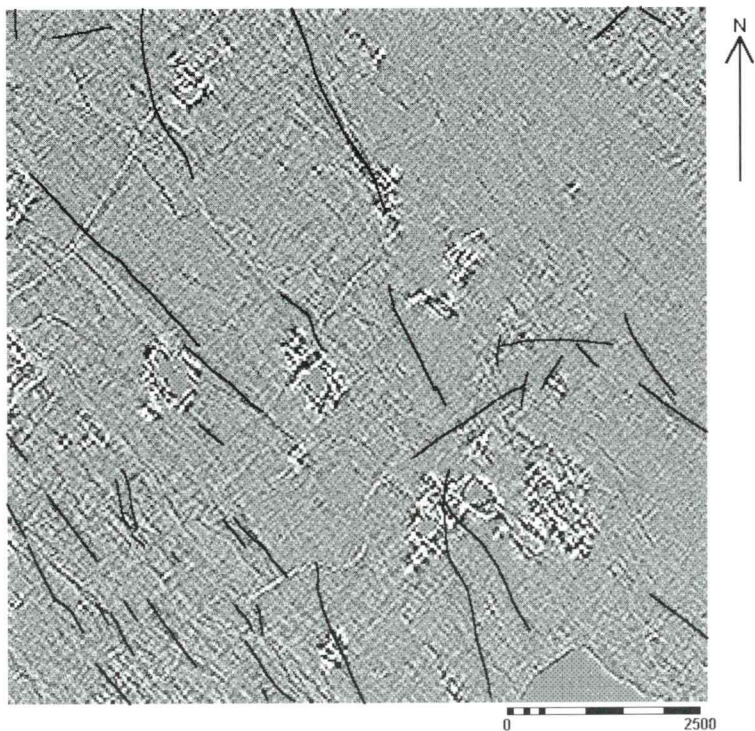


Sl. 6. Postopek izdelave karte daljinskega zaznavanja

Filtriranje

Filtriranje je matematična operacija pri kateri pripišemo celici novo vrednost glede na vrednost sosednjih celic. Matriko, ki določa operacijo filtriranja premikamo preko posnetka, pri čemer vsakokrat posebej izračunamo novo vrednosti celici, ki se nahaja v središču matrike.

Za dano območje smo izvedli postopek filtriranja v dveh korakih. S filtrom izboljšanja robov elementov, ki poudari linijske elemente in spremembe (meje) med objekti je bilo moč določiti ceste in železnico. Prelomi in prelomne cone so najboljše vidni na posnetku, ki je rezultat filtriranja osnovnega posnetka 2. kanala s filtrom $d2fdxdy$. Rezultati so prikazani na sl. 7.



Sl. 7. Posnetek 2. kanala, filtriran s filtrom $d2fdxdy$, prekrit s prelomi (temnejše linije)

Fig. 7. Image of band 2, filtered with $d2fdxdy$ filter, and overlaid with faults (darker lines)

Na posnetku je najjasneje vidna linearna infrastruktura. Območja oblakov in območja izven Slovenije so povsem brez struktur zaradi enotnih vrednosti celic, njihove meje pa so jasno določene. V JZ delu posnetka je moč opaziti večjo koncentracijo linij v dinarski smeri (SZ-JV). To območje sestavljajo večinoma klastične kamnine. Zelo opazen je prelom med klastiti in karbonati v osrednjem vrhnjem delu posnetka. Tu se poraja vprašanje, ali je ta linearna struktura posledica preloma ali pa je posledica

dica železnice, ki poteka skozi ta del območja. Širše gledano se na posnetku pojavljata dve glavni smeri linearnih struktur, od SZ proti JV in NV proti JZ, kar se ujema z znanimi podatki o smereh pritiskov na obravnavanem območju.

Drugi korak, kjer smo uporabili operacijo filtriranja po klasifikaciji, bomo obravnavali v nadaljevanju prispevka.

Barvne zloženke

S kombiniranjem različnih osnovnih kanalov in primerjavo z vektoriziranimi podatki stanja na tleh, smo ugotovili, da so najuporabnejše zloženke, ki jih med drugimi sestavlja osnovni posnetek 6. kanala, saj le-ta nosi največ uporabnih podatkov o infrastrukturi, vegetaciji in geoloških podatkih. Med vsemi barvnimi zloženkami smo za zloženko iz posnetkov kanalov 2, 4 in 6 izbrali nadzirano klasifikacijo, za zloženko iz posnetkov kanalov 1, 2 in 7 pa nenadzirano klasifikacijo.

K o s t w i n d e r (1995) ne uporablja posnetka 6. kanala pri sestavljanju barvnih zloženek, po drugi strani pa daje prednost vizualni selekciji barvnih zloženek pred statistično selekcijo. Posnetek 6. kanala smo uporabili, ker smo dali večji pomen vizualni interpretaciji.

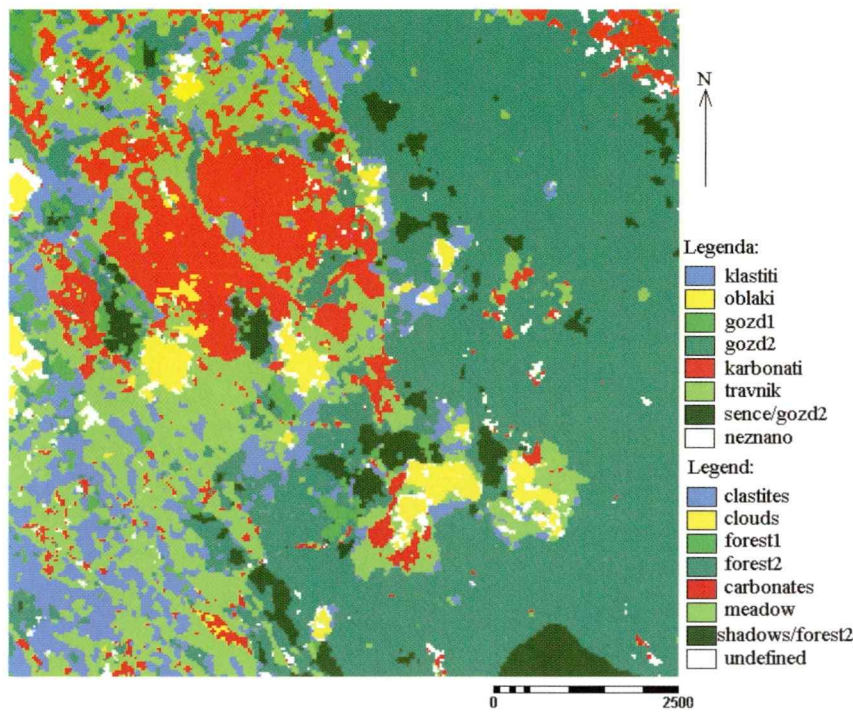
Klasifikacija posnetkov

Pri tem postopku digitalne obdelave podatkov smo izvedli oba načina klasifikacije, da bi določili ustrežnejšega.

Nenadzirana klasifikacija

Nenadzirana klasifikacija je metoda pri kateri računalnik sam porazdeli celice s posnetka v razrede glede na njihove vrednosti. Namen prispevka je bil razlikovati med seboj karbonate, klastite in gozd, zato smo se odločili za nenadzirano klasifikacijo s 25 razredi. Kot že omenjeno, smo nenadzirano klasifikacijo izbrali za barvno zloženko posnetkov 1, 2 in 7. Po končani klasifikaciji smo 25 razredov združili v 8 razredov; karbonate, klastite, gozd 1, gozd 2, travnik, oblaki, sence/gozd 2 in neznano (sl. 8).

Porazdelitev razreda imenovanega „karbonati“ se dobro ujema z litološko enoto foraminifernega apnenca. V SV delu posnetka je opazen kontakt med dolomitom in apnencem, kar pa je lahko tudi posledica gozdne meje. „Klastiti“ se ponekod dobro ujemajo s talnimi podatki, drugod pa se sploh ne ujemajo. Bolj kot po barvi so klastiti opazni po razpršenem vzorcu, predvsem v JZ delu območja. Vegetacija je razdeljena na štiri razrede, „gozd 1“ prevladuje, „gozd 2“ se pojavlja le ponekod in se večinoma združuje s sencami v razred „sence/gozd 2“ in travnik. Oblaki in meglice so združeni v razred „oblaki“.



Sl. 8. Nenadzorovano klasificirana barvna zloženka osnovnih posnetkov kanalov 1, 2 in 7, filtrirana z večinskim filtrom

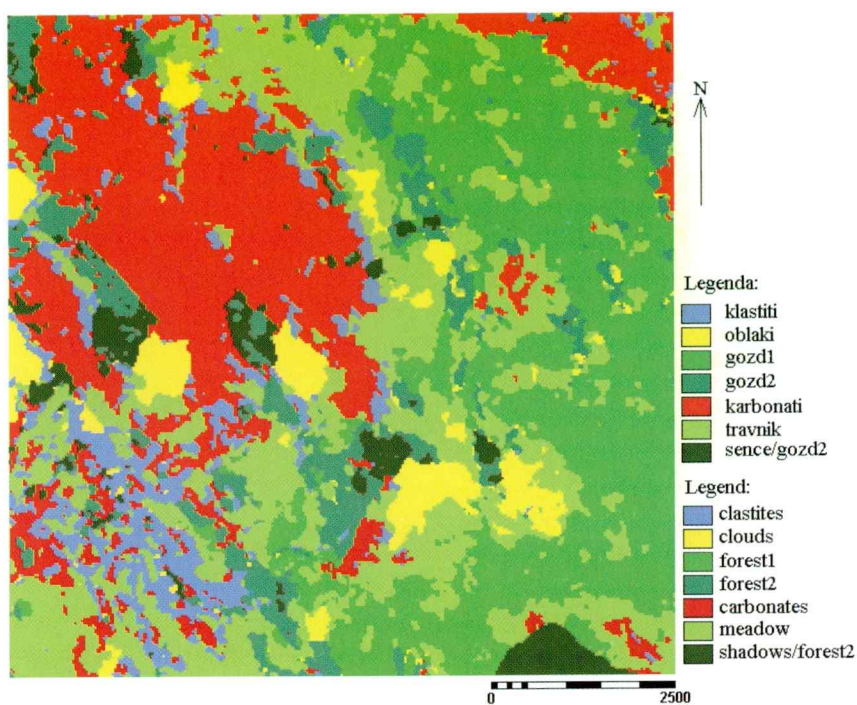
Fig. 8. Color composite of bands 1, 2 and 7, classfied with unsuprevised classification, filtered with the majority filter

Nadzirana klasifikacija

Pri nadzirani klasifikaciji uporabnik določi učne celice, ki predstavljajo reprezentativne vrednosti za posamezne razrede. Na podlagi teh nato računalnik razdeli ostale celice v razrede, katerim so celice najboj podobne. Celice, ki niso podobne nobenemu razredu so definirane kot neznane. Metodo nadzirane klasifikacijo smo izbrali za barvno zloženko osnovnih posnetkov kanalov 2, 4 in 6. Za vsak razred je bilo izbrano zadostno število učnih celic (minimalno $10n$, kjer je n število osnovnih posnetkov v zloženki) (tabela 4).

Tabela 4. Število učnih celic za posamezi razred

razred	karbonati	gozd 1	gozd 2	klastiti	oblaki	sence - gozd 2	travnik
št. učnih celic	1928	2836	110	31	381	386	156



Sl. 9. Nadzorovano klasificirana barvna zloženka osnovnih posnetkov 2, 4 in 6 kanala, filtrirana z večinskim filtrom

Fig. 9. Color composite of bands 2, 4 and 6, classified with supervised classification, filtered with majority filter

Rezultati nadzirane klasifikacije so prikazani na sliki 9. V SZ delu območja se razred „karbonati“ zelo dobro ujema podatki stanja na površini (sl. 5). Območje „klastitov“, ki v osrednjem severnem delu območja ločuje karbonate, se prav tako dobro ujema z dejanskim stanjem na tleh, na drugih delih posnetka pa o ujemanju ne moremo govoriti, ker je ta slaba ali pa je ni. Vegetacija se pri nadzirani klasifikaciji pojavlja nekoliko drugače kot pri nenadzirani. Tu zasedata večje območje razreda „travnik“ in „gozd 2“, celic razreda „gozd 1“ pa je manj. Oblaki in sence so locirani na istih mestih, kot pri nenadzirani klasifikaciji. Zanimivo je, da prav nobena celica ni bila klasificirana v razred „neznano“.

Postklasifikacijska poprava posnetkov

Po izvedeni klasifikaciji celic na posnetku, smo dobljene posnetke (podobe) filtrirali še z večinskim filtrom, ki ima velikost matrice 3×3 polja. Ta pripíše obravnavani (sredinski) celici večinsko vrednost (vrednost, ki se največkrat pojavlja) glede na vse celice v matriki. S to metodo se znebimo razpršenosti podatkov. Rezultata sta prikazana na sl. 8 in 9.

Natančnost klasifikacij

Da bi določili natančnost nadzirane in nenadzirane klasifikacije, smo prekrili dobljene posnetke (podobe) s podatki dejanskega stanja na tleh. Natančnost nenadzirane klasifikacije po filtriranju z večinskim filtrom je bila za tri glavne razrede (karbonati, klastiti in gozd):

$$\text{NAT}_{\text{NENADZ}} \approx 56,5 \%,$$

natančnost podobe, dobljene z nadzirano klasifikacijo in filtrirane z večinskim filtrom pa je bila:

$$\text{NAT}_{\text{NADZ}} \approx 65,2 \%.$$

Tu je potrebno poudariti, da je dejanska natančnost (natančnost za vse razrede) manjša.

Zaključki

Rezultati digitalne obdelave danega območja so pokazali:

- da sta najuporabnejši barvni zloženki osnovnih posnetkov 1, 2 in 7 za nenedzirano klasifikacijo in 2, 4 in 6 za nadzirano klasifikacijo,
- da je uporaba posnetka kanala 6 dala nepričakovano dobre rezultate,
- veliko uporabnost linearnih in večinskih filtrov.

Kljub uporabi Landsat TM satelitskih posnetkov, ki imajo slabšo ločljivost (30 m), je naloga pokazala njihovo koristnost in uporabnost, ki lahko služi geologu pri njegovem terenskem delu in sintezi prostorskih podatkov.

Daljinsko zaznavanje je uporabno:

- pri določanju lokacij izdankov in erozijskih con, kar je lahko v veliko pomoč geologu pri načrtovanju terenskega dela (gostota kartiranja ali vzorčevanja glede na zapletenost geologije),
- pri določanju območij poraslih z vegetacijo, kjer je potrebno boljše kartiranje,
- pri določanju glavnih tektonskih elementov (prelomov in narivov) z linijskimi filtri,
- pri določanju možnih kontaktov med različnimi litološkimi členi, ki se razlikujejo v barvi, trdnosti in tipu vegetacijskega pokrova,
- kot pomoč pri ugotavljanju dejanskih geoloških mej (redkeje).

V prihodnosti, ko bodo imeli posnetki s satelitov večjo ločljivost (1×1 m ali manj) in bodo metode digitalnih obdelav teh posnetkov ob uporabi nevronske mreže in drugih analitičnih orodij natančnejše, bo uporabnost daljinskega zaznavanja še večja kot je danes.

The application of remote sensing - satellite imagery in engineering geology (study area of Črni Kal, Slovenia)

Preface

After some attempts were made several years ago, the majority of the Slovenian geologists came to the conclusion that our territory is geologically complex and overgrown with forest to the level that the use of remote sensing can not be useful. This belief almost stopped the progress in field of remote sensing (RS). Nowadays, it is time to ruin this purposeless conviction. The improvement of modern photographic techniques, computer processing, GIS, AI, etc. gives us now new, very strong tools, that prove great applicability of remote sensing. The aim of this paper is therefore to do first step in this direction, and to show on practical case the usefulness of modern methods. For this intention we chose an area of Črni Kal in the Primorska Region, Slovenia.

Remote sensing

Main advantages of RS:

- synoptic view of studied area - possibility to study different spatial features and their relationships
- possibility to observe inaccessible areas
- time savings
- multidisciplinary applications
- cost savings
- development of remote sensing technologies enables improvements in accuracy

Disadvantages of RS:

- demands of users/customers are always one step ahead of RS technology - resolution and wideness of provided data are always insufficient

Study area

Satellite images used in this paper were taken from platform Landsat 5 with the *thermal mapper* (TM). From the georeferenced mosaic of TM images of Slovenia, taken in summer 1993, the study area of Črni Kal (fig. 4) was selected due to its relative rich geologic structure. Area consists of cretaceous carbonates (limestone and dolomite; right part of the image), paleocene limestones (centre of the image), and of clastites (lower left corner of the image). Since forest cover is an important obstacle in RS, it was included in the ground data image as well (fig. 5).

Digital processing of raster images of the study area

In the flowchart below (fig. 10) a process of producing and evaluating a map of Črni Kal area is presented. Shaded fields represent steps that were made on the images of study area.

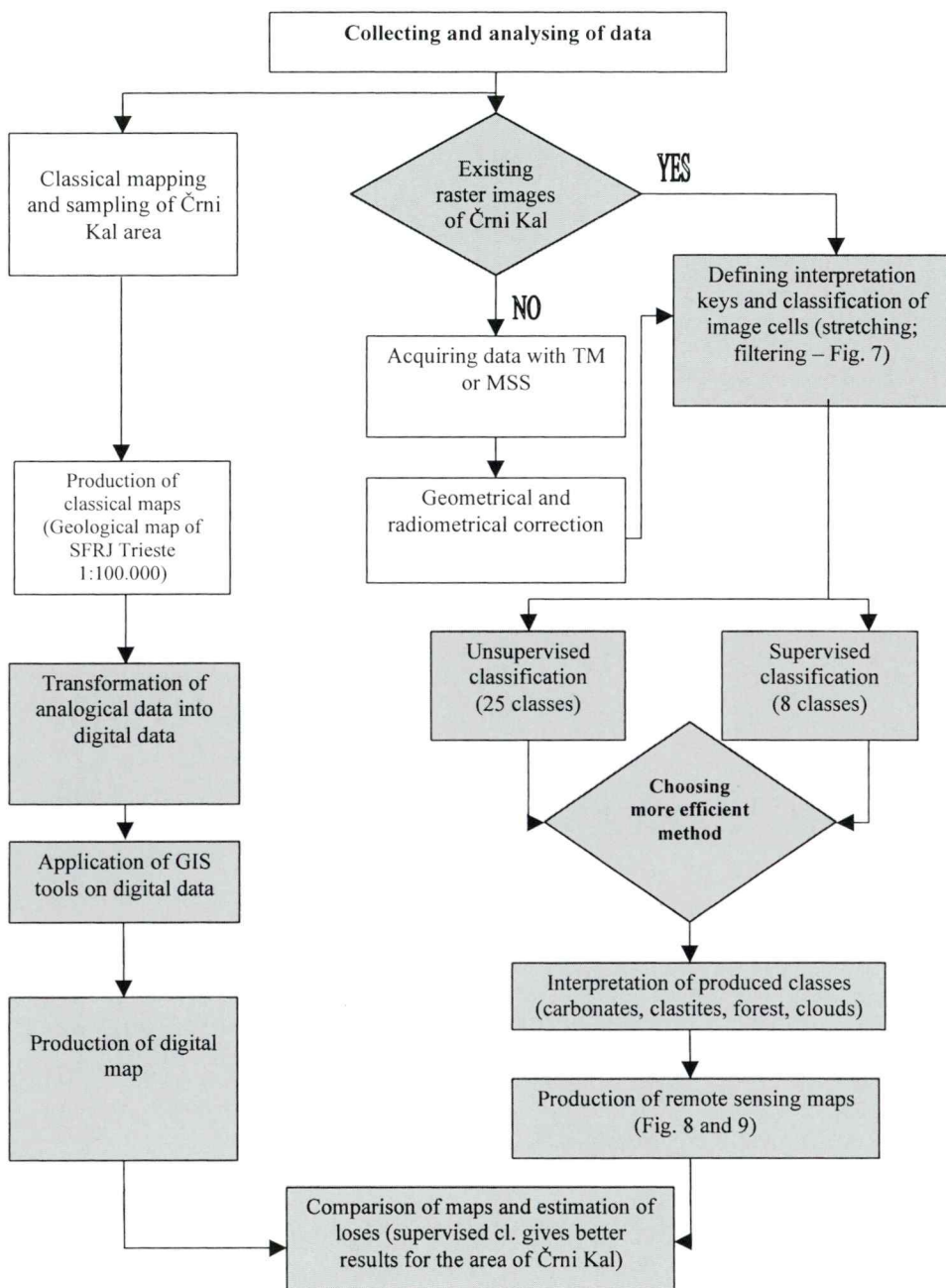


Fig. 10. Process of producing and evaluating a RS map of studied area

Stretching of contrast

For the stretching process of the study area a method of *histogram equalisation stretching* was used, since it stretches the values depending on value concentration in primary image thus emphasising contrasts and differences in image. This was useful in the separation of clouds that represent obstacles (with band 1), with stretched bands 4 and 5 shadows from the clouds were defined, and with bands 6 and 7 forest cover was determined. This method was used solely as help for further image processing.

Filtering

Filtering in two steps was performed. First filter functions to determine linear structures in the studied area were used. With filter *edge enhancement* (original minus Laplace -3×3 matrix) emphasising the entity edges, very good results in locating roads and railway were achieved. Faults and fault zones were better seen on image filtered with *d2fdxdy* filter (5×5 matrix $-d^2 \dots / dx dy$). The results are shown in fig. 7.

Linear infrastructure is clearly defined (most obvious linear entities). Areas of clouds and those outside of Slovenia are completely without structures because of the unique value of cells, but their margins are well defined. In the lower left corner of the image, a higher concentration of lines can be seen, that stretch in the Dinaridic direction (NW-SE). This area consists mainly of clastic rocks. In the middle upper part of the image, a fault on the contact of clastites and carbonates can be seen. Here, a question arises, whether this linear structure is a result of a railway that lies there, or it shows fault structure. Interpretation could also be that linear infrastructure elements often run along fault zones. Wider approach shows that two main directions of linear structures are present in the image, NW-SE and NE-SW. This information coincides with directions of major pressures in the studied region.

Second step, which will be dealt with later in this paper, was using filtering after the classification.

Colour composite

With combining different bands and overlaying them with vectorized ground data it was established that colour composites that consist of band 6 carry most useful data because they more clearly present infrastructure, vegetation and geological data, and hence they would be most suitable for further processing. Colour composites of bands 2, 4 and 6 for supervised, and colour composite of bands 1, 2 and 7 for unsupervised classification were chosen.

K o s t w i n d e r (1995) does not use band 6 for colour composites, but on the other hand he thinks that the visual selection of colour composites is more important than the statistical selection. We used band 6 because we gave privilege to visual interpretation.

Major defectiveness of program package that we used was possibility of combining only three raster images or bands.

Classification of images

In this step of digital image processing both methods of classification were performed to define most appropriate procedure.

Unsupervised classification

Since main purpose of this paper was to differentiate carbonates, clastites and forest, it was decided that 25 classes would be sufficient for successful classification. The colour composite used for unsupervised classification was made of histogram stretched bands 1, 2 and 7. After classification, 25 primary classes were joined into 8 classes; Carbonates (red), Clastites (cyan), Forest 1 (light green), Forest 2 (dark green), Meadow (meadow green), Clouds (yellow), Shadows / Forest 2 (black) and undefined (white) (Fig. 8).

Distribution of class that was named „Carbonates“ matches very well with lithological unit of foraminiferous limestone. In the upper right corner the contact of limestone and dolomite is visible though is possible that this difference derives from a forest boundary. „Clastites“ match in some places with ground data, whilst in other parts of image they do not match at all. More than by their colour, the clastites can be detected by scattered pattern, which is seen in the lower left corner of the image. Vegetation is divided into four classes, „Forest 1“ that prevails, „Forest 2“ that is located only in some parts, and is often combined with shadows from the clouds, and „Meadow“. Clouds and fogs are combined in class „Clouds“.

Supervised classification

With supervised classification, user defines learning cells, which are then representative samples (numerical descriptions) for different classes. Computer then classifies each cell into class that the cell is most similar to. Cells that do not match with any of the classes are valued as unidentified cells. For this type of classification the colour composite of bands 2, 4 and 6 was chosen. For each class a sufficient number (minimum $10n$, where n is number of bands) of learning cells were selected (table 5).

Table 5. Number of learning cells for each class

class	carbo- nates	forest 1	forest 2	clastites	clouds	shadows - forest 2	meadow
Nr. learning cells	1928	2836	110	31	381	386	156

Result of supervised classification is shown in fig. 9. In the upper left quarter of the image, „carbonates“ match with real ground data. Area of „clastites“ that divide carbonates in the middle upper part of the image match almost perfectly with the

ground data. In the other locations, „clastites“ match poorly with ground data, if at all. Vegetation is arranged differently than with unsupervised classification. Here more „meadow“ and „forest 2“ is present, on account of „forest 1“. Shadows and clouds are located on same spots, like with unsupervised classification. It is interesting, that not one cell was classified as undefined.

Postclassification correction of data

After classification was done, filtering with the majority filter was applied onto classified images. The majority filter (3×3 matrix) selects the predominant (most frequently occurring) value or class for each cell from the surrounding cells and assigns that cell into the predominant class. The results are fig. 4 and 5.

Accuracy of classification

To get accuracy of unsupervised and supervised classifications, the resulted images had to be overlaid with real ground data. Accuracy of unsupervised classification for three major classes after filtering with the majority filter was:

$$ACC_{\text{unsup}} \approx 56,5\%,$$

Accuracy for the image produced with supervised classification after filtering with the majority filter was:

$$ACC_{\text{sup}} \approx 65,2\%.$$

It has to be stressed out at this point, that the actual accuracy (for all classes) is lower.

Conclusions

Results of digital image processing of the study area have shown that:

- the most appropriate colour composite for supervised classification was that of 2nd, 4th and 6th band, and for unsupervised classification that of 1st, 2nd and 7th band,
- band 6 showed unpredictably good results,
- great usefulness of linear and majority filters.

Tests of applicability of RS on area of Črni Kal, despite the use of TM images that can provide us with only coarse data, have shown some results, which are useful for geologist in his filed work and for synthesis of spatial information.

RS is useful for:

- determination of bare rock sites and erosion zones, which enables better planning of field work (density of mapping due to complexity of geology),
- determination of areas covered with vegetation, where more detailed mapping in necessary,
- defining general tectonic elements (faults and thrusts) with linear filter,

- determination of probable contacts between different lithological types that differ in colour, solidness and types of vegetation cover
- assistance at establishing actual geologic boundaries (seldom mapping).

In the future, when satellites with accuracy of 1×1 m will be launched, and with use of better digital image processing software and other analytical tools as neural networks, etc., the applicability of RS will surely be improved.

If we compare results with classification with seven bands (H a f n e r & K o m a c, 1998), the conclusion is that higher number of used bands and application of neural network technology give better results, even if only for few percents. It is not necessary to emphasise how important each percent is when dealing with accuracy.

Literatura/References

Christensen, P.R., Kiefer, H. H., Chase, S. C. & Laporte, D. D. 1986: A thermal emission spectrometer for identification of surface composition from earth orbit. Commercial applications and scientific research requirements for thermal infrared observations of terrestrial surfaces. - NASA-EOSAT Joint Report, 119-132, Washington.

Gonzales, R.C. & Woods, R.E. 1993: Digital image processing. - Addison- Wesley Publishing Company, 716 p., Detroit.

Gupta, R.P. 1991: Remote sensing geology. - Springer Verlag, 356 p., Berlin.

Kostwinder, H. 1995: Introduction to image enhancement. - International Institute for Aerospace Survey and Earth Sciences, 4/1 - 4/13, Enschede.

Lillesand, T.M. & Kiefer, R.W. 1994: Remote sensing and image interpretation. - John Wiley & Sons, 750 p., New York.

Pleničar, M., Polšak, A. & Šikić, D. 1965: Osnovna geološka karta SFRJ Trst 100.000 (Geological map of SFRJ Trieste 1:100.000). - Zvezni geološki zavod, Beograd.

Pleničar, M., Polšak, A. & Šikić, D. 1965: Tolmač lista Trst. Osnovna geološka karta SFRJ 1:100.000 (Explanatory text for sheet Trieste. Geological map of SFRJ 1:100.000). - Zvezni geološki zavod, 68 p., Beograd.

Reeves, R.G. 1968: Introduction to electromagnetic remote sensing with emphasis on applications to geology and hydrology. - Am. Geol. Inst., Washington.

Sabins, F.F. JR. 1987: Remote sensing principles and interpretation, 2nd ed. - Freeman and Company, New York, 449 p., New York.

Vickers, R.S. & Lyon, R.J.P. 1967: Infrared sensing from spacecraft - a geological interpretation. - Proc. Thermophysics Spec. Conf., Am. Inst. Aeronautics Astronautics, 67-284, Washington.

Zavod republike Slovenije za statistiko 1993: Georeferencirani mozaik Slovenije izdelan iz podatkov satelita Landsat - TM (Georeferenced mosaic of Slovenia produced from LANDSAT-TM data). - 314,4 MB, Ljubljana.