

Geol. vjesnik	30/2	731—743	5 sl. u tekstu, 15 tabli	Zagreb, 1978
---------------	------	---------	--------------------------	--------------

55:778.35

Daljinska istraživanja i njihova primjena u geologiji

Marinko OLUIĆ

Industroprojekt, Savska c. 88a, YU—41000 Zagreb

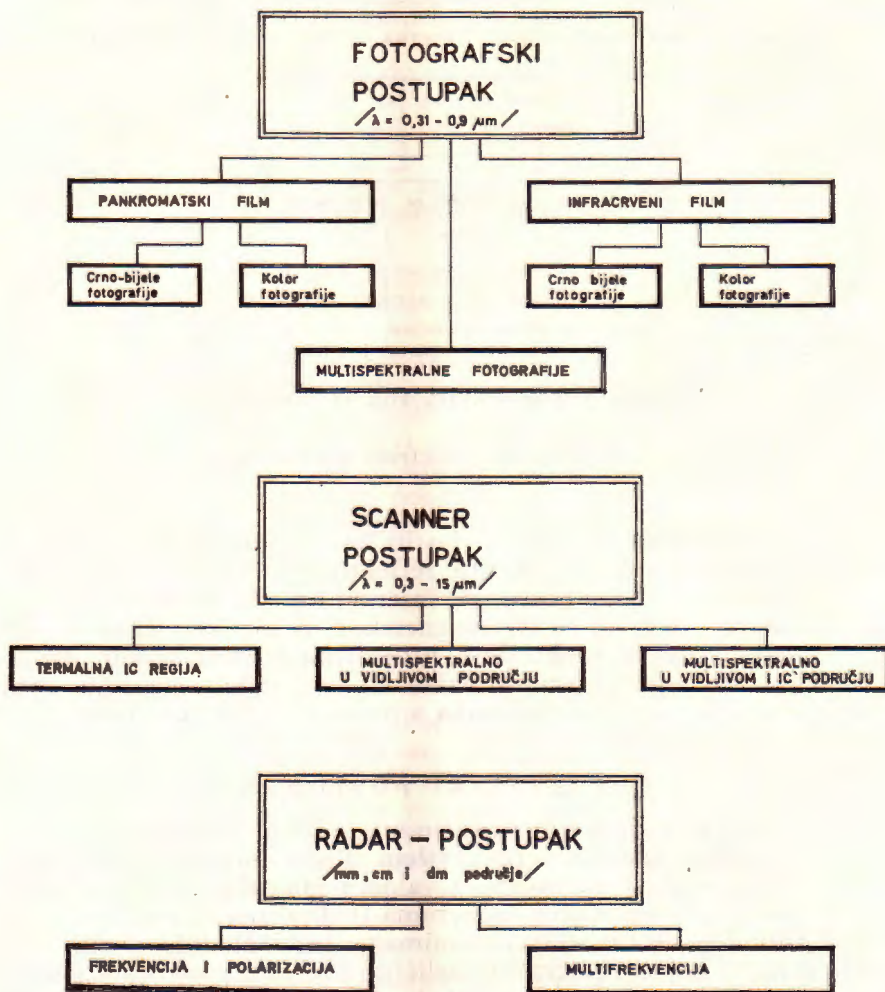
Opisana su snimanja iz aviona i satelita s važnijim postupcima istraživanja koji se temelje na tim snimanjima. Također je prikazan metodski pristup obrade različitih snimaka dobivenih posredstvom aviona i satelita. Navodi se veći broj primjera primjene postupaka daljinskih istraživanja, prvenstveno iz naše zemlje.

UVOD

Daljinska istraživanja Zemljine površine (engl. remote sensing, njem. Fernerkundung, ruski distancionij metod issledovanja) predstavljaju različite postupke koji omogućuju mjerenje i slikovito prikazivanje fizičko-kemijskih svojstava objekata na Zemljinoj površini bez doticaja mjernog instrumenta s objektom istraživanja. U njih može se uključiti i postupak fotointerpretacije pri kojem se analiziraju fotosnimci s ciljem da se identificiraju objekti i ocijeni njihova međusobna povezanost. Svi ti postupci zasnivaju se, u principu, na obradi i interpretaciji konvencionalnih aerofotografija (crno-bijele i u boji), nekonvencionalnih aerofotografija (multispektralne, infracrvene, ultraljubičaste) i nefotografskim senzorima (IC skaneri i dr.). Tako shvaćena daljinska istraživanja omogućuju zapažanje o stanju i procesima koji se odvijaju na površini Zemlje, zatim na vodenim površinama i u atmosferi.

Poznato je da su prve fotografije iz zraka napravljene još pedesetih godina prošlog stoljeća. Smatra se da ih je, po prvi put, primijenio u geološkim istraživanjima francuski geolog Eme Civial (1858—1882). Među prvim fotogeolozima je zasigurno i švicarski geolog A. Heim, koji je već 1898. u balonu preletio planinu Juru i Alpe, vršeci fotogeološka istraživanja.

Međutim, šira primjena aerosnimaka u geološkim istraživanjima provedena je u mnogim zemljama tridesetih godina ovoga stoljeća. Nagli razvoj te discipline uslijedio je poslije Drugog svjetskog rata. Među prvima u našoj zemlji je B. Stepanović 1948. koristio aerosnimke u ispitivanju geoloških odnosa za izgradnju HE na Drini. Poslije pedesetih godina u nas se primjena aerosnimaka počela šire koristiti, najprije u Beogradu, a zatim i u Zagrebu. U nekadašnjem Institutu za naftu, sada



Sl. 2 Važniji postupci daljinskih istraživanja (prema M. Oluiću, 1975).
Text-fig. 2 Main remote sensing techniques (acc. to M. Oluić, 1975).

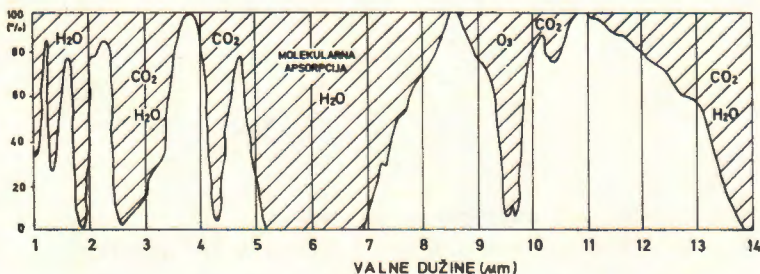
čuju registriranje najvećeg broja podataka na jedinici površine (fotogram 23x23 cm dobre kvalitete sadrži npr. do 8×10^9 pojedinačnih informacija; Haefner, 1975). Snimanjem iz zraka omogućava se na brz način slikovit i topografski prikaz, prema želji velikih dijelova Zemljine površine. Na modelu snimljenog područja koji se promatra plastično pod stereoskopom, moguće je proučavati određene odnose, zapažati i mjeriti različite podatke (topografske, geološke, geografske i sl.). Sistemskim snimanjem moguće je registrirati dnevne, sezonske i godišnje promjene na

Zemljinoj površini (stvaranje delta, pomicanje riječnih korita, proces sedimentacije, pojave vulkanske aktivnosti, klizanje tla, poplave i dr.).

Razvojem znanstvene interpretacije aerosnimaka, koja je u uskoj vezi s metodološkim i tehnološkim napretkom fotografije, te sa mjerenjima na snimcima kao i usavršavanju letjelica, ovaj postupak postaje svakim danom sve značajniji.

Scanner postupak

Pomoću odgovarajućih senzora moguće je snimiti veći dio elektromagnetskog spektra od ultraljubičastog do infracrvenog ($\lambda = 0,31-15 \mu\text{m}$) i učiniti ga korisnim pri različitim istraživanjima. Snimanje ovim postupkom zasniva se prvenstveno na »hvatanju« i registriranju toplotne energije, koju isijavaju objekti na Zemlji, kao i cijela Zemljina površina. Poznato je naime, da svi predmeti u prirodi zrače određenu energiju sve dotle dok je njihova temperatura iznad apsolutne nule. Prema zakonima fizike (Wienov i Stefan-Bolzmannov zakon) ukupno zračena energija nekoga tijela proporcionalna je četvrtoj potenciji njegove apsolutne temperature. Jačina signala oslobođenog u obliku radijacije funkcija je temperature i sposobnosti emitiranja prirodnog izvora zračenja.



Sl. 3 Propusnost atmosfere (infracrveni prozori) u intervalu elektromagnetskog spektra od $1 \mu\text{m}$ do $14 \mu\text{m}$.

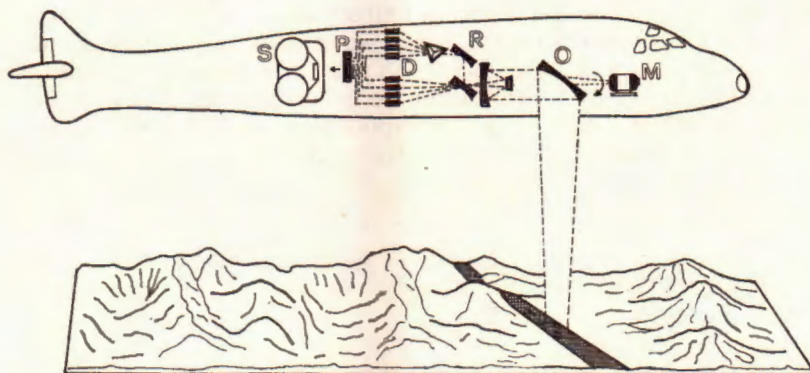
Text-fig. 3 Transmissivity of the atmosphere (infrared windows) in the $1-14 \mu\text{m}$ electromagnetic spectrum interval.

Emitiranu energiju atmosfera će, kao mutni medij, selektivno apsorbirati odnosno propustiti. Zrake određenih valnih dužina će gotovo nesmetano prodirati kroz atmosferu i tako stići do senzora. Postoji više intervala valnih dužina koje će velikim postotkom prolaziti kroz atmosferu. Ti intervali nazivaju se atmosferski ili infracrveni »prozori«. Poznata su uglavnom dva takva prozora koja su pogodna za mjerenja (između $3,0-5,5 \mu\text{m}$ i $8,0-14,0 \mu\text{m}$ (sl. 3).

Postoji više sistema za registriranje elektromagnetskog zračenja u navedenom rasponu. Među njima najvažniji su terminalni i multispektralni skaneri. Takav postupak je pasivan i može registrirati reflektirano sunčevo zračenje kao i emitiranu energiju iz Zemlje i to danju i noću. Koje područje elektromagnetskog spektra će se registrirati ovisi u prvom redu

o primijenjenom detektoru. Jednokanalni skaneri koji rade samo s jednim detektorom u pravilu registriraju IC zračenje u području između 8—14 mikrometara (IC skaneri). S višekanalnim sistemom, kakav je npr. kod multispektralnih skanera, moguće je snimiti različite »uske« intervale elektromagnetskog spektra i to u više od 20 kanala.

Za razliku od fotografskog snimanja gdje se u datom momentu snimi veća površina (snimak), skanerom se detektira, u određenom momentu, samo mali dio površine (pixel). Taj dio npr. kod snimanja iz satelita LANDSAT-1 iznosi 79×56 m, a kod snimanja iz aviona to je najčešće površina od 1—2,5 mrad². Za snimanje većih površina vrši se kontinuirano detektiranje najčešće u linijama okomitim na smjer kretanja letjelice (sl. 4).



Sl. 4 Princip rada multispektralnog skanera.

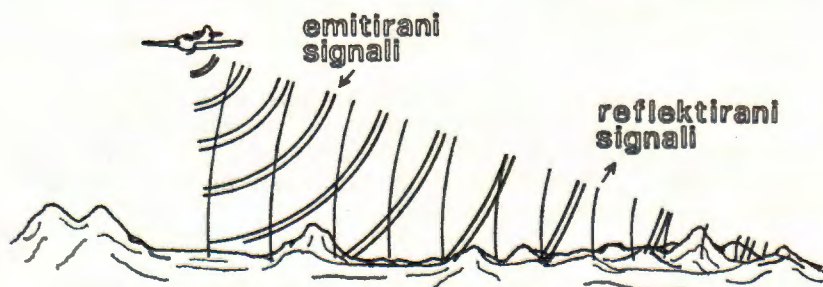
Text-fig. 4 Multispectral scanner — principle of operation.

Zračenje iz djelića površine (pixel) Z dolazi na rotirajuće ogledalo O, odakle se usmjerava na optički uređaj, preko kojeg se vodi na uređaj za spektralno razlaganje (R), odnosno na detektore D. Iz detektora zrake odlaze na pojačivač gdje se ulazeći optički signali mijenjaju u električne signale koji se elektronski pojačavaju. Iz pojačivača izlaze podaci koji se prikazuju u različitim oblicima: na monitoru, magnetskoj traci, filmskoj traci i dr.

Iz snimljenih podataka moguće je pod određenim uvjetima registrirati temperaturu, odnosno temperaturne razlike na Zemljinoj površini. Prikaz temperaturnih razlika vrši se najčešće tako da se indirektnim putem izrade crno-bijele fotografije (termografije ili skanogrami), čiji sivi tonovi odražavaju temperaturne odnose na snimanom terenu (tab. V) ili se snimljeni podaci s magnetske trake direktno uvode u računski stroj. O principu rada i tehničkom izvođenju termalnog-skaner snimanja već je u nas pisano (Oluić, 1969; Đorđević, 1974; i dr.).

Radar postupak

Do sada opisani postupci istraživanja iz zraka pripadaju pasivnoj grupi. Međutim, radar postupak (engl. Side Looking Airborne Radar — SLAR) se u osnovi razlikuje od prethodnih, jer posjeduje vlastiti izvor energije (aktivna grupa) i koristi zračenje u mikrovalnom području, približno od 1 do 100 cm valne dužine. Izvor energije je generator koji proizvodi električne impulse određene frekvencije i trajanja. Ti se impulsi u odašiljaču prevode u visoko frekventne impulse i pomoću antene usmjeruju i odašilju najčešće okomito na smjer kretanja letjelice. Dio energije reflektiran od objekata ponovo se »hvata« i registrira (sl. 5).



Sl. 5 Princip snimanja pomoću radara.

Text-fig. 5 Radar survey principle.

Snimanje podataka ovim postupkom neovisno je od prirodnog zračenja, dnevne svjetlosti i meteoroloških uvjeta, pa se može izvoditi danju i noću, u svim vremenskim prilikama, jer mikrovalovi gotovo nesmetano prodiru kroz kišu, maglu i oblake. Radarski signali većih valnih dužina (dm i m područja) također prodiru kroz vegetaciju i reflektiraju se tek od stijenskog pokriva ili vodenih površina. Zbog toga su radarska snimanja osobito pogodna u prekrivenim područjima, jer se kontrast zbog vegetacijskog pokriva prividno ublažava, odnosno dobiva se dojam kao da je uklonjen (Tab. VI gore). Ova je činjenica važna zbog toga što se izraz reljefa i obrisi geoloških struktura vrlo dobro ističu. To omogućava egzaktno topografsko i geološko kartiranje morfologije, dolinske mreže i drugih struktura koje se na aerosnimcima često ne mogu prepoznati i registrirati.

Podaci dobiveni radar postupkom najčešće se prikazuju na filmu, odnosno fotografijama koje su slične onim što se dobiju fotografskom tehnikom. Takve se fotografije izrađuju u trakama na kojima se prikazuje teren širine približno 20 km pri visini letjelice od oko 8 km (tab. VII). Antena dužine oko 3 m, pri valnim dužinama emitiranih zraka od 0,9 cm i dužini impulsa od 0,1 sek, dozvoljava identificiranje objekata na Zemlji minimalnih dimenzija od oko 20 m. Tonalne odlike takvih snimaka u mnogom se približuju odlikama IC crno-bijelih fotografija, a ovisе uglavnom o mogućnosti refleksije objekata (stupanj hrapavosti

površine), njihovu obliku, strukturi i položaju u prostoru, kao i stupnju vlažnosti, poroznosti i sl. Posebno su tipične »radarske sjene« koje se javljaju kod jače nagnutih objekata ili nagiba zemljišta, pa tako jako naglašavaju izraz reljefa, a time omogućuju bolju analizu i interpretaciju podataka.

Prva upotreba radara, izvan vojnih potreba, primijenjena je u različitim istraživanjima izvedenim 1967. godine u Panami. Tada su zapažene neke prednosti radarskog snimanja nad fotografskim. Nakon toga, osobito od 1972. radarska snimanja su u stalnom porastu, pa su u pojedinim zemljama kao npr. SAD, Kanadi, Venezueli, Indoneziji, Australiji i dr., radarom snimljene velike površine, a dobiveni su snimci uspješno korišteni u izradi topografskih karata, te geološkim i drugim istraživanjima. Do sada u našoj zemlji nisu vršena radarska snimanja u civilne svrhe.

Osim navedenih, postoje i daljnji različiti postupci daljinskih istraživanja kao što su: televizijski, pasivni mikrovalni, aktivni skaner postupa, radiometar, spektrometar, scatterometar i dr. Njima još uvijek pripada manja uloga u geoistraživanjima u odnosu na opisane postupke i još su uglavnom u eksperimentalnoj fazi.

OBRADA I INTERPRETACIJA PODATAKA DOBIVENIH METODOM DALJINSKIH ISTRAŽIVANJA

Druga faza u radnom procesu daljinskih istraživanja je obrada (analiza) podataka dobivenih navedenim postupcima, kao i interpretacija istih. Razlikujemo više načina kojima se snimljeni podaci prikazuju: u obliku slike kao analogna veličina, na magnetskoj vrpici u analognoj ili digitalnoj formi. Pri tome je važno da se podaci prezentirani na jedan mogu prikazati i na drugi način; pa se npr. jedna fotografska slika može obraditi digitalno.

Također postoji više sistema i kombinacija kojima se dobiveni podaci mogu obrađivati, pri čemu su, načelno, važne dvije faze rada i to priprema podataka i dobivanje željenih informacija.

U fazi pripreme podataka izvode se slijedeći radovi:

- geometrijske ispravke (uklanjanje pogrešaka),
- radiometrijske ispravke (uklanjanje faktora smetnji),
- geometrijske transformacije (ortofoto),
- fotografske transformacije (Agfa Contour-film),
- elektronske transformacije (elektronski denzitometar),
- optičke transformacije (analogno-digitalno),
- kombinacija-zbrajanje slika iz više kanala (kolor-kompozit) itd.

U drugoj fazi vrši se analiza u svrhu dobivanja informacija, pri čemu glavnu ulogu igra čovjek — kao analizator, koji se često služi različitim optičko-mehaničkim pomagalicama.

Praktična primjena postupaka daljinskih istraživanja po svom opsegu je veoma različita. U svim zemljama svijeta, pa i kod nas, fotografski

postupak se najviše primjenjuje. O primjeni konvencionalnih i nekonvencionalnih aerosnimaka u nas, osobito o njihovoj primjeni u geološkim istraživanjima, dosta je pisano (Dimitrijević, 1958; Marković, 1967; Oluić, 1970, 1972, 1973b; Tonejec i dr. 1974. i dr.).

Iako se multispektralne fotografije u nas zasada još ne koriste, one su u nekim zemljama (npr. SAD) već duže vremena u upotrebi. Kod njih se najčešće ujedinjaju slike iz pojedinih spektralnih područja (kolor-kompozit), a identificiranje objekata obično se vrši pomoću projektora kojim se omogućava zbrajanje, ili razlaganje boja-tonova (npr. I²S — Mini — Addcol — Viewer, model 6000 SAD).

Podaci dobiveni skaner-postupkom najčešće se prikazuju na magnet-skoj vrpici, ili fotografiji koja je, naizgled, slična konvencionalnoj fotografiji. Međutim, kod tih fotografija različiti sivi tonovi predstavljaju toplotne vrijednosti, pa takvu sliku najčešće nazivamo skanogramom ili termogramom. Interpretacija podataka je vizuelna (analogna) ili strojna (digitalna). U dosadašnjoj praksi u SAD termalna skanerska snimanja dala su najbolje rezultate pri kontroliranju temperature u vodenim sredinama (zagađenje rijeka otpadnim vodama), rudarske halde i kontrola šumskih požara (Albertz, 1975). U Njemačkoj su takvim snimanjem dobiveni vrijedni podaci pri izradi meteoroloških studija, osobito lokalnih, kao npr. za Rursku oblast, područje Frankfurta, dolinu gornje Rajne, zagađenost rijeka i sl. (Schneider, 1974). Vršena su i brojna termalna snimanja u cilju istraživanja mineralnih sirovina i dr.

Radarski postupak zasniva se, kako je već rečeno, na posve drugoj tehnici, premda se dobiveni podaci najčešće prikazuju na fotografijama sličnim po izgledu infracrvenim crno-bijelim snimcima. Obrada podataka vrši se najčešće vizuelno na stereo modelu. Primjena ovih fotografija namjenjena je, prije svega, za izradu slika — karata u sitnom mjerilu (1:100.000 do 1:400.000) u teško prohodnim i prekrivenim područjima. Na snimcima se vrši analiza i drugih podataka kao što su geološki, geomorfološki, hidrogeološki itd. Ovim postupkom snimljena su velika područja u SAD, Južnoj Americi, jugoistočnoj Aziji, Australiji i dr. Snimljeno je preko 10 milijuna četvornih kilometara, a snimanje je uglavnom izvršila američka firma »Goodyear Aerospace Corp.« (Leberl, 1976).

Prijenos podataka iz snimaka dobivenih navedenim postupcima u topografsku podlogu može se izvršiti vizuelno i instrumentalno. Posljednji način je sve češći u primjeni, jer se industrija pobrinula da za tu potrebu izradi odgovarajuće instrumente. Jedan od vrlo pogodnih instrumenata za prijenos podataka iz snimka u kartu je stereo ZOOM TRANSFERSCOPE od firme Bausch & Lomb (SAD).

Od 1957. kada je lansiran prvi umjetni Zemljin satelit, počela je nova epoha u istraživanju, kako svemirskih prostora, tako i Zemljine površine. Od tada do danas lansiran je ogroman broj različitih satelita i izvršena su opsežna i raznovrsna snimanja Zemljine površine. Dobiveni podaci uspješno se koriste u mnogim znanstvenim i praktičnim oblastima.

Podaci satelita najčešće se prikazuju u obliku fotografija i skanograma. Dešifriranje podataka se vrši vizuelno, ali je sve više prisutna tendencija računsko-digitalne obrade, čime se omogućava pojačavanje kon-

trasta, odnosno povećanje kvalitete slike. Računskom obradom podataka snimljenih na magnetsku vrpcu postiže se preko 50% više informacija, nego s papirnatih pozitiv kopija (slika).

Snimci napravljeni iz satelita prekrivaju velike površine, što omogućava sinoptički pregled snimljenog područja. Analiza takvih snimaka u bitnom se ne razlikuje od analize aviosnimaka, pri čemu su najvažniji slijedeći kriteriji: veličina, boja-ton, kontrast u odnosu na okolinu, oblik i raspored. Posebno se dobro zapažaju na satelitskim snimcima linearni oblici (rasjedi, pukotine, segmenti riječne i dolinske mreže i dr.) koji se manifestiraju kroz njihove fiziografske osobine: uglavnom morfologiju, hidrografiju, vegetaciju, razlike u tonu i teksturi. O karakteristikama satelitskih snimaka i mogućnosti njihove primjene već je u nas pisano (Oluić, 1975, 1976).

Za nas su osobito važni snimci — skanogrami dobiveni posredstvom američkih satelita LANDSAT-1 i LANDSAT-2, te orbitalne stanice SKY-LAB (tab. XI, XV), s obzirom da je snimljena i naša zemlja, pa za cijeli teritorij posjedujemo skanograme snimane u različito vrijeme. Osobito se dobri rezultati postižu primjenom skanograma dobivenih posredstvom LANDSAT-1 i LANDSAT-2, čime se omogućava stereoskopsko promatranje terena. Pomoć u analizi postiže se također upotrebom (pod stereoskopom) snimaka iz kanala 5 i 6, ili 7 istovremeno. Na taj način moguće je direktno ukrštanje informacija sadržanih u svakom spektralnom intervalu sa »pseudostereoskopskim efektom«.

NEKI PRIMJERI PRIMJENE

Prva snimanja iz zraka izvođena su u nas u pankromatskoj crno-bijeloj tehnici. Dobiveni fotogrami našli su široku primjenu u regionalnim naftnogeološkim istraživanjima, kao i u okviru izrade Osnovne geološke karte Jugoslavije. Tek poslije 1970. u našoj se zemlji provode i druga snimanja, kao npr. snimanje u boji i u infracrvenoj tehnici. Danas se gotovo u svim geološkim istraživanjima od regionalnih do detaljnih koriste različite vrste aerosnimaka kao dobro pomoćno sredstvo, a ponekad, zbog obilja podatak koje snimci pružaju, čine okosnicu istraživanja.

Gotovo cijela površina zemlje prekrivena je različitim aerosnimcima. Njihova primjena dala je, u kombinaciji s drugim metodama istraživanja, vrlo dobre rezultate u istraživanju nafte i plina u području Vanjskih i Unutrašnjih Dinarida, kao i u Panonskom bazenu.

Analiza različitih aerosnimaka uspješno je primijenjena u istraživanju mineralnih sirovina. Dobri rezultati su dobiveni u istraživanju bakarnih orudnjenja u istočnoj Srbiji za što su korišteni aerosnimci u boji i infracrvenoj tehnici. Primjena crno-bijelih i kolor snimaka u istraživanju boksitnih ležišta u području Bukovice (sjeverna Dalmacija) također je bila od velike pomoći, zatim u istraživanju ukrasnog kamena i sl. Pankromatski i infracrveni aerosnimci našli su u nas široku primjenu u inženjerskogeološkim i hidrogeološkim istraživanjima osobito kod projektiranja sanacija, saobraćajnica, naftovoda, plinovoda, hidroenergetskih objekata i sl.

Industroprojekt je, u suradnji s firmom »DAEDALUS« — Ann Arbor (SAD) i VGI — Beograd, 1974 god. izvršio u nas prva pokusna snimanja multispektralnim skanerom na odabranim lokalitetima, za koja su izrađene termalne slike — karte. Ta snimanja, iako su još u eksperimentalnoj fazi, nagovještavaju značajne mogućnosti primjene u određenim istraživanjima.

Dosadašnja obrada satelitskih snimaka dala je vrlo dobre rezultate u geološkim istraživanjima, a posebno u istraživanju mineralnih sirovina, i pridonijela su određivanju zona pojačane seizmičke aktivnosti (Oluić, 1975. i dr.).

Na kraju, može se konstatirati da je tehnologija snimanja objekata iz zraka i svemira veoma napredovala i mogućnosti njenog daljnjeg razvoja jedva se mogu sagledati. Nasuprot tome obrada podatak je u zaostajanju. Danas je relativno lako snimiti mnoštvo različitih podataka, ali iz njih izvući korisne informacije još uvijek predstavlja osjetne poteškoće. Iznimku čini konvencionalna fotografija kod koje iskustva postignuta kroz više desetljeća omogućavaju relativno brzo i točno određivanje podataka. Predstoje nam mnogi naponi u svrhu daljnjeg razvoja metoda obrade podatak, stjecanja potpunijeg znanja o fizikalnim osobinama objekata, ekološkim odnosima, boljoj korekturi utjecaja faktora smetnji i slično.

Međutim, dosadašnjom primjenom navedenih postupaka u geološkim istraživanjima dobiveni su vrijedni podaci u relativno kratkom vremenu, čija preglednost i preciznost poboljšava i usmjerava detaljne terenske radove. Na taj način postiže se veća ekonomičnost istraživanja i kvalitetnija obrada podataka.

Neki od navedenih postupaka još su u razvoju dok su drugi uspješno provjereni u praksi. No, u budućnosti možemo očekivati da će ova metoda, obzirom na njeno intenzivno razvijanje dati još bolje rezultate, potvrđujući tako svoje osnovne odlike: brzinu, točnost i ekonomičnost.

Table u koloru uz ovaj rad tiskane su uz financijsku potporu »Industroprojekta«, OOUR za kompleksna geološka istraživanja.

LITERATURA

- Albertz, J. (1976): Fernerkundungssysteme und ihre Anwendung in Deutschland. »Geodetische Woche Köln 1975«, 301-311, Stuttgart.
- Dimitrijević, M. (1958): *Fotogeologija*. Poseb. izd. Zavoda geol. geof. rud. istr. br. 3, Beograd.
- Đorđević, V. (1974): Termalno snimanje — termografija. — *Zbornik radova Vojnogografskog instituta*, 173—180, Beograd.
- Haefner, H. (1975): Möglichkeiten und Grenzen der Dateninterpretation zur Methodik der Interpretation von Fernerkundungsdaten — *Festschrift Dr. Bertele, Wild Heerbrugg AG*, 1—12, Heerbrugg.
- Leberl, F. (1976): Imaging radar applications to mapping and charting. — *Photogrammetria*, 32/3, 75—100, Amsterdam.
- Marković, M. (1967): Fotogeološka iskustva sa terena južne Makedonije. — *Zbornik Rud.-geol. fakulteta*, 9—10, 255—265, Beograd.

- Nosan, A. (1973): Termalni in mineralni vrelci v Sloveniji. — *Geologija*, 16, 5—45, Ljubljana.
- Oluić, M. (1969): Novi postupci aeroprospekcije i njihove mogućnosti primjene u geološkim istraživanjima. — *Geodetski list*, 23 (46), 7—9 i 10—12, 184—194, Zagreb.
- Oluić, M. (1970): *Vergleichende photogrammetrische Erfassung von geologisch-geotektonischen Gegebenheiten in morphologisch unterschiedlichen Gebieten*. Disertacija, 136 str. Humboldtuniverzitet, Berlin.
- Oluić, M. (1972): Primjena kolor i infracrvenih aerosnimaka u istraživanju bakarnih orudnjena i njihovih struktura u Timočkoj eruptivnoj oblasti. — *Treće savj. o istr. bakrove mineralizacije na teritoriji SFRJ*, Bor, 10 str.
- Oluić, M. (1973a): Nove metode aeroprospekcije i njihove mogućnosti primjene u Jugoslaviji. — *Tehnika-rudarstvo-geologija-metalurgija*, 24/1, 59—64, Beograd.
- Oluić, M. (1973b): Aerosnimci u boji kao novi element u geološkim istraživanjima boksitnih ležišta. — *Geol. vjesnik*, 25, 313-320, Zagreb.
- Oluić, M. (1975): Daljinska istraživanja (remote sensing) u geologiji s posebnim osvrtom na snimanja iz satelita. — *Tehnika-rud.-geol.-metal.* 26/5, 913-916b, Beograd.
- Oluić, M. (1975a): Tektonska analiza graničnog područja SR Hrvatske i SR Slovenije, izvršena na snimcima napravljenim iz satelita ERTS-1. — *Geol. vjesnik*, 28, 87—96, Zagreb.
- Oluić, M. (1976): Umjetni sateliti i njihovo značenje u istraživanju našeg planeta. — *Priroda*, 65/3, 88—92, Zagreb.
- Schneider, S. i dr. (1974): *Gewässerüberwachung durch Fernerkundung — Die mittlere Saar*. — *Landeskundliche Luftbildauswertung im mitteleuropäischen Raum*, 12, Bad Godesberg.
- Tonejec, M., Verić, F. & Megla, T. (1974): Primjena infracrvene aerofotografije kod istražnih radova i izrade projekta sanacije klizišta Čerević. — *Zbornik radova 3. jugosl. simp. hidrogeol. inž. geol.* 157—170, Opatija.

Remote sensing and its application in geology

M. Oluić

Remote sensing comprises a number of different techniques for the measurement and pictorial presentation of physical-chemical characteristics of areas on Earth, where the instrument used for measurement does not come into contact with the area under investigation. This can be expanded to include photointerpretation as well, which analyzes photographs in order to identify specific areas and evaluate their interconnection. A substantial number of remote sensing techniques based on different principles is currently available. Here we shall present, however, only the techniques on electromagnetic ultraviolet-to-microwave spectrum airborne and satellite detection. The most important of these are the following:

Air photography, providing photographs of different characteristics (black-and-white and color panchromatic, black-and-white and color infrared, and multispectral photographs).

Thermal scanning for the recording of rays of greater wavelengths as well (infrared thermal band). Under specific conditions temperature differences on the surface of the Earth can be recorded.

The radar technique involves an inherent energy source and uses microwave radiation (approximately 1-100 cm). This technique is particularly useful in poorly accessible and vegetation-overgrown areas since radar images seemingly »eliminate« the vegetation cover. The techniques listed above record the reflection or emis-

sion (remission) of electromagnetic radiation, spectral raditaion in particular, of physical or time variations. The most important stages of this work are recording, processing and analysis, data interpretation and reporting.

Some applications of these techniques in geological explorations are listed (geologic mapping; tectonic analyses; engineering geology and hydrogeological investigations; explorations for bauxite and copper ores; etc.).

The colour photographs which accompany this paper are printed with the financial support of the »Industroprojekt« enterprise, OOUR for complex geologic researches.

TABLA — PLATE I

- 1 Pankromatski crno-bijeli aerosnimak područja Voštana (Kamešnica) mjerila približno 1:30.000. Na fotografiju se veoma dobro zapažaju razni geološki podaci, kao što su: pružanje i nagib slojeva, pukotine, rasjedi i njihov karakter, stupanj okršnosti i dr. Zatim su moguća litološka razdvajanja vapnenaca od dolomita, klastičnih naslaga od karbonatnih itd. (VGI-Beograd, 1744).

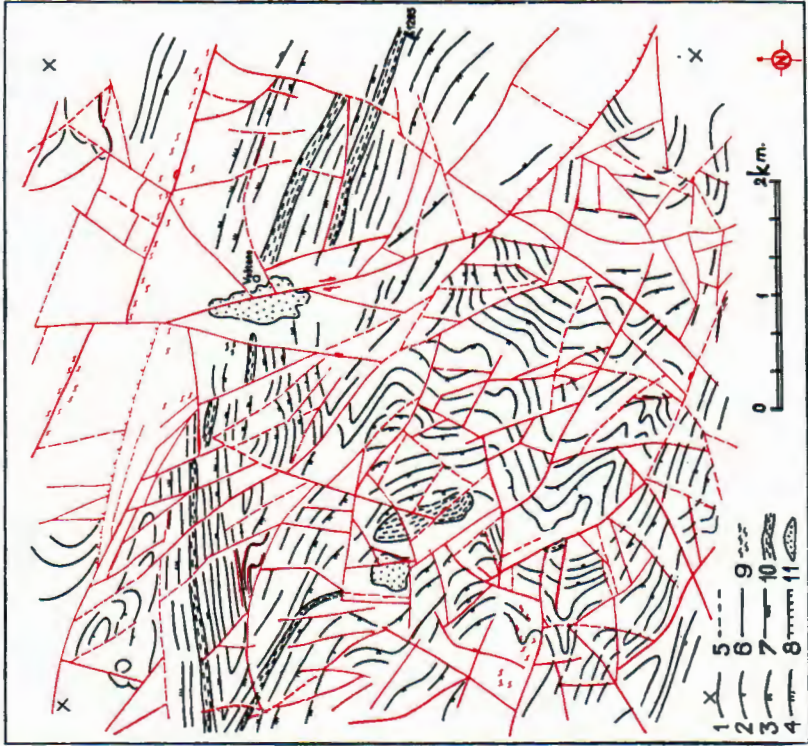
Pancromatic black-and-white aerial photograph of Voštane-Kamešnica area (VGI-Beograd, 1744).

- 2 Fotogeološka karta izrađena na osnovi gornjeg fotograma. U jursko-krednim naslagama identificirana je veoma poremećena antiklinalna struktura. Ta struktura završava zapadno od Voštana u obliku klina, a njen istočni dio djelomično je navučen u jugozapadnom smjeru. Usljed potiska sa sjeveroistoka naslage ispred spomenute antiklinale snažno su naborane i poremećene (interpretacija M. Oluć, 1970).

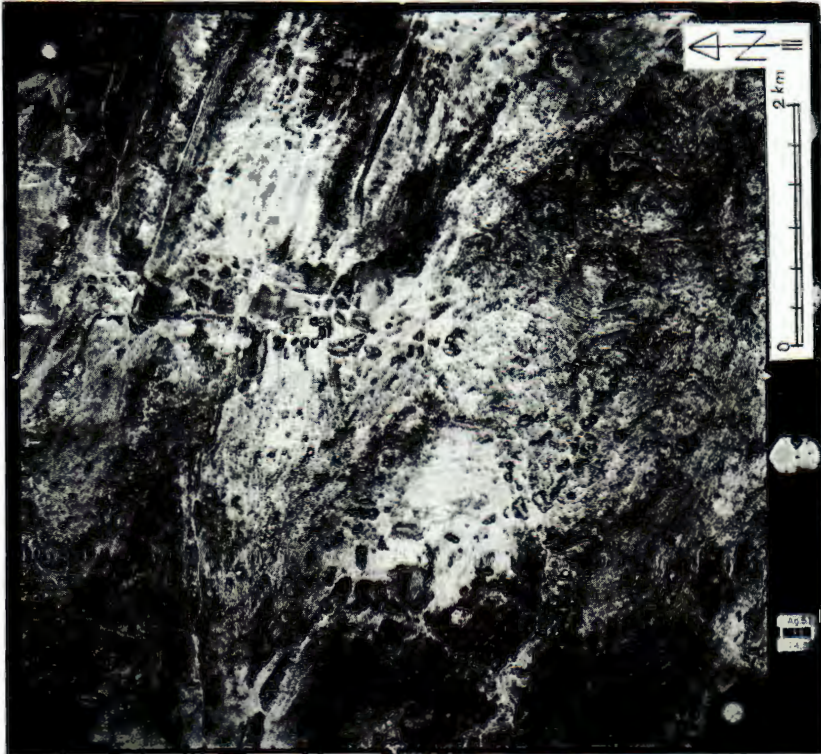
Photogeological map produced on the basis of the aerial photograph shown above.

Legenda — Explanation of symbols:

- 1 Trase slojeva (Traces of beds); 2 Blago nagnuti slojevi (Slightly inclined beds); 3 Srednje strmo nagnuti slojevi (Medium inclined beds); 4 Štrmo nagnuti slojevi (Steeply inclined beds); 5 Pretpostavljeni rasjed (Supposed fault); 6 Rasjed (Fault); 7 Rasjed s relativno spuštenim blokom (Fault with relatively sunken block); 8 Reversni rasjed (Reverse fault); 9 Milonitizirana zona (Tectonically fractured zone); 10 Ulošci dolomita u vapnencima (Intercalations of dolomite in limestone); 11 Kvaratar (Quaternary).



Sl. 2



Sl. 1



Legenda — Explanation of symbols:

1 Srednje strmo nagnuti slojevi (Medium inclined beds); 2 Strmo nagnuti slojevi (Steeply inclined beds); 3 Geološka granica (Geological boundary); 4 Pukotina (Fissure); 5 Rasjed (Fault); 6 Reversni rasjed (Reverse fault); 7 Boksit (Bauxite); 8 Srednji-gornji eocen, fliš (Middle to Upper Eocene; flysch); 9 Donji-srednji eocen, foraminiferski vapnenci (Lower-to-Middle Eocene; foraminiferal limestone) 10 Gornja kreda, vapnenci (Upper Cretaceous limestone).

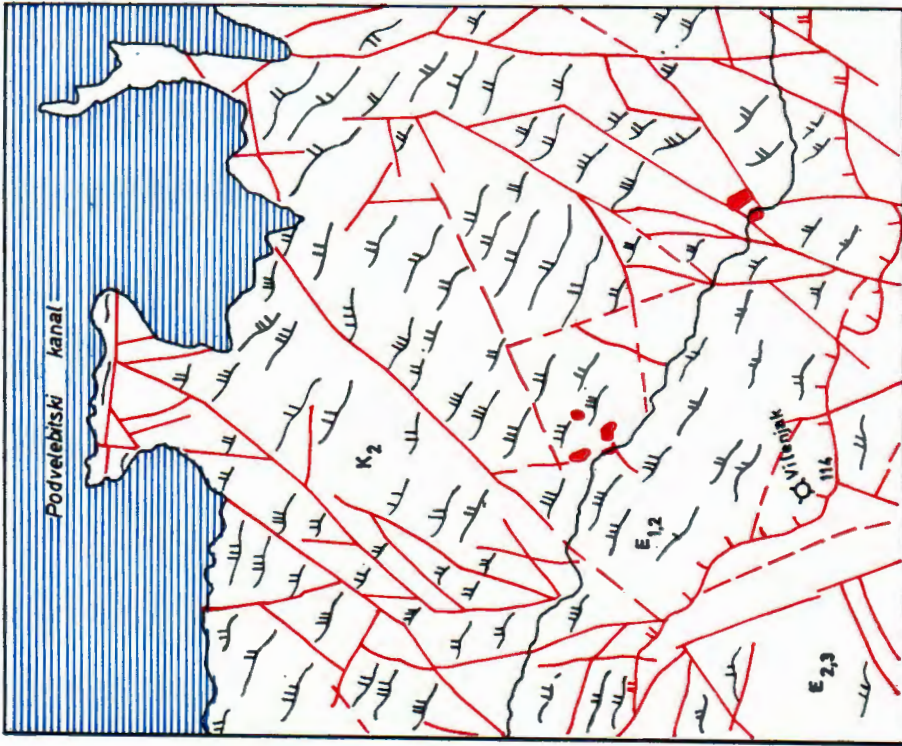
TABLA — PLATE II

1 Fotogram u boji područja Vilenjaka (otok Pag) mjerila približno 1:10.000. Na fotogramu se izvanredno dobro mogu razlikovati litostratigrafske jedinice kao što su: srednjeocenski fliš, donjoeocenski foraminiferski vapnenci, gornjokredne naslage sa svojim litološkim »članovima« (vapnenci i dolomiti). Također se dobro zapažaju rasjedi i pukotine, kao i položaj pojedinih naslaga. Bez većih poteškoća dobro se zapažaju boksitne pojave svojim strukturnim smještajem i karakterističnom bojom.

Color aerial photograph of the Vilenjak area — island of Pag (VGI-Beograd, 57—78).

2 Fotogeološka karta područja Vilenjaka (otok Pag) izrađena prema gornjem fotogramu. Analizom fotograma dobiveni su podaci koji su omogućili potpunu geološku interpretaciju tog područja. Utvrđeno je da se naslage, što izgrađuju razmatrano područje, nalaze u inverznom položaju. Kredne naslage leže na eocenskim foraminiferskim vapnencima, a ovi su navučeni na srednjeocenski fliš. Uslijed strukturnih odnosa boksitnim tijelima krovinu tvore gornjokredni vapnenci koji su u normalnim prilikama njihova stratigrafska podina. Ovakvi odnosi potvrđeni su i terenskim istraživanjima.

Photogeological map of the Vilenjak area, island of Pag, produced on the basis of the aerial photograph shown above.



Sl. 2



Sl. 1

TABLA — PLATE III

Stereogram u boji područja Krivelja (Bor), mjerilo oko 1:15000. Na stereogramu se mogu veoma dobro i pouzdano izdvojiti pojedine litostratigrafske jedinice. Gornjojurski vapnenci (JV) i donjokredni vapnenci (KV) prepoznaju se prema pozitivno izraženim formama u reljefu, zatim gotovo redovito svijetlijem tonu — boji, evidentnim krškim fenomenima (škrape i vrtače), kao i oskudnoj hidrografske mreži. Nasuprot njima klastične gornjokredne naslage (KK) imaju zaobljene morfološke oblike, reljef je bolje razveden, hidrografska mreža je gušća, a boja im je tamnija.

Vulkanske i hidrotermalno izmijenjene stijene paleogenske starosti (VS) veoma se dobro izdvajaju po karakterističnim oblicima reljefa. Česti su lučni i prstenasti oblici koji se identificiraju po topografskom izrazu reljefa, rasporedu vegetacije (koja je u uskoj vezi sa litološkim sastavom) zatim, po radijalnom rasporedu hidrografske mreže itd.

Ti lučni i prstenasti oblici vjerojatno predstavljaju stare centre vulkanske djelatnosti, a njihovo kartiranje je osobito važno za istraživanje bakarnih ruda. (VGI-Beograd, 32—13).

Q — kvartarne naslage, VS — vulkanske i hidrotermalno izmijenjene stijene paleogena, KK — gornjokredni klastiti, KV — donjokredni vapnenci, JV — gornjojurski vapnenci.

Color stereograph of the Krivelj area, north of Bor, east Serbia (VGI-Beograd, 32—13). Q — Quaternary deposits; VS — volcanic and hydrothermally modified Paleogen rocks; KK — Upper Cretaceous clastic rocks; KV — Lower Cretaceous limestones; JV — Upper Jurassic limestones. Scale ca 1:15000.

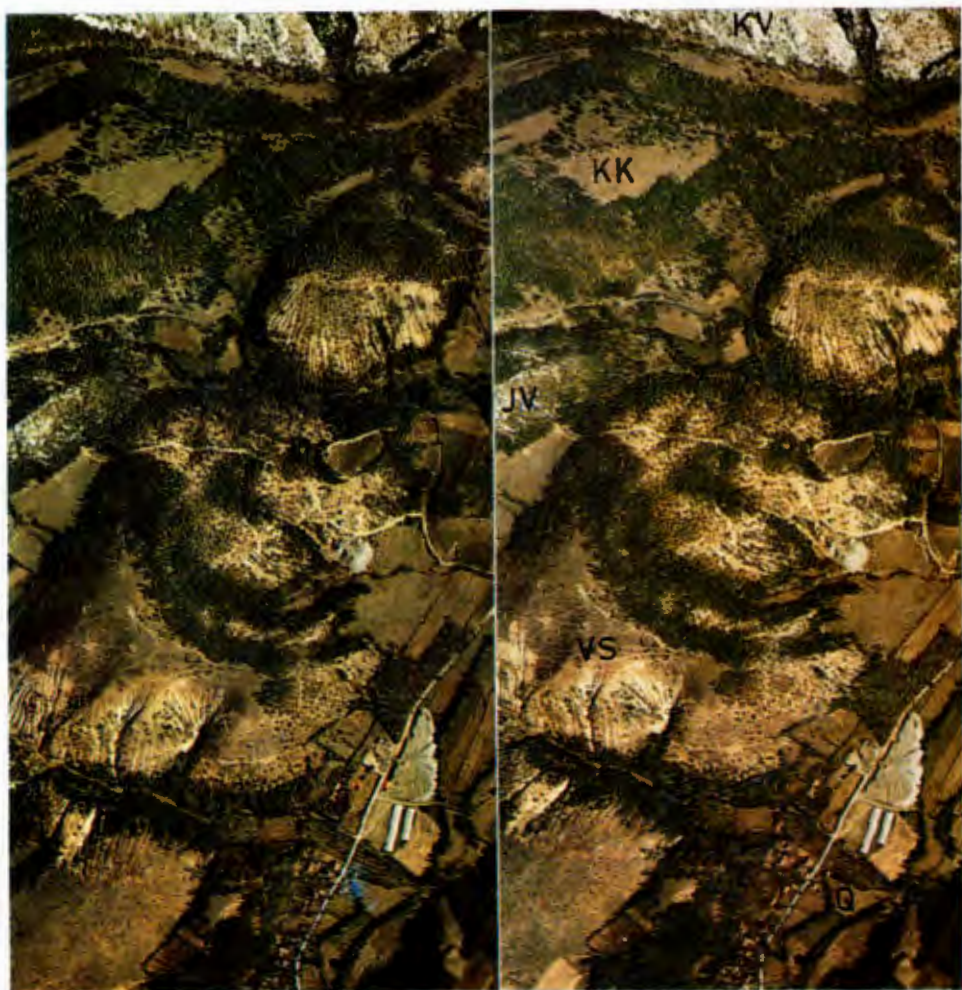


TABLA — PLATE IV

Infracrveni crno-bijeli fotogram na putu Čerević—Ilok (VGI-Beograd, 1618—3).

Na aerosnimku se dobro zapažaju konture klizišta, čije su dimenzije približno: dužina 1000 m, širina 500 m i dubina 30 cm. Zatim drugi strukturni i litološki podaci neophodni za izradu sanacionog programa, kao što su rasjedi i pukotine, litološki sastav, zone ožiljaka klizišta, zone pojačane površinske i pripovršinske vlažnosti i sl.

Infrared black-and-white photograph, showing a landslide on the Čerević-Ilok road (VGI-Beograd, 1618—3).



TABLA — PLATE V

- Gore: Termalni snimak područja Čateških toplica (Brežice) snimljen multispektralnim skanerom u proljeće 1974. Ovaj snimak napravljen je u crno-bijeloj tehnici iz negativ filma na kojeg su posrednim putem preneseni termalni efekti snimljenog područja. Svjetlija polja na snimku znače mjesta s povećanim toplotnim gradijentom. Osobito se dobro vidi bazen s toplom vodom u Čateškim toplicama, kao i otpadne vode koje odlaze iz bazena u stari meandar rijeke Save. Također se zapaža povećana termalna anomalija u ribnjaku, koja se dobro razlikuje od okoline.
- Above: Thermal infrared image of Čateške Toplice—Brežice thermal well area, made by multispectral scanner.
- Dolje: Termalni snimak istog područja kao i na gornjoj slici. Ovaj snimak obrađen je za razliku od prethodnog elektronskim denzitometrom. Na njemu su prikazane toplotne vrijednosti u različitim bojama («matematičke» boje). Na taj način omogućeno je lakše i jasnije zapažanje i razdvajanje toplinskih efekata. Toplija polja iskazana su crvenom bojom.
- Below: Thermal infrared image of the some area as above, made by multispectral scanner and processed by electronic densitometer.

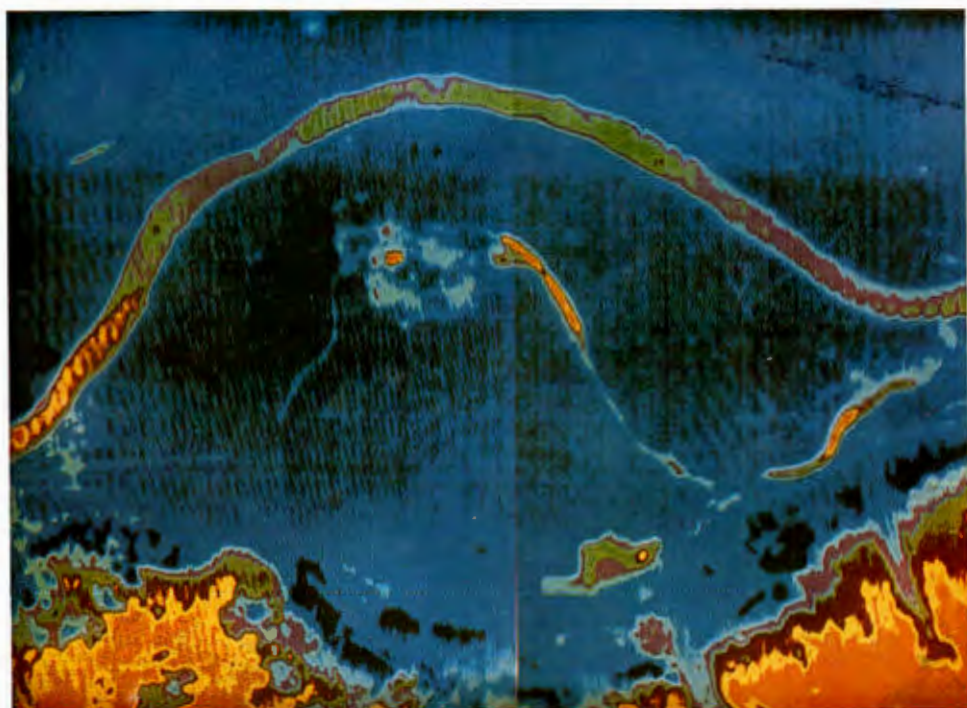


TABLA — PLATE VI

- Gore: Prikazane su dvije slike istog područja (Seaside, Oregon, SAD) dobivene fotografskom tehnikom (lijevo) i radarom (desno). Snimljeno područje je uglavnom pošumljeno i nepodesno za geološka istraživanja (slika lijevo). Međutim, na slici dobivenoj rada-postupkom (slika desno), vegetacijski pokrov se prividno ublažuje (kao da ga nema), pa se veoma dobro zapažaju određeni geološki podaci (morfostrukturni oblici, hidrografska mreža, trase slojeva, rasjedi i dr).
- Above: Comparison of images recorded by photography (left) and radar (right).
- Dolje: Radarski snimak južne Kalifornije (SAD) na kojem se izvanredno dobro zapaža rasjedna zona San Andreas, kao i prateći rasjedi. Također se zapaža razlika u litološkom sastavu s jedne i druge strane spomenutog rasjeda.
- Below: Radar image of southern California (USA); the San Andreas fault zone is clearly seen.

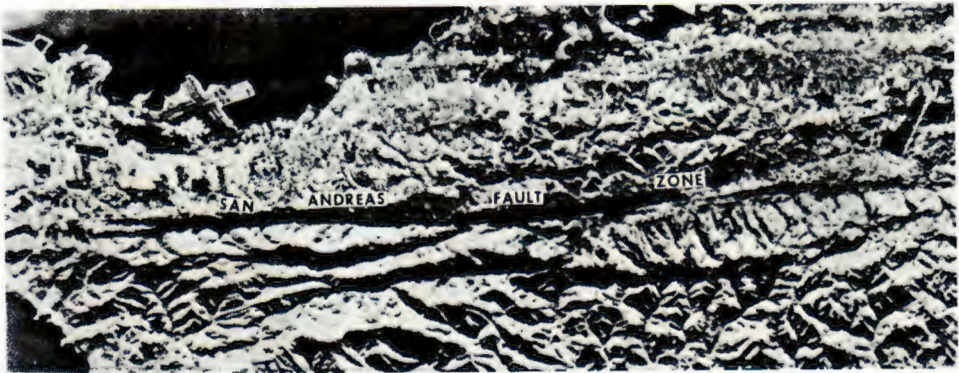


TABLA — PLATE VII

Snimak dobiven radar-postupkom, prikazuje područje jugoistočne Venezuele. Snimljene zone široke su 20 km. Snimljeno područje prekriveno je gustom vegetacijom i veoma nepogodno za geološka istraživanja. Slova na slici: d, e, f, označuju zaravnjenu džunglu; g, l dobro izražene bore u masivnom gnajsu; h savanu — šuma. Morfološki izraz reljefa na slici dolazi do punog izražaja, što u mnogom olakšava dešifriranje geoloških podataka.

Radar image of southeastern Venezuela.



TABLA — PLATE VIII

Lijevo: Skanogram područja južne Evrope napravljen iz satelita NOAA-3, 16. 8. 74. s visine od 1.500 km, snimljen s infracrvenim skanerom u području elektromagnetskog sepktra od 10,5—12,5 μm , dakle, termalni snimak na kojem »bijelo znači hladno«, a »crno znači toplo«. Zbog velike visine s koje je snimak napravljen, obuhvaćena je velika površina (oko 2,5 miliona km^2). Sitnog je mjerila (oko 1:7,5 miliona), pa se na njemu gube geološki detalji, te nije pogodan za geološku analizu. Međutim, za opću, regionalnu interpretaciju tektonskih odnosa može dobro poslužiti, jer se na njemu, ipak zapažaju megatektonske jedinice, osobito hektakilometarske rupture subkontinentalnih razmjera, kao i granice među osnovnim tektonskim provincijama. Takve krupne strukture Zemljine kore mogu se na ovim snimcima cjelovito sagledati i potpunije prikazati.

Left: Scanner image of Southern Europa made by NOAA-3 satellite from an altitude of 1500 km.

Desno: Karta rasjeda identificiranih na priloženom skanogramu. U području Dinarida zapaženo je više uzdužnih, gotovo paralelnih rasjeda, koji su u okolini Zagreba presječeni rasjedima, što se pružaju okomito na njih (u pravcu SI—JZ). Više rasjeda identificirano je na Apeninskom poluotoku. Alpe sa svojom morfostrukturnom građom također se dobro ocrtavaju. Zapadni Karpati i Češka masa dobro se izdvajaju rasjedima smještenim na njihovim rubovima.

Right: Map of faults identified on the scanner image.

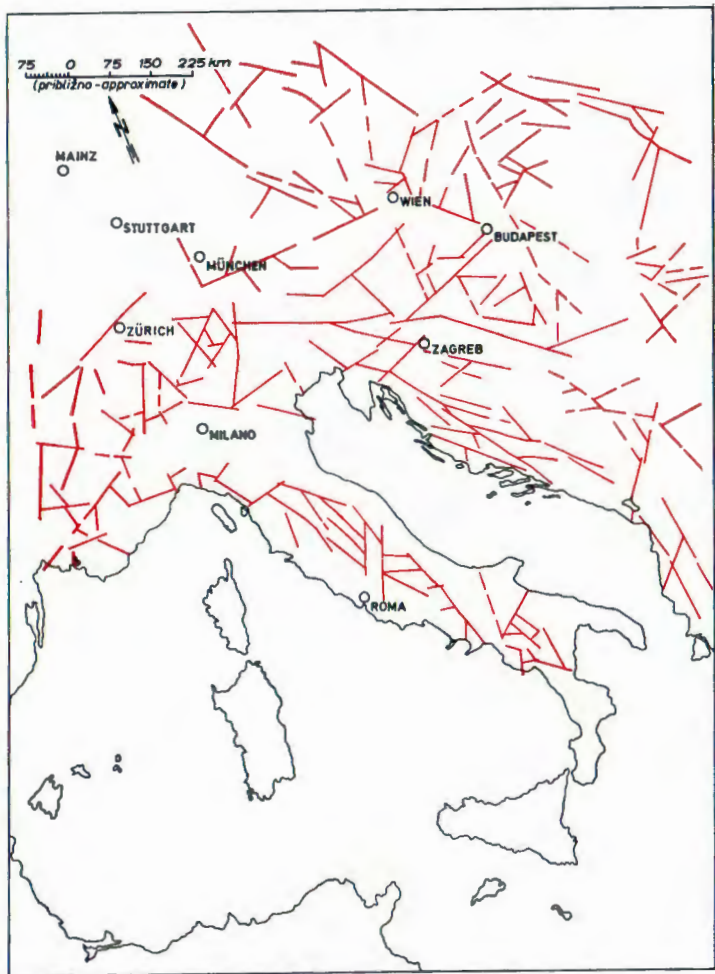


TABLA — PLATE VIII

TABLE — PLATE IX

- Lijevo: Skanogram područja centralne Evrope, ima iste karakteristike kao i skanogram na tabli VIII.
- Left: Scanner image of Central Europe made by NOAA-3 satellite at an altitude of 1500 km.
- Desno: Preliminarna karta rasjeda dobivena na osnovi priloženog skanograma. Dobro se ističu lineamenti koji odvajaju predalpski pregib (od Basela prema Beču i Pragu), kao i poznata Rajnska graba što se pruža od Basela do Mainza, te lom koji se pruža od Mainza preko Bonna prema Amsterdamu. Na skanogramu jasno se zapaža više razloma i veća poremećenost u zapadnoj Evropi (Basel—Mainz—Bruxelles—Amsterdam) nego u istočnom dijelu, na potezu München—Berlin—Hamburg).
- Right: Map of faults identified on scanner image

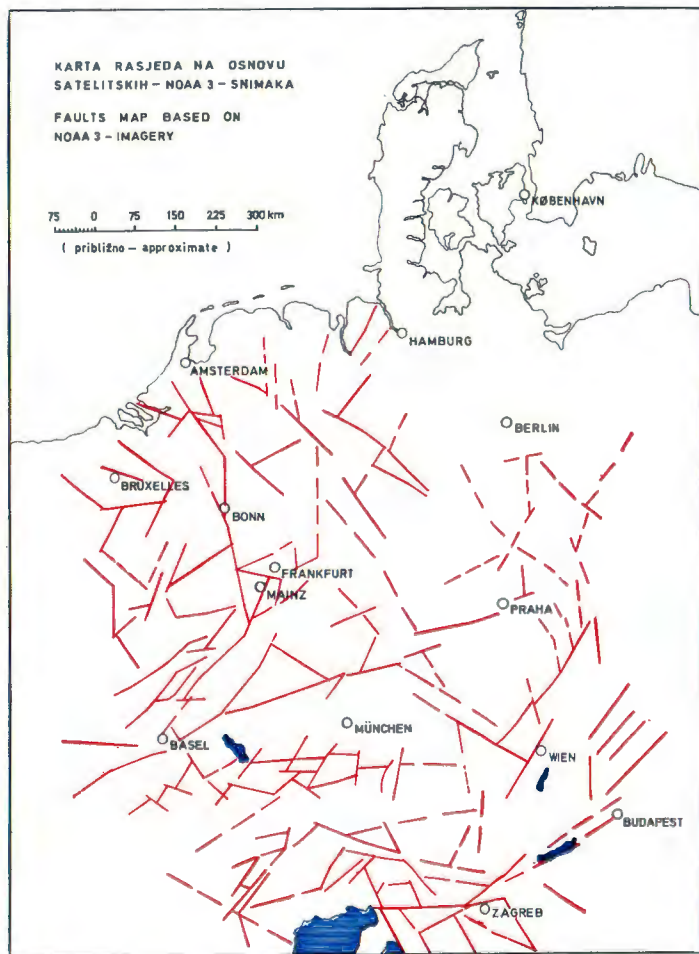


TABLA — PLATE X

Mozaik Jugoslavije načinjen od skanograma dobivenih posredstvom satelita LANDSAT-1 i LANDSAT-2. Sastavljen je od snimaka napravljenih u različitim kanalima, pa mu je kvaliteta neujednačena. Osim toga pojedini dijelovi terena su u vrijeme snimanja bili prekriveni oblacima, što znatno smanjuje njegovu interpretativnu vrijednost. No, i pored toga na mozaiku se mogu prepoznati i ograničiti veći morfološki oblici. Osobito se dobro zapažaju trase većih rasjeda kao što su: Savski rasjed koji se prati od Rateča (Kranjska gora) prema Zagrebu i dalje na istok. Evidentan je i poprečni rasjed »balatonskog pravca« koji presijeca Savski i Idrijski rasjed. Dobro se zapaža i Lički rasjed, kao i veći broj rasjeda u području Bosne itd. Prednost geološke analize na mozaiku je u tome što se na njemu mogu pratiti velike geološke jedinice, koje su na snimcima krupnijeg mjerila »prikrivene«.

Mosaic of Yugoslavia made from scanner images obtained by Landsat-1 and Landsat-2 satellites.



TABLA — PLATE XI

Skanoqram sjeverozapadnog dijela Jugoslavije, napravljen iz satelita LANDSAT-1 6. 2. 1973. s visine od 920 km u području elektromagentskog spektra od 0,8—1,1 μm . Mjerilo skanograma je oko 1:1.000.000 i obuhvaća površinu od 34.000 km^2 . Snimci ove vrste napravljeni iz geosatelita LANDSAT-1 i LANDSAT-2 veoma se dobro mogu koristiti u različitim geološkim istraživanjima. Na njima se zapažaju objekti minimalnih dimenzija od oko 80 m. To znači da se vrlo dobro mogu zapažati morfostrukturne osobine terena, veći strukturni oblici osobito rupturni, kao i regionalni raspored litoloških jedinica, segmenti riječne i dolinske mreže, litološke granice, osobito između klastičnih i karbonatnih stijena itd. Zapažanje podataka olakšano je stereoskopskim promatranjem terena na LANDSAT-1 i LANDSAT-2 skanogramima (I i II orbita).

Scanner image of northwestern part of Yugoslavia made by Landsat-1 satellite from an altitude of 920 km.

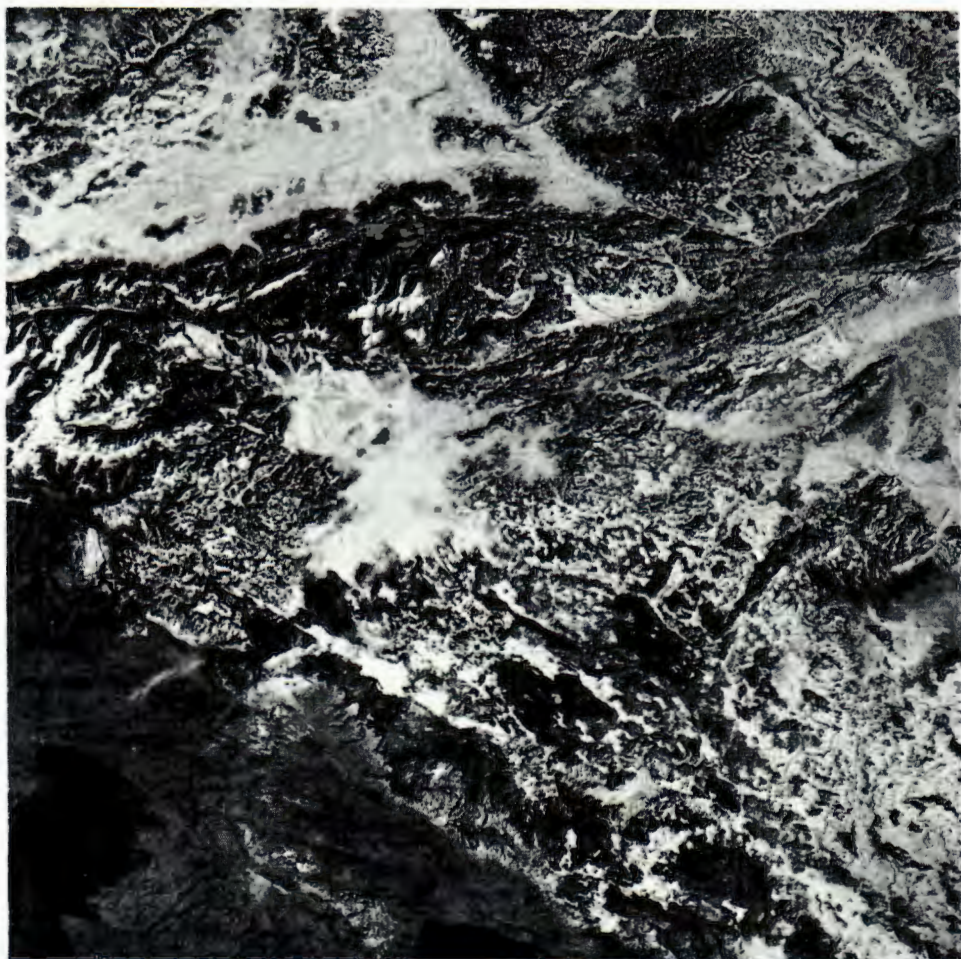


TABLA — PLATE XII

Karta rasjeda identificiranih na skanogramu na tab. XI Izdvojene su uvjetno tri kategorije rasjeda koji se razlikuju po pružanju. Rasjedi prvoga reda imaju hektakilometarsko kružanje, po intenzitetu su najjači, a po pružanju najduži (od 50 do nekoliko stotina kilometara). Ističe se Idrijski rasjed koji se pruža pravcem SZ—JI u dužini preko 200 km. On je mjestimično presječen poprečnim rasjedima, što se naročito zapaža kod Broda na Kupi, gdje je upravo ispresijecan poprečnim i dijagonalnim rasjedima. Jugozapadno od Idrijskog zapaža se Raški rasjed. Jedan od najmarkantnijih i najjačih je Savski rasjed koji se može pratiti od Zagreba preko Kamnika i dalje na ZSZ. Od Rateča (Kranjska gora) do Trbovlja njegova trasa može se pratiti kao jedinstvena cjelina. Međutim, od Trbovlja do Zagreba trasa mu je ispresijecana poprečnim rasjedima sjeveroistočne orijentacije. Veoma markantan je i Šoštanjski rasjed, što se pruža generalno od Jesenica preko Mežice, Vojnika do Ivanščice. Također su važni Labotski i Ljutomerski rasjedi, što se pružaju od Dravograda do Poljčana i od Poljčana do Ljutomera. Nazivi ovih rasjeda uzeti su iz literature (A. Nosan, 1973) jer su oni već bili sasvim ili djelomično poznati. Međutim, ovim su radom potpunije i preciznije određeni. Također su važni rasjedi što se pružaju gotovo u paralelnom snopu od Novog Mesta prema Ivanščici, pravcem SI—JZ.

Rasjedi drugoga reda imaju pružanje od 10—50 km i oni uglavnom presijecaju rasjede prvoga reda.

Rasjedi trećeg reda nalaze se između spomenutih rasjeda prvog i drugog reda, a po pružanju dosežu dužinu od desetak kilometara.

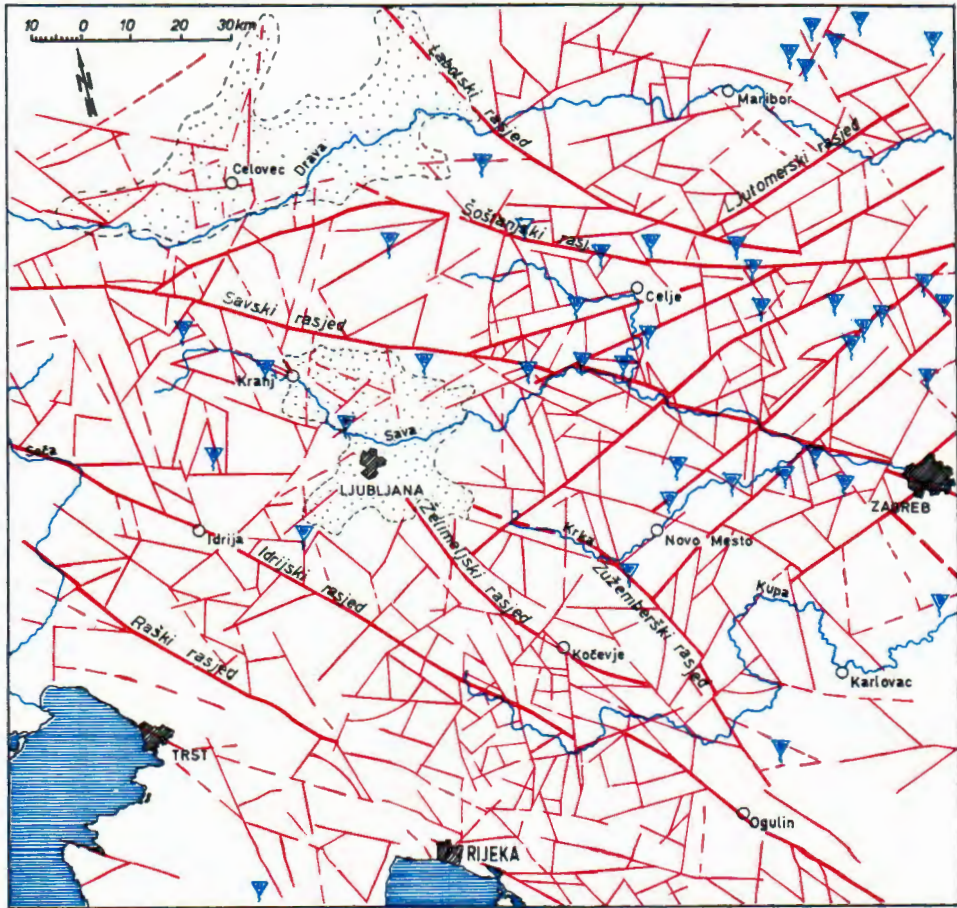
Rasjedi prvog i drugog reda ispresijecali su teren u veće blokove, dok su rasjedi trećeg reda remetili naslage unutar pojedinih blokova. Uz navedene rasjede zapažena su uglavnom vertikalna pomicanja ili horizontalna razmicanja, dok reversna navlačenja nisu tako uočljiva i obično se prikazuju kao tipične litostratigrafske granice.

Stijene što se nalaze na presjecištima pojedinih rasjeda, ili na mjestima gdje se sučeljavaju rasjedi različitih pravaca, najjače su tektonski poremećene, pa je otuda i pojačana seizmičnost na takvim mjestima. Neka proučavanja mikroseizmičnosti pojedinih terena pokazala su da se epicentri zemljotresa nalaze uz veće rasjedne plohe, kao i na presjecištu rasjeda različitih pravaca pružanja. To je i razumljivo, jer su rasjedne zone često povezane s dubokim prelomima oslabljenih zona Zemljine kore. Zbog toga su orbitalne snimke pogodne za proučavanje seizmičnosti terena, kao i za prognoziranje zemljotresa, odnosno za poduzimanje odgovarajućih preventivnih mjera.

Na kartu rasjeda uneseni su termomineralni izvori u cilju utvrđivanja povezanosti između pojava tih izvora i rasjedne tektonike. Karakteristično je da se većina (preko 90%) spomenutih izvora nalazi na rasjedima ili u njihovoj neposrednoj blizini.

Najveća koncentracija termomineralnih izvora nalazi se uz rasjede što se pružaju u pravcu SI—JZ, kao i uz Šoštanjski rasjed. Ova konstatacija upućuje na uzajamnu vezu između rasjeda i razmatranih izvora. To je zapravo znak da rasjedi sežu dublje u Zemljinu koru, te da su bili aktivni i kroz neotektonski period (pliokvartarno vrijeme), kao i to da oni najčešće čine putove termomineralnim fluidima. Dobiveni podaci i navedena zapažanja su preliminarnog karaktera, jer je za konačne zaključke potrebno izvršiti statističku sintezu podataka i usporedbu s podacima dobivenim drugim metodama istraživanja.

Map of faults identified on the scanner image shown in Pl. XI,



- | | | | |
|---|--|---|---|
|  | Rasjedi prvog reda
Faults of the 1 st order |  | Pretpostavljeni rasjed
Supposed faults |
|  | Rasjedi drugog reda
Faults of the 2 nd order |  | Termo-mineralni izvori
Thermal-mineral springs |

TABLA — PLATE XIII

Dio skanograma područja Bora, povećan u mjerilo 1:450.000 i digitalno obraden. Snimak je elektronski povećan, te su se tako naglasili strukturni oblici, a time poboljšala fotogeološka analiza. Na toj slici pored rupturnih struktura zapažaju se karakteristični kružni i eliptični oblici. Tako naprimjer sjeverno od Bora oko Rudne glave, motrimo jednu veću i više manjih kružnih struktura. Također se primjećuju kružni i eliptični oblici u području Krivelja i Zlota, koji su većinom rasjedima poremećeni. Okrugle i eliptične forme reljefa vjerojatno su povezane s magmatskom djelatnošću, odnosno može se pretpostaviti da su to centri nekadašnje vulkanske djelatnosti. Takvi podaci važni su kako za bolje razumijevanje geološke evolucije velikih područja, tako i za neposredno istraživanje mineralnih sirovina.

Digitally processed part of image showing a part of eastern Serbia.



TABLA — PLATE XIV

Snimak napravljen iz satelita Skylab u maju 1973. s visine od 435 km. Na slici je prikazan teren sjeverne Dalmacije. Dobro se identificiraju različite litostratigrafske jedinice (Prominske naslage, foraminiferski vapnenci, srednjoeocenski fliš), okršenost u karbonatnim naslagama (izrazitija je u krednim vapnencima), trase slojeva, veće pukotine, rasjedi i dr.

Image made by the Skylab orbital station from an altitude of 435 km showing northern *Dalmatia*.

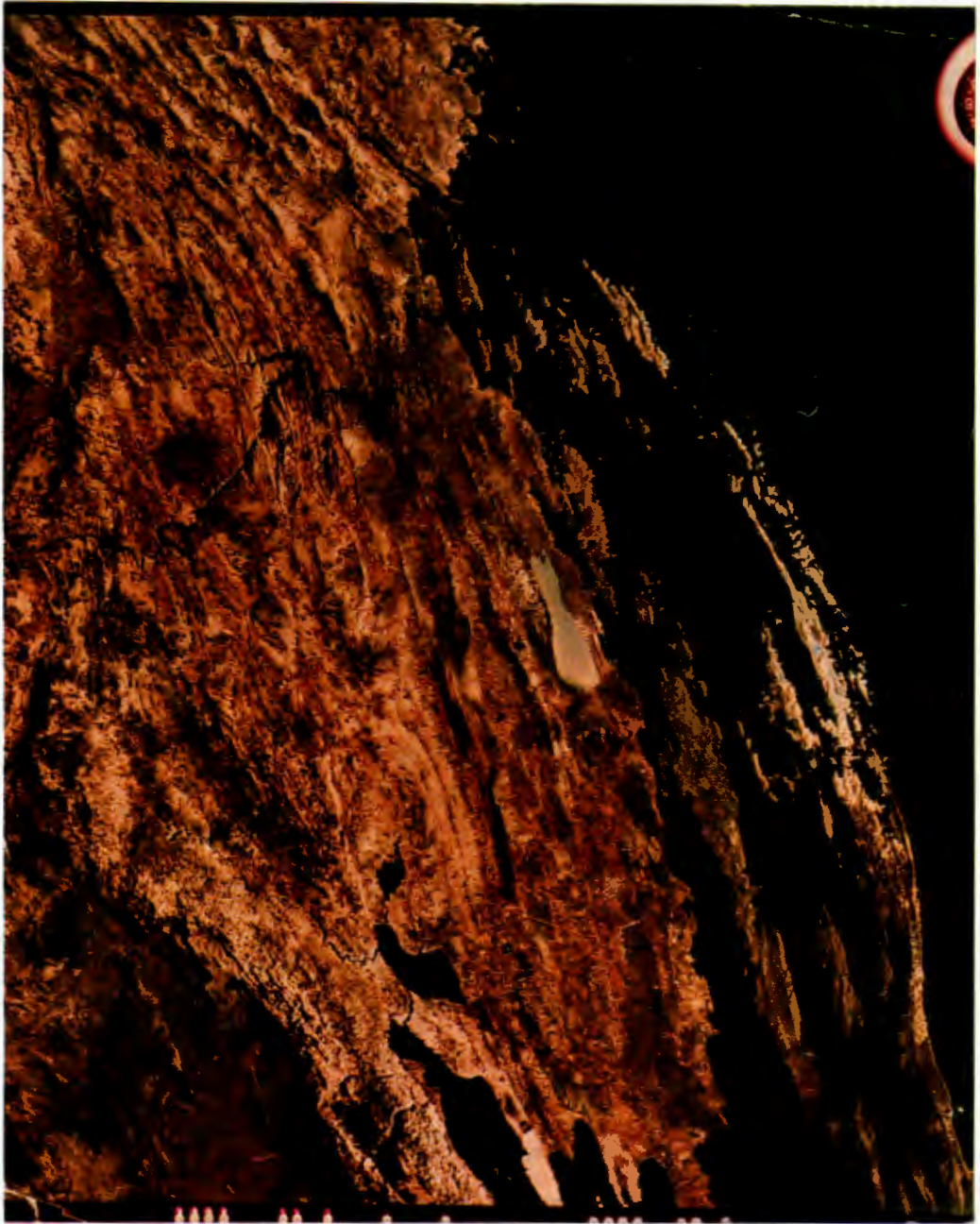


TABLA — PLATE XV

Karta rasjeda šireg područja Obrovca izrađena na osnovu snimka prikazanog na tab. XIV. Ističu se rasjedi dinarske orijentacije dekakilometarskih dužina. Tako se od područja Rovanske prema Zegar i Krupi pruža više gotovo paralelnih rasjeda, kao i dva paralelna rasjeda od Novigradskog mora prema Modrinom selu. Oni ograničavaju pojedine manje tektonske jedinice. Gotovo svi uzdužni rasjedi »dinarske« orijentacije ispresijecani su mlađim, na njih poprečnim ili dijagonalnim, rasjedima kilometarskog reda veličine. Upravo ti poprečni i dijagonalni rasjedi veoma se dobro zapažaju na satelitskih snimcima, jer razmiču uzdužne strukture i prekidaju kontinuitet litoloških jedinica. Dobro se registriraju dvije generacije ruptura: stariji rasjedi koji se zapažaju u krednim sedimentima i gube se pod Prominskim naslagama, te mlađi, koji su poremetili i kredne i Prominske naslage. Uz pojedine rasjede vezana su boksitna ležišta, pa je njihova uloga veoma važna kako za ispravno rješenje strukturnog sklopa, tako i za istraživanje boksitne rude.

Map of faults in Obrovac area made from image shown in Pl. XIV.

