

Hiperspektralna snemanja in arheologija

Hyperspectral surveys and archaeology

© Dimitrij Mlekuž

Zavod za varstvo kulturne dediščine Slovenije, Center za preventivno arheologijo in Univerza v Ljubljani, Filozofska fakulteta, Oddelek za arheologijo, dmlekuz@gmail.com

Izveček: Daljinsko zaznavanje ponuja nabor metod za sistematičen, neinvaziven in relativno poceni način pridobivanja podatkov o arheoloških najdiščih in časovni globini krajine. Metode daljinskega zaznavanja pa so si v svojem dosegu komplementarne. S pomočjo zračnega laserskega skeniranja (ZLS) smo v zadnjem desetletju uspeli odkriti množico novih arheoloških sledov, vendar predvsem v marginalnih prostorih, prekritih z gozdom, kjer so se ohranili kot površinske značilnosti. Vendar večina arheoloških najdišč v Sloveniji leži v rečnih dolinah, na ravninah, prodnih zasipih in v nižinah. Zaradi dolgotrajne rabe prostora jih ne prepoznamo več kot površinske anomalije, kar pa še ne pomeni, da arheološki sledovi niso ohranjeni pod površjem. Na štirih območjih v Sloveniji smo preizkusili domet hiperspektralnih snemanj in njihov potencial kot komplementarne metode zračnemu laserskemu skeniranju. Ugotovili smo, da hiperspektralna snemanja kljub nekaterim pomanjkljivostim omogočajo detekcijo arheoloških sledov; je pa študija pokazala tudi zaskrbljujoče dejstvo, da je večina arheoloških sledov na območjih, zaznamovanih z intenzivno agrarno rabo, močno predelanih ali popolnoma uničenih.

Ključne besede: arheologija, aeroarheologija, daljinsko zaznavanje, hiperspektralna snemanja, zračno lasersko skeniranje

Uvod

Daljinsko zaznavanje je nabor metod, s katerimi lahko od daleč, običajno iz zraka, opazujemo zemeljsko površje. Sem uvrščamo aerofotografijo, satelitske posnetke, lasersko snemanje, termično snemanje itd. Opazovanja iz zraka ali aeroarheologija je hiter, sistematičen, neinvaziven in relativno poceni način pridobivanja podatkov o arheoloških najdiščih in časovni globini krajine.

Aeroarheologija že od dvajsetih let prejšnjega stoletja pomembno prispeva k odkrivanju novih arheoloških najdišč in razumevanju časovne globine krajine. Arheološke sledove prepoznamo preko opazovanja znakov, kot so različne barve tal (barvni znaki) ter razlike v rasti posevkov (vegetacijski znaki) in senc (topografski znaki), ki lahko kažejo na arheološke sledi pod površjem. Tradicionalna aeroarheologija temelji na nesistematičnem letenju na nizkih višinah in snemanju pretežno poševnih fotografij. Velika pomanjkljivost tradicionalne aerofotografije je ravno v tem, da opazovanje ni popolnoma sistematično, saj temelji na sposobnosti opazovalca, da prepozna in fotografira arheološke sledove (ang. *observer directed survey*) med letom.

Aerofotografija v Sloveniji na arheološko prakso in varovanje dediščine ni nikoli imela velikega vpliva. Razlogov

Abstract: Remote sensing offers a spectrum of systematic, non-invasive and relatively low-cost methods for collecting data on archaeological sites and traces, as well as on the time-depth of the landscape. Remote sensing methods are complementary; on their own, they offer a limited and often specific view of the landscape and must be combined into a more comprehensive view. In the recent decade, airborne laser scanning (ALS) in Slovenia has revealed numerous new archaeological traces, but these are mainly located in marginal, forested areas, where they are preserved as surface anomalies. The vast majority of archaeological sites are located in river valleys, the lowland and on terraces. A long history of land use has modified these areas and in many cases destroyed surface traces of archaeological sites. However, they might still be buried under the surface. We have assessed the application and range of hyperspectral imagery for detecting archaeological traces in heavily modified landscapes and observed that hyperspectral imagery, despite some drawbacks, allows the detection of buried archaeological traces. The study also demonstrated that most archaeological traces in such landscapes might already be destroyed.

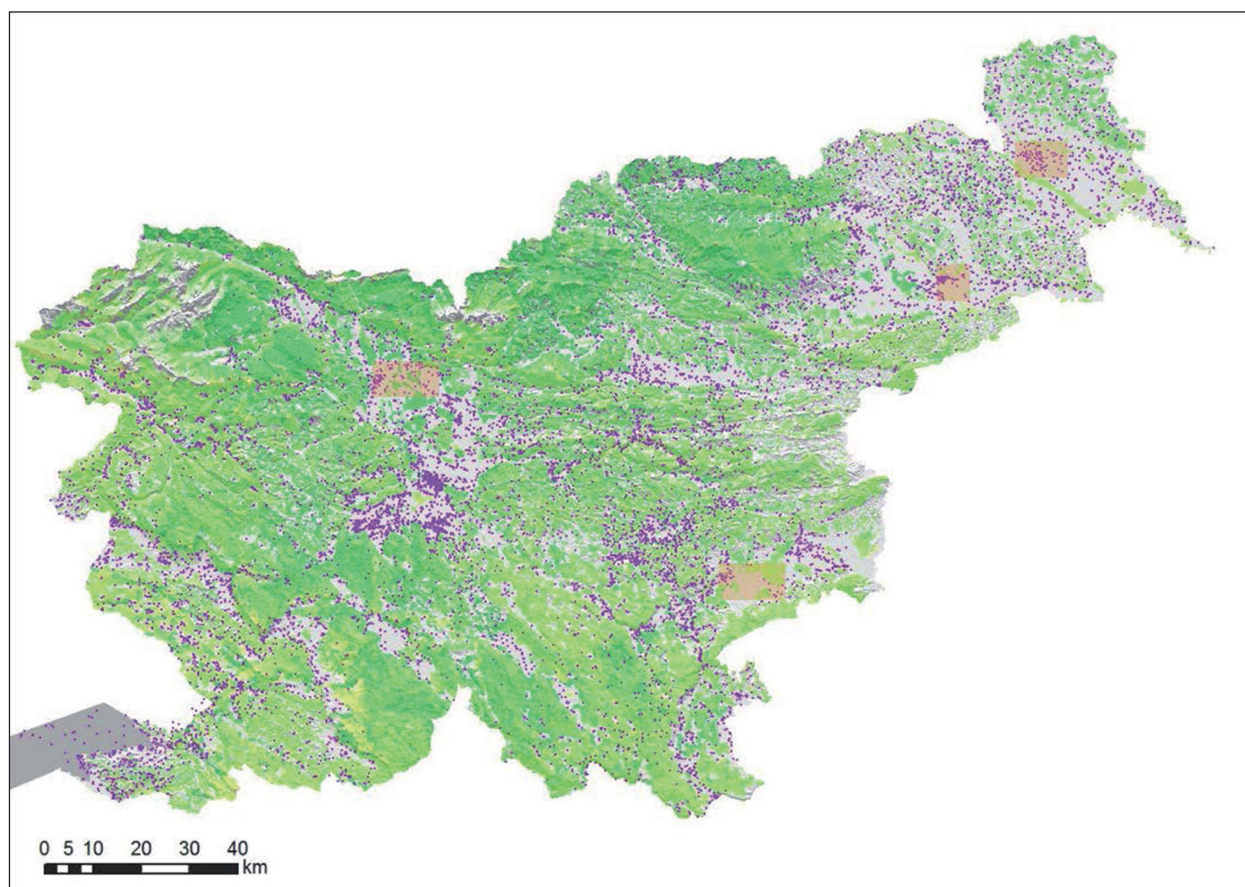
Keywords: archaeology, aeroarchaeology, remote sensing, hyperspectral survey, airborne laser scanning

je več. Prvi je, da je večina Slovenije, okoli 60 %, prekrita z gozdom, ki onemogoča opazovanje tal. V Sloveniji, za katero so značilni razgibana topografija, heterogena geološka podlaga in razdrobljena zemljiška razdelitev z različnimi posevki, ki imajo vsak svoj cikel rasti, je opazovanje vegetacijskih in barvnih znakov oteženo. Za sistematično opazovanje so najbolj primerne velike površine, posejane z monokulturami, kjer lahko opazujemo pokrajino kot celoto, kjer lažje zaznamo razlike v barvi in teksturi tal ter posevkov med morebitnimi arheološkimi znaki in okolico. Tako ni nenavadno, da so edini pomembni uspehi aerofotografije v Prekmurju, kjer je pokrajina primernejša za opazovanje (Kerman 1999). Uspešno prepoznavanje arheoloških sledov zahteva dolgotrajno opazovanje prostora, čakanje na ustrezne pogoje za opazovanje in zelo izkušene analitike.

V Sloveniji, precej gozdnati deželi, se je za izredno uspešno metodo izkazalo zračno lasersko skeniranje površja ali lidar. Besedna zveza lasersko skeniranje opisuje tehnologije, ki natančno in pogosto merijo razdaljo od naprave do cilja s pomočjo laserja. Te meritve zbere kot množico koordinat ali t. i. oblak točk, iz katerega mogoče pridobiti podatke o obliki predmeta, ki ga skeniramo. Zračno lasersko skeniranje površja je aktivna metoda daljinskega zaznavanja, s katero je mogoče

zelo natančno izmeriti zemeljsko površje. S pomočjo ZLS izmerimo višino tal in predmetov na površju. Pri na pol prosojnih predmetih, kot so npr. drevesa ali druga vegetacija, se del žarka odbije od listnega pokrova ali vej, del pa prodre do tal. Tako lahko iz oblaka točk izluščimo tudi višine tal pod gozdom. Da pa lahko z ZLS opazimo arheološke sledove, morajo biti ti vidni na površju kot grbine in izbokline (nasipi, zidovi, groblje) ali vkopi (jame in jarki). ZLS je zaradi svoje zmožnosti opazovanja tal pod gozdnim pokrovom zelo primeren za uporabo v Sloveniji. Gozdovi, prej zaprti sistematično opazovanje, so s pomočjo ZLS postali odprti. Gozdovi so prostori, kjer so zaradi omejenih človeških posegov arheološki sledovi zelo dobro ohranjeni (Mlekuž 2009; 2012; Opitz 2012; Mlekuž 2013). Tako smo s pomočjo

ZLS odkrili množico novih arheoloških najdišč, kot so gomile, gradišča, gradovi in podobno. Toda na površju lahko prepoznamo tudi druge sledove preteklega bivanja v krajini. Na visokoločljivih topografskih podatkih ZLS smo prepoznali apnenice, kopišča, kamnolome, sledove rudarjenja, poti, zemljiško razdelitev, opuščene agrarne površine in podobno. ZLS se je v slovenski izkušnji izkazal kot izredno uspešna metoda za opazovanje krajine (Mlekuž 2009; 2013; 2015). Poglavitna omejitev ZLS je njegova relativna neučinkovitost na območjih, ki so intenzivno predelana z različnimi, predvsem antropogenimi posegi. Kmetijske aktivnosti, kot je oranje, lahko popolnoma predelajo ali celo uničijo starejše arheološke sledove, ki niso več vidni kot anomalija v površju. Domet ZLS je tako omejen predvsem na marginalne



Slika 1. Arheološka najdišča Slovenije v razmerju do gozdov. Večina arheoloških najdišč leži v odprtih rečnih dolinah, kotlinah in vznožju gričevja. Označena so tudi študijska območja, omenjena v članku.

Figure 1. Archaeological sites and forests in Slovenia. Most sites are located in open areas, such as valley bottoms, basins and foothills. Study areas discussed in the article are marked.

prostore, kot so z gozdom poraščena hribovja in gričevja (Mlekuž 2009; 2013).

Večina arheoloških najdišč v Sloveniji ne leži na gričevju ali gorah, temveč v rečnih dolinah, na ravninah, prodnih zasipih in v nižinah (slika 1). To so prostori, ki so že od nekdanj najbolj zanimivi za poljedelstvo, saj omogočajo gibanje, in kjer je bila poselitev od prazgodovine naprej najbolj gosta in stalna. Vendar so kljub temu, da jih ne prepoznamo več kot površinske anomalije, arheološki sledovi tu še vedno lahko ohranjeni pod površjem in jih lahko zaznamo s pomočjo metod, kot so sistematična aerofotografija, sistematični terenski pregledi in geofizika.

Za celostno in sistematično pokrivanje prostora Slovenije, tako z gozdom pokritih površin kot kmetijskih zemljišč in intenzivno poseljenih nižin, potrebujemo komplementarne metode daljinskega zaznavanja, ki bodo omogočale prepoznavanje arheoloških sledov na celotnem območju Slovenije, ne glede na stanje površja. Preizkusili smo hiperspektralna snemanja.

Posneli smo štiri testna območja v Sloveniji: Krško, Kranjsko in Ptujsko polje ter Prekmurje, v skupni površini okoli 80 km² (slika 1).

Hiperspektralna snemanja so v arheologiji relativno nova metoda, zato dobrih primerov uporabe v praksi varovanja kulturne dediščine še nimamo. Običajno gre za manjša, raziskovalna snemanja, katerih cilj je prepoznavanje spoznavnega dometa metode. Primeri so delo v Karnuntumu (Neubauer *et al.* 2011; Doneus *et al.* 2014), poskus uporabe hiperspektralnih snemanj na Siciliji (Cavalli *et al.* 2007; Cavalli 2013) in projekt študija akvilejskega agra v Italiji (Traviglia 2005; 2006; Pietrapertosa *et al.* 2008; Traviglia 2008).

Multispektralna in hiperspektralna snemanja

Elektromagnetno valovanje, ki ga ustvarjajo jedrske reakcije v notranjosti Sonca, potuje skozi vesolje. Velik del elektromagnetnega valovanja, ki doseže Zemljo, se absorbira v atmosferi (ultravijolično valovanje vpije ozonski pas, dele termičnega infrardečega valovanja vpijejo toplogredni plini), del se odbije nazaj v vesolje, le majhen del pa doseže zemeljsko površje. V interakciji s predmeti na površju se del elektromagnetnega valovanja absorbira (vpije) in ga zato zaznamo kot termično

valovanje (toploto), del pa se odbije nazaj, kjer ga lahko zaznamo s senzorji (Oštir 2007, 21–34).

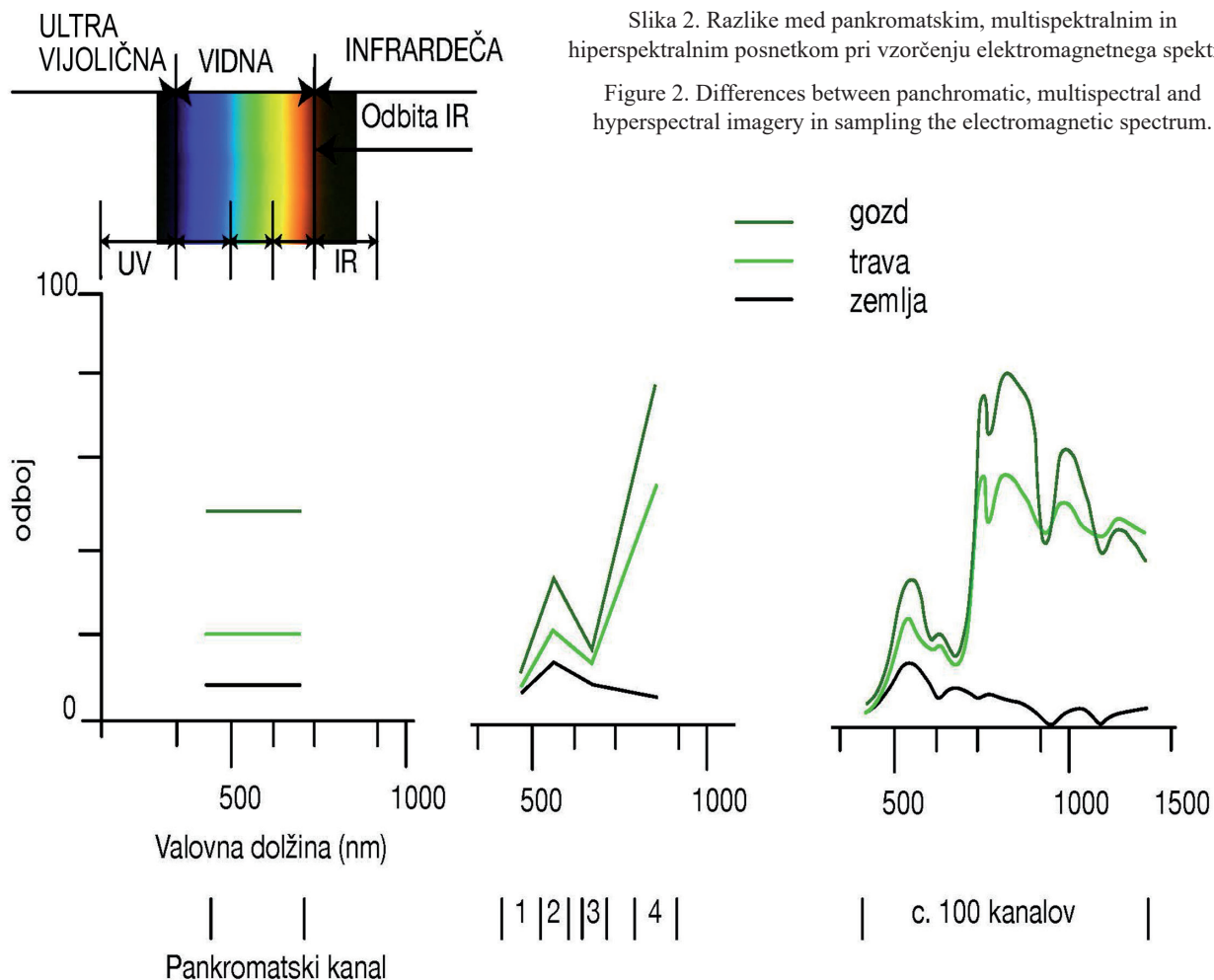
Daljinsko zaznavanje tako temelji na interpretaciji signalov iz senzorja. Iz lastnosti zaznane odbite in sevane svetlobe lahko sklepamo o lastnostih predmetov na površju. Pri pasivnih metodah daljinskega zaznavanja so torej lastnosti senzorja tiste, ki določajo domet metode. Pri tem sta za arheologijo pomembni predvsem spektralna in prostorska resolucija.

Spektralna resolucija ali ločljivost je natančnost zajema elektromagnetnega valovanja različnih valovnih dolžin. Višja spektralna ločljivost pomeni, da odbito svetlobo opazujemo v več ožjih delih spektra ali kanalih. Najmanjšo spektralno resolucijo imajo pankromatski posnetki, kjer je senzor občutljiv na en sam širok pas spektra, rezultat pa je običajno črno-bela fotografija površja (slika 2).

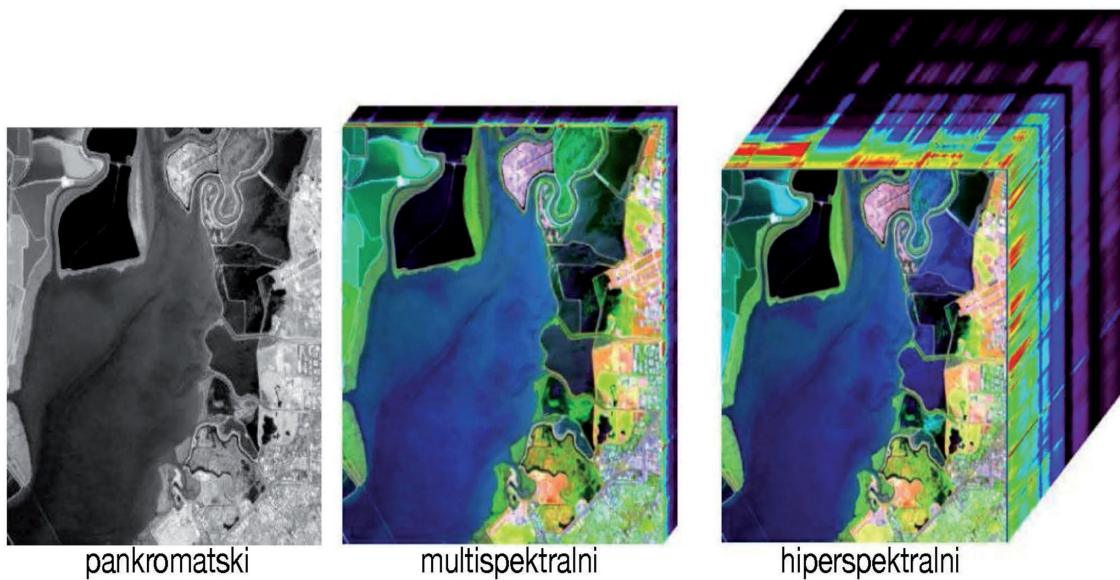
Multispektralni senzorji merijo odbito svetlobo v različnih pasovih elektromagnetnega spektra. Na ta način lahko razločimo različne dele elektromagnetnega spektra, t. i. spektralne pasove oz. posamezne »barve« površja. Multispektralno ali večspektralno snemanje je opazovanje pojavov v različnih valovnih dolžinah z namenom pridobivanja informacij o njihovih spektralnih lastnostih ter njihovi distribuciji v prostoru (Oštir 2007, 21–34) (slika 2).

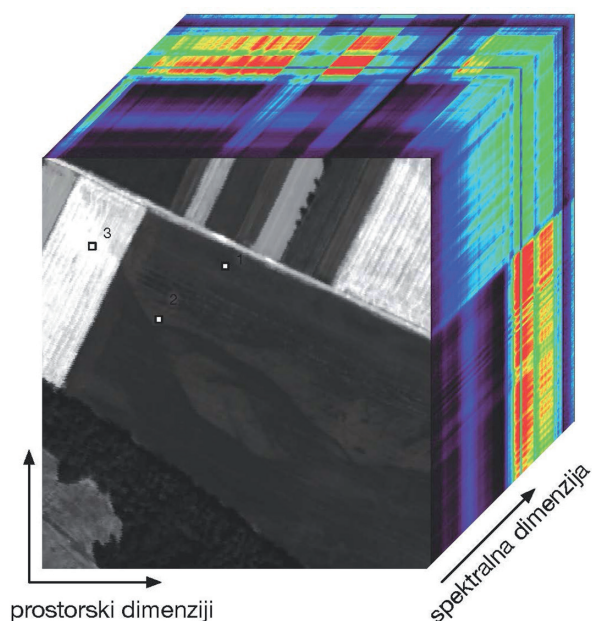
Hiperspektralna snemanja idejo multispektralnega snemanja pripeljejo do ekstrema. S hiperspektralnim senzorjem zaznamo celoten spekter odbite svetlobe, tako imenovan »spektralni podpis« odbite in sevane svetlobe, ki ga vzorčimo z velikim številom zelo ozkih, le nekaj nanometrov širokih spektralnih pasov. Tako dobimo dodatno dimenzijo predmeta snemanja. Hiperspektralno snemanje ne prinaša le dvodimenzionalne podobe površja v določenem delu elektromagnetnega spektra, temveč t. i. hiperspektralno kocko, kjer tretjo dimenzijo predstavlja podoba površja v različnih delih elektromagnetnega spektra (Borengasser *et al.* 2008, 48–50) (sliki 2 in 3).

Drugi pomemben dejavnik je razpon vzorčenega elektromagnetnega spektra. Če s tradicionalno aerofotografijo opazujemo zemeljsko površje le v vidnem delu elektromagnetnega spektra (med 400 in 700 nm, kar nam omogočajo senzorji na običajnih fotoaparatih ali spektralna občutljivost filma), lahko z multispektralnimi in hiperspektralnimi snemanji opazujemo površje tudi v nevidnem delu elektromagnetnega spektra, predvsem v



Slika 2. Razlike med pankromatskim, multispektralnim in hiperspektralnim posnetkom pri vzorčenju elektromagnetnega spektra.
Figure 2. Differences between panchromatic, multispectral and hyperspectral imagery in sampling the electromagnetic spectrum.



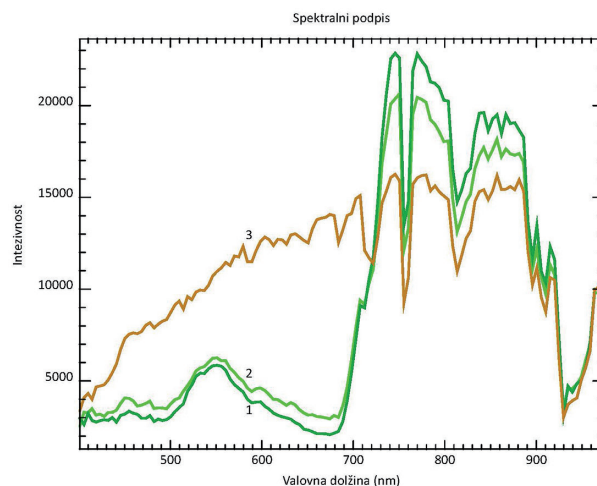


Slika 3. Hiperspektalna »kocka«. Hiperspektralni posnetek zemeljskega površja ima poleg prostorskih dimenzij (širina, dolžina) tudi spektralno dimenzijo ali globino. Označeni so slikovni elementi, za katere so na sliki 4 narejeni spektralni podpisi.

Figure 3. Hyperspectral cube. Hyperspectral image of the Earth's surface has spatial dimensions (width, length), but also a spectral dimension (depth). Pixels with spectral signatures presented on figure 4 are indicated.

bližnji infrardeči svetlobi in sevani infrardeči svetlobi. To nam omogoča opazovanje znakov, ki so v vidnem delu elektromagnetnega spektra slabše razločljivi. Dober primer je zdrave rastlin. V bližnje infrardečem delu elektromagnetnega spektra ima rastlinje izredno močan odboj; tu je kontrast med zdravimi in manj zdravimi rastlinami tudi najbolj opazen. Razlike v zdravju in stanju rastlin, ki so lahko posledica pokopanih arheoloških sledov, so tako v infrardečem delu spektra mnogo bolj razločne kot v vidnem delu elektromagnetnega spektra (Aqduš *et al.* 2012) (slika 4).

Druga pomembna lastnost je prostorska resolucija, ki opisuje natančnost zajema oziroma velikost slikovnega elementa. Na prostorsko resolucijo snemanja poleg značilnosti sensorja vplivata tudi platforma, na kateri je senzor pritrjen (letalo, satelit), in višina snemanja. Večja



Slika 4. Spektralni podpis posameznih slikovnih elementov, označenih na sliki 3. Spektralni odziv kaže odboj od površja v določenem spektralnem pasu. Temno zelena krivulja (1) kaže spektralni podpis bujne vegetacije pozitivnega vegetacijskega znaka, svetlo zelena (2) manj zdrave vegetacije in rjava (3) njive brez vegetacije. Opazen je velik skok v odboju vegetacije v bližnje infrardečem delu spektra, t. i. rdeč rob.

Figure 4. Spectral signature of the pixels indicated on figure 3. The spectral response shows the reflected light in a specific spectral band. Dark green curve (1) is a spectral response of lush vegetation in the positive cropmark, light green (2) shows the response of stressed vegetation and brown (3) of a soil without vegetation. A sharp increase in the reflection of vegetation on the near infrared bands or »red edge« is clearly visible.

kot je prostorska resolucija, torej manjša kot je velikost slikovnega elementa, več detajlov površja lahko prepoznamo. Resolucijo običajno izrazimo v velikosti (dolžini stranice), ki jo slikovni element pokriva na tleh. Arheološki sledovi, ki jih želimo prepoznati, so reda velikosti od nekaj deset centimetrov do nekaj deset metrov, zato je zelena prostorska resolucija za arheološke raziskave načeloma manjša od pol metra.

Rezultat daljinskega zaznavanja je slika ali podoba v rastrski obliki, ki je matrika slikovnih elementov oz. pikselov. Velikost slikovnega elementa je omejena s prostorsko resolucijo snemanja. Podoba predstavlja odbojnost ali lastno sevanje površja v določenem spektralnem pasu ali valovni dolžini, odvisno od spektralne resolucije sensorja. Pri hiperspektralnih posnetkih lahko senzor

generira več sto podob istega območja, vsako v svojem delu elektromagnetnega spektra.

Glavna prednost hiperspektralnega snemanja pred drugimi pasivnimi metodami daljinskega zaznavanja je, da ponuja veliko več informacij o površju. Če nam druge metode ponujajo zgolj intenzivnosti odboja (kot jo ponujajo pankromatski posnetki) ali različne »barve« površja oziroma intenzivnost odboja v različnih spektralnih pasovih (kot jo ponujajo multispektralni posnetki), pri hiperspektralnih snemanjih dobimo obliko odbitega elektromagnetnega spektra ali t. i. spektralni podpis za vsak slikovni element (slika 4).

Iz oblike odbitega spektra spektralnega podpisa je mogoče ugotavljati sestavo površja, naj bo to mineralna ali kemična sestava, vrsto in zdravje vegetacije, rastno dobo itd. (Borengasser *et al.* 2008). V arheologiji spektralnega podpisa kot takega običajno ne uporabljamo, saj arheološke značilnosti nimajo posebne sestave ali svojega spektralnega podpisa, temveč običajno nastanejo s preoblikovanjem okolice. Tako je npr. jarek zapolnjen z lokalnim polnilom; od okolice ga ločita predvsem drugačna tekstura polnila in delež vode v sedimentu.

Predvsem vlaga v tleh vpliva na rast vegetacije, kar povzroča lokalne variacije v zdravju in rasti rastlin. Tako pri arheoloških prospekcijah opazujemo predvsem anomalije, torej kontraste, lokalne razlike med potencialnimi arheološkimi sledovi in okolico v krajini (Beck 2011; Aqduš *et al.* 2012).

Razlike med arheološkimi sledovi in okolico opazujemo predvsem preko posrednih znakov; glavno vlogo pri aerorheologiji igra odziv vegetacije na lokalne razlike v teksturi tal in vsebnosti vode (t. i. vegetacijski znaki), ali pa razlike v barvi tal, ki so posledica različne vlažnosti, teksture ali sestave. Vendar je izraženost kontrasta odvisna od cele vrste faktorjev, kot so tip tal, vrsta posevka, vlažnost prsti in razlike v temperaturi tal. Te faktorje dodatno zapletajo antropogeni faktorji, kot so namakanje (ki povzroči, da se vegetacijski znaki pojavijo prej), način oranja in drugi (Beck 2011; Aqduš *et al.* 2012).

Vidnost razlik v barvi tal ali v rasti posevkov je tako odvisna od mnogih okoljskih pogojev in razmer med snemanjem, zato je posnetke v optimalnih pogojih skoraj nemogoče narediti. To je tudi eden izmed razlogov, zakaj je pri klasični aerofotografiji potrebno prostor opazovati

periodično (in upati, da naletimo na specifične pogoje, ki bodo pokazali na pokopane sledove). Hiperspektralna snemanja odpravljajo del teh pomanjkljivosti, saj omogočajo, da isti del površja opazujemo v različnih valovnih dolžinah, poleg tega valovne dolžine delu spektra bližnje in kratkovalovne infrardeče dodajo množico pomembnih informacij, ki omogočajo razločevanje razlik in kontrastov v vegetaciji in barvi zemlje (Beck 2011). Še vedno pa pomaga, če skeniranje opravimo v rastni dobi rastlin in ob primernih pogojih.

Glavna prednost hiperspektralnega snemanja je ta, da je odbiti elektromagnetni spekter vzorčen zelo podrobno, kar pomeni, da imamo o površju mnogo več informacij kot pri običajnih snemanjih. Povečana občutljivost hiperspektralnega snemanja je tako ključna za prepoznavanje razlik v rasti vegetacije in barvi tal, ki lahko kažejo na arheološke ostaline (Beck 2011).

Poglavitna težava uporabe hiperspektralnih snemanj v arheologiji je v njihovi nizki prostorski ločljivosti, ki je običajno – ne pa nujno – manjša kot pri klasični aerofotografiji. Nizko ločljivost dodatno kvarijo geometrijska popačenja in oteženo georeferenciranje posnetkov, ki so posledica lastnosti skenerja (*pushbroom scanner*) in nestabilnosti platforme, na kateri je nameščen skener (Borengasser *et al.* 2008, 23–28). Druga težava je v izjemno velikih količinah podatkov, ki jih metoda generira; običajno gre za nekaj sto in večkratnik količine podatkov kot pri običajni aerofotografiji. Procesiranje hiperspektralnih snemanj zahteva uporabo kompleksnih algoritmov za luščenje relevantnih podatkov iz podob. Uporabo hiperspektralnih snemanj v arheologiji otežuje tudi še relativno nepoznavanje potenciala metode za arheološke prospekcije in pomanjkanje ustreznih primerljivih raziskav. Tako je za učinkovito rabo hiperspektralnih snemanj v arheologiji potrebno eksperimentalno ugotoviti parametre, ki vplivajo na kontraste spektralnih podpisov arheoloških sledov, in eksperimentirati z različnimi algoritmi za procesiranje podatkov, kar povečuje kompleksnost naloge in podaljšuje čas procesiranja podatkov.

Podatki in procesiranje

Hiperspektralni posnetki, s katerimi smo delali v pričujoči nalogi, so v obliki rastrskih podob snemalnih pasov. Širina pasov je okoli 500 m, pasovi se med seboj prekrivajo okoli 25 %, vsak pas sestavlja 122 podob v različnih delih

elektromagnetnega spektra. Podobe so v ENVI slikovnem formatu (ENVI Image files, .dat). Prostorska resolucija posnetkov je okoli 0,5 m, spektralna resolucija je okoli 5 nm, posnetke sestavlja 122 spektralnih pasov v valovnih dolžinah med 400 in 980 nm, torej med vijoličnim in bližnje infrardečim delom elektromagnetnega spektra. Z georeferenciranjem hiperspektralnih posnetkov so zaradi lastnosti t. i. push broom sensorja in nestabilnosti platforme velike težave. Ocenjujemo, da je napaka pri georeferenciranju reda velikosti nekaj metrov. Težave so vidne predvsem na stikih posameznih pasov. Še večja težava so geometrijska popačenja posnetka, kar pomeni, da so značilnosti na podobah pogosto razmazane ali deformirane.

Procesiranje podatkov hiperspektralnega snemanja poteka v več korakih. Prvi korak je maskiranje (izoliranja) dela rastrskega sloja, ki vsebuje podatke.

Drugi korak je radiometrična korekcija podatkov. Radiometrična korekcija zmanjša vpliv atmosfere na odbito valovanje, ki ga zazna senzor. Tako iz podatkov sensorja izluščimo samo odbito svetlobo, brez vpliva atmosfere. Atmosfera namreč spremeni spektralno in prostorsko distribucijo valovanja, razprši odbito valovanje in doda valovanje iz okolice. Za radiometrično korekcijo smo uporabili orodje *Quick Atmospheric Correction* (QUAC), ki je del paketa ENVI (Bernstein 2012). Orodje QUAC opravi atmosfersko korekcijo hiperspektralnih in multi-spektralnih podatkov ter deluje v vidnem in bližnje infrardečem delu elektromagnetnega spektra. QUAC določi potrebne parametre iz samega spektra posameznega slikovnega elementa in ne potrebuje okoljskih informacij. Korekcija je sicer približna in temelji na empiričnih podatkih o odboju posameznih materialov, kot jih najdemo na površju, vendar so podatki o odbitem valovanju znotraj 10 % pravih vrednosti.

Vse nadaljnje korake in procesiranje smo opravili na maskiranih in atmosfersko korigiranih podatkih. Naslednji korak je bila izdelava slik v približno pravih barvah (ang. *true color*) in v lažnih barvah (ang. *false color*). Za izdelavo slik v pravih barvah smo uporabili kanale v rdeči, zeleni in modri barvi, za izdelavo slike v lažnih barvah pa v bližnji infrardeči, zeleni in modri barvi. Na ta način smo dobili ekvivalente »barvnih« oziroma »infrardečih« ortofoto posnetkov (slika 5).

Prednost hiperspektralnih posnetkov pred klasično aerofotografijo je možnost uporabe različnih tehnik

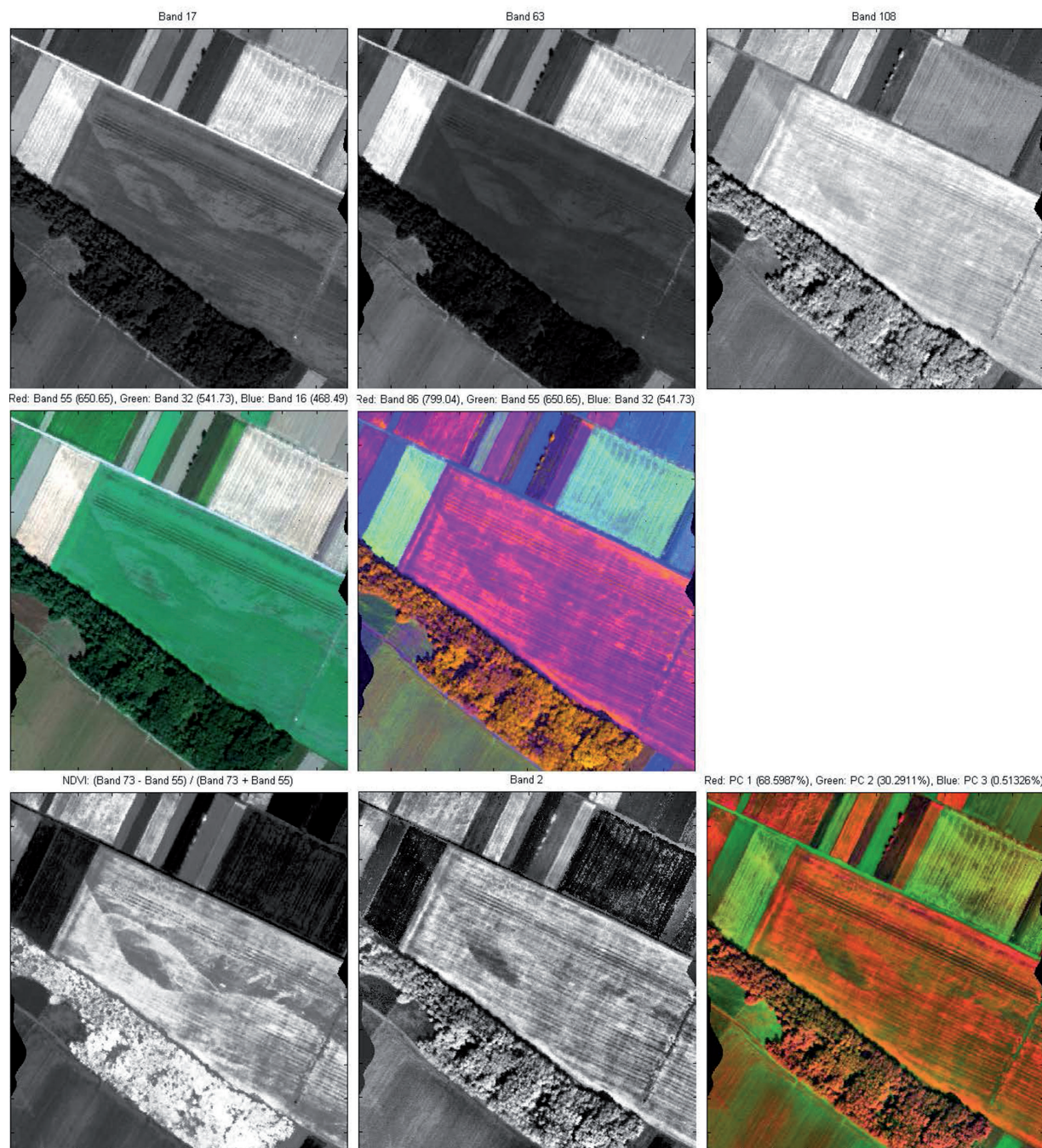
procesiranja, ki omogočajo ojačitev kontrastov in razlik. V najpreprostejših primerih gre zgolj za manipulacijo s histogramom podobe, kjer vizualno ojačimo pomenljive kontraste.

Naslednji korak je izdelava vegetacijskih indeksov (Bannari *et al.* 1995; Traviglia 2006; Aqduš *et al.* 2012; Doneus *et al.* 2014). Za arheologijo so uporabni različni vegetacijski indeksi, ki prikazujejo zdravje in kakovost vegetacije ter tako lahko kažejo na prisotnost arheoloških sledov. Najpogosteje je v uporabi normiran diferencialni vegetacijski indeks (ang. *Normalised Difference Vegetation Index*, NDVI), ki predstavlja razmerje med razliko bližnjega infrardečega in rdečega pasu ter njuno vsoto, ki smo ga izračunali iz vrednosti kanala v rdečem delu spektra (658 nm, kanal 55) in kanala v bližnji infrardeči svetlobi (850 nm, kanal 95).

Normirani diferencialni vegetacijski indeks kaže »zelelost« vegetacije, ki posredno kaže na zdravje in bujnost vegetacije. Običajno ga vizualiziramo kot sivinski sloj, kjer svetla barva predstavlja odsotnost vegetacije, temna pa zelo bujno vegetacijo. Na teh posnetkih pozitivne vegetacijske znake prepoznamo kot temne lise, negativne pa kot svetle anomalije (slika 5).

Iz hiperspektralnih podatkov smo izračunali tudi REIP indeks (ang. *Red Edge Inflection Point*), ki ugotavlja, pri kateri valovni dolžini v bližnjem infrardečem delu je točka upogiba rdečega roba. Rdeči rob (ang. *red edge*) je značilnost spektralnega podpisa vegetacije in je strma sprememba odziva vegetacije v bližnji infrardeči svetlobi (približno med 690–720 nm). S pomočjo REIP indeksa lahko zelo dobro ločimo različne vrste vegetacije, zato je primeren za ojačenje in zaznavanje vegetacijskih znakov. REIP podobno kot NDVI vizualiziramo kot sivinski sloj, in sicer kot vrednost spektralnega pasu, kjer smo izračunali točko upogiba rdečega roba. REIP indeks dobro odseva količino klorofila v rastlinah (Gitelson *et al.* 1996; Doneus *et al.* 2014) ter tako posredno razlike v rasti vegetacije, ki so lahko posledica pokopanih arheoloških sledov (slika 5).

Poglavitni težavi hiperspektralnih posnetkov sta njihova večdimenzionalnost in redundantnost. Podobe v bližnjih spektralnih pasovih so si podobne, skoraj identične; tako ima le majhen del informacij pomen za prepoznavanje arheoloških sledov. Poleg tega podatki vsebujejo tudi veliko šuma. Zato potrebujemo metode, ki učinkovito



Slika 5. Podoba istega dela zemeljskega površja v različnih delih elektromagnetnega spektra in različne kombinacije hiperspektralnih pasov. Prva vrstica: 473 nm (modra), 688 nm (rdeča), 905 nm (bližnja infrardeča); druga vrstica: v »pravih« barvah, kombinacija modre, rdeče in bližnje infrardeče valovne dolžine (»infrardeči posnetek«); spodnja vrstica: NDVI indeks, vrednost REIP indeksa in prve tri komponente MNF transformacije celotne hiperspektralne kocke.

Figure 5. Image of the same area in different spectral bands and different colour combinations of hyperspectral bands. First line: 473 nm (blue), 688 nm (red), 905 nm (near infrared); second line: true colours, combination of blue, red and near infrared (»infrared image«); bottom line: NDVI, REIP and first three components of the MNF transformation of the hyperspectral cube.

izkoriščajo večdimenzionalno naravo hiperspektralnih posnetkov tako, da povečajo izpovednost in informacijsko gostoto posnetkov. Večinoma uporabljamo algoritme za zmanjševanje dimenzij in povečevanje informacijske gostote, ki temeljijo na analizi osnovnih komponent (ang. *principal component analysis*, PCA). Kot postopek za zmanjšanje šuma in zmanjšanje dimenzije podatkov smo uporabili MNF transformacijo (ang. *Minimum Noise Fraction*), ki zmanjša zahtevnost za nadaljnje procesiranje (Traviglia 2006; isti 2008; Doneus *et al.* 2014). Rezultat so rastrski sloji, ki vsebujejo prvih šest komponent z največjo gostoto informacij in najmanj šuma. Sloje, pridobljene z MNF transformacijo, običajno prikazujemo kot rastrske podobe v lažnih barvah. Na ta način dobimo podobe, ki vsebujejo večino informacij hiperspektralne kocke (slika 5).

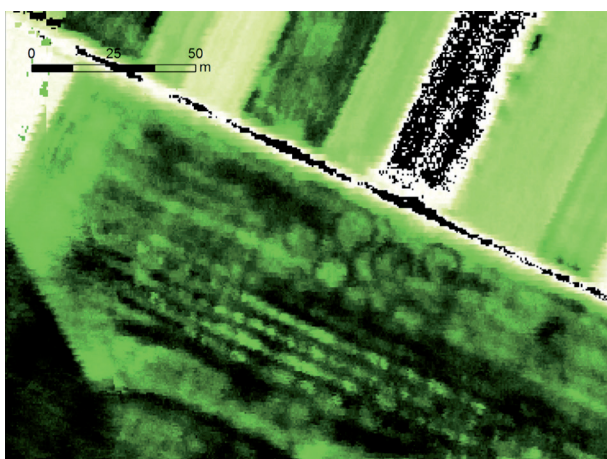
Težava s tovrstnimi metodami je v ta, da so rezultati odvisni od vhodnih podatkov; tako rezultati obdelave različnih pasov med seboj niso primerljivi. MNF sloji so tako predvsem primerni za poudarjanje kontrastov potencialnih znakov.

Večji del analize predstavlja iskanje anomalij, »znakov«, torej označevalcev, ki posredno kažejo na potencialne arheološke sledove (Palmer 2011). Gre za interpretativni

proces, ki je zelo podoben tistemu pri interpretaciji aerofotografij. Pri interpretaciji znakov so nam v pomoč njihova oblika, njihovo razmerje do okolice (torej ali gre za pozitivne ali negativne znake), vzorci njihove razporeditve oziroma njihovih medsebojnih prostorskih in stratigrafskih razmerij, njihova velikost, povezave z ostalimi sledovi oziroma s prostorskim kontekstom ter tekstura površja sledi in konteksta. Običajno velja pravilo, da so za prepoznavanje značilnosti potrebni vsaj 3 slikovni elementi; zaradi resolucije posnetkov to v praksi pomeni, da je mogoče identificirati le znake, večje od poldrugega metra. Zaradi geometrijskih popačenj hiperspektralnih posnetkov in lastnosti vegetacijskih znakov pa je ločljivost še nižja. Pri znakih, manjših od 5–10 slikovnih elementov (3–5 m), je prepoznavanje zelo oteženo. Zato so prepoznane značilnosti reda velikosti od nekaj metrov do nekaj deset in več metrov (slika 6).

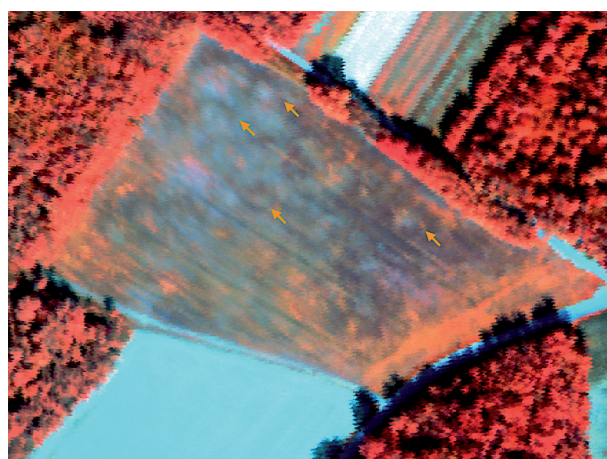
Vegetacijski znaki

Hiperspektralni posnetki so namenjeni predvsem odkrivanju pokopanih značilnosti, ki se na površju kažejo predvsem posredno, preko barve tal (na preoranih oz. odprtih površinah; slika 7) oziroma kontrasta v rasti vegetacije (slika 6).



Slika 6. Grofovsko, južno od Murske Sobotе. Na NDVI indeksu so dobro vidni pozitivni vegetacijski znaki krožnih jarkov, ostankov grobnih gomil.

Figure 6. Grofovsko, south of Murska Sobotа. Ring ditches as the remnants of burial mounds are clearly visible as cropmarks on the NDVI index.



Slika 7. Duga meja severno od Murskih Črncev. Zabrísani pozitivni barvni znaki krožnih jarkov na »infrardečem« posnetku, kombinaciji bližnjega infrardečega, zelenega in modrega pasu.

Figure 7. Duga meja south of Murski Črnci. Ring ditches show as blurred soilmarks on an »infrared« false colour image, a combination of near infrared, green and blue bands.

Znaki so široki od nekaj metrov do nekaj deset metrov, robovi znakov so običajno precej zmeščani. Dolgi so od nekaj deset do nekaj sto metrov, vendar se na različnih površinah (rabah tal, kulturah) različno odražajo, zato so običajno prekinjeni, predvsem z neporaščenimi površinami, kjer se kot vegetacijski znaki slabše izražajo.

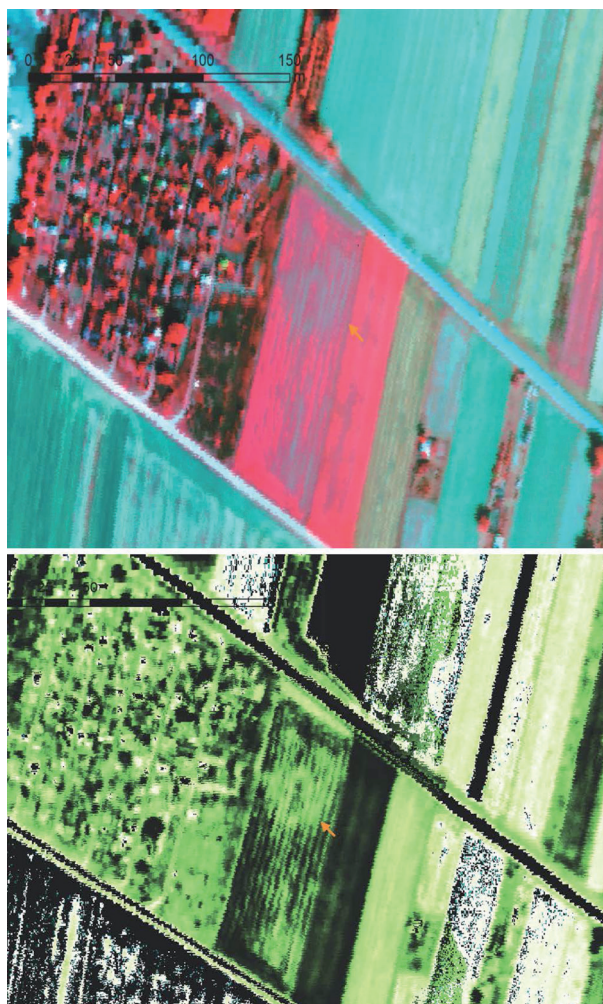
Na hiperspektralnih posnetkih študijskih območij so najpogostejši vegetacijski znaki (ang. *cropmarks*). Vegetacijski znaki so razlike v rasti vegetacije, ki se odzivajo na pokopane arheološke sledove. Vegetacijski znaki se lahko izražajo kot pozitivni znaki, torej kot krpe bujnejšega rastja (kar kaže na jarke in podobne značilnosti pod površjem, ki zadržujejo vodo), in negativnimi znaki, kjer je vegetacija manj bujna in kaže na zidove, groblje in podobne značilnosti, ki slabo zadržujejo vodo. Za prepoznavanje vegetacijskih znakov je primeren predvsem NDVI indeks, ki vegetacijske znake prikaže kot svetlejša ali temnejša lise.

Izražanje vegetacijskih znakov je močno odvisno od lokalne geološke podlage in tipa prsti, pa tudi od vremenskih in rastnih pogojev ter vrste rastja. Na študijskih območjih so najpogostejši pozitivni vegetacijski znaki. To pripisujemo več faktorjem.

Prvi je, da študijska območja ležijo na območjih debelih pleistocenskih prodnatih zasipov, ki jih prekriva le tanka plast prsti. Kamnite strukture so po sposobnosti zadrževanja vode zelo podobne propustni prodnati podlagi, zato ne ustvarjajo večjega kontrasta v rasti vegetacije. Najbolje se izražajo tam, kjer je značilnost tik pod površjem in je prst nad njo zelo tanka. Prav zaradi tanke plasti prsti in dolgotrajne zgodovine antropogenih posegov, predvsem agrarne rabe in oranja, je večina stoječih značilnosti preoranih in uničenih. Ohranjene so le značilnosti pod nivojem oranja, to pa so običajno negativne značilnosti, kot so jarki in različni vkopi.

V Prekmurju se pozitivni vegetacijski znaki najpogosteje kažejo kot različne linearne okrogle ali štirioglate oblike, premera med 5 do 15 m in širine okoli 2 m. Ti znaki se pojavljajo v skupinah in sestavljajo večje skupine oziroma grozde krožnih struktur; na posameznih prostorih lahko preštejemo tudi več deset takšnih znakov (sliki 6 in 7).

Izkopavanja so pokazala, da so okrogli znaki ostanki obodnih jarkov grobnih gomil iz železne in rimske dobe.

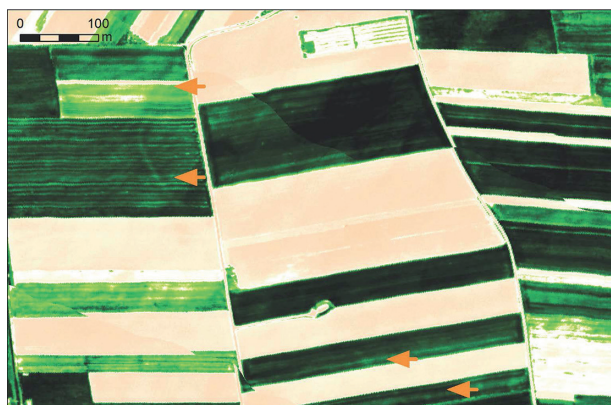


Slika 8. Južno od Drnovega. Vzporedni pozitivni linearni znaki, ki kažejo na jarke ob rimski cesti.

Figure 8. South of Drnovo. Parallel positive cropmarks indicating drainage ditches of a Roman road.

Ponekod se pojavljajo tudi jarki, ki omejujejo prostor štirioglate oblike. Grobne gomile, torej pozitivni elementi strukture, so popolnoma preorani, ohranjeni so le še negativni elementi, torej jarki, ki segajo pod nivo oranja. Okrogli jarki tako dokumentirajo skoraj popolno uničenje gomilnih grobišč (Guštin, Tiefengraber 2001, 110).

V nekaj primerih se pozitivni znaki pojavljajo v obliki linearnih oblik. Običajno gre za jarke, bodisi za ostanke drenažnih jarkov starejše zemljiške razdelitve ali celo drenažnih jarkov ob komunikacijah (slika 8).



Slika 9. Pozitivni in negativni linearni znaki med Veščico in Černelavci na »infrardečem« posnetku in NDVI indeksu.

Figure 9. Positive and negative linear cropmarks between Veščica and Černelavci on the »infrared« photo and NDVI index.

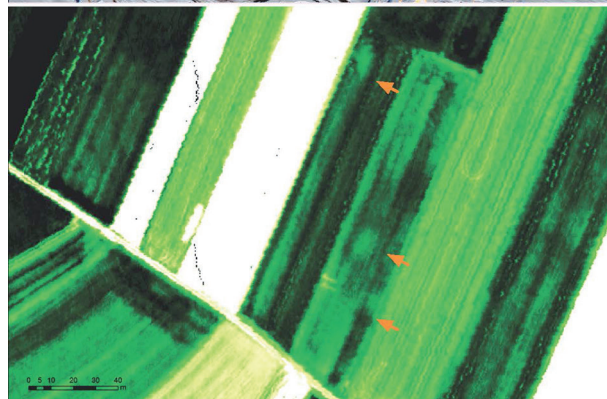
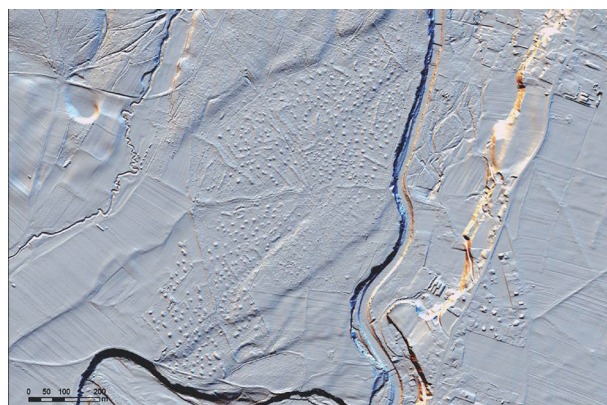
Ti znaki se pogosto pojavljajo v obliki dveh vzporednih znakov, ki sta med seboj oddaljena okoli dvajset metrov, pogosto pa med njima poteka tudi negativen linearen vegetacijski znak. V nekaj primerih jih lahko povežemo z znanimi ostanki rimskih cest. Gre za ostanke obcestnih jarkov, ki so zaradi uničenja bolj vidni od cestišča (slika 9).

Pozitivni linearni vegetacijski znaki so lahko tudi ostanek pretekle zemljiške razdelitve. Zelo pogosti so v Prekmurju, kjer jih je mogoče povezati s sistemom rimskodobne zemljiške razdelitve (Rutar *osebno*) (slika 9).

Zelo pogosti linearni vegetacijski znaki so sledovi opuščanih korit, običajno gre za precej široke, zelo zmehčane lise nepravilnih oblik, s šibkim kontrastom. Teh znakov nismo posebej kartirali. Opuščena korita pričajo o okoljskih premenah in naravnih procesih v krajini, ki lahko pomembno prispevajo k razumevanju časovne globine krajine, kot tudi o tafonomskih procesih, ki vplivajo na vidnost arheoloških sledov.

Negativni vegetacijski znaki so precej redki. Večino negativnih vegetacijskih znakov lahko povežemo s historično zemljiško razdelitvijo, uničeno zaradi komasacij. Gre predvsem za linearnih groblje na robovih njiv, čela njiv in ostanke kolovozov.

Na Kranjskem polju so pogosti zelo šibki, zabrisani okrogli negativni znaki. Interpretiramo jih kot močno



Slika 10. Veliko in dobro ohranjeno polje groblj na Dobravici pri Suhi pri Predosljah, dokumentirano na visokoločljivih topografskih podatkih ZLS (zgoraj), in zabrisani negativni vegetacijski sledovi podobnih groblj na NDVI indeksu pri Visokem (spodaj).

Figure 10. Large and well preserved cairnfield on Dobravica near Suha pri Predosljah, recorded by high resolution ALS topographic data (above) and faded negative cropmarks of similar cairns on the NDVI index near Visoko (below).

preorane ostanke groblj. Takšne groblje se pojavljajo na visokoločljivih topografskih podatkih ZLS v obliki obširnih polj groblj v gozdovih (glej tudi Mlekuž 2015). Gre za ostanke čiščenja površja, starejšega od moderne zemljiške razdelitve in rabe tal, morda celo prazgodovinske rabe krajine. Ogleli groblje kažejo, da so sestavljene predvsem iz debelega proda. Na odprtih površinah so groblje popolnoma preorane, zaradi podobne sestave kot jo ima geološka podlaga pa so tudi zelo nizko kontrastne.

Nekaj linearnih negativnih znakov lahko povežemo z ostanki rimskih cest, opisanimi zgoraj (slika 8).

Pojavljajo se tudi negativni linearni znaki pravokotnih oblik. Robovi so – podobno kot pri vseh negativnih znakih – precej zabrisani. Najbrž gre za ruševinske groblje, ki jih morda lahko povežemo z rimsko podeželsko arhitekturo. V drugih primerih gre za nedoločljive ostanke nasutega materiala, najbrž ostanke grobelj, gomil ali morda ruševinskih grobelj.

Večina pozitivnih linearnih značilnosti na posnetkih ZLS ni prepoznavnih. Izjema so le kratki odseki morebitnih rimskodobnih cest, ki jih lahko prepoznamo bodisi kot linearne pozitivne značilnosti na ZLS in kot kombinacijo pozitivnih in negativnih linearnih vegetacijskih znakov.

Integracija ZLS in hiperspektralnih posnetkov

Pri uporabi neinvazivnih ekstenzivnih metod je ključna integracija rezultatov. Dometi posameznih metod so močno omejeni; metode zaznajo le določene vidike arheoloških sledov. Tako npr. ZLS odlično zaznava le površinske anomalije; tu je hiperspektralno snemanje nemogoče, veliko bolj uspešno pa je pri zaznavanju znakov, ki kažejo na pokopane značilnosti, kjer ZLS popolnoma odpove.

Primerjava med rezultati obeh metod na območju, kjer sta bili izvedeni obe, kaže, da sta si zelo komplementarni. Redki sledovi, ki smo jih prepoznali na posnetkih ZLS, se pojavljajo tudi kot znaki na hiperspektralnih posnetkih.

Največja razlika med dometom ZLS in hiperspektralnim snemanjem se kaže pri pozitivnih vegetacijskih znakih, torej znakih, ki kažejo na vkope, jarke in podobne strukture pod površjem. Tovrstne značilnosti na posnetkih ZLS ne nastopajo, na hiperspektralnih posnetkih pa so eden najpogostejših znakov.

Predvsem pa sta si metodi komplementarni prostorsko. Moderna raba tal je krajino arbitrarno razdelila na območja z različno vidnostjo arheoloških sledov. Upoštevanje rezultatov le ene metode kaže zelo popačeno sliko. V gozdovih so sledovi zelo dobro ohranjeni, medtem ko jih na agrarnih površinah več ni. Hiperspektralna snemanja nam omogočajo, da dopolnimo razumevanje prostorov, kjer sledov na posnetkih ZLS ni več. Tako smo npr. v gozdovih na Kranjskem polju na visokoločljivih topografskih podatkih ZLS prepoznali obširna, odlično ohranjena polja grobelj. Te značilnosti na robovih gozda izginejo, kar kaže, da so starejše od moderne rabe tal. Na

odprtih površinah površinskih sledov grobelj ni mogoče več prepoznati, pač pa lahko tu prepoznamo negativne vegetacijske znake, ki jih lahko povežemo s preoranimi grobljami.

Podobno so na posnetkih ZLS – predvsem na Štajerskem in v Prekmurju – zelo pogosti skupki pozitivnih okroglih značilnosti, grobnih gomil. Ostanke grobnih gomil se na hiperspektralnih snemanjih kažejo predvsem kot okrogli vegetacijski znaki, sledovi pokopanih obodnih jarkov. Veliko število teh znakov na odprtih površinah pomembno dopolnjuje sliko, kot jo kaže ZLS, in nam daje bolj celostno podobo preteklih krajin.

Hiperspektralna snemanja so se najbolje izkazala tam, kjer površinske anomalije, prepoznane na visokoločljivih topografskih podatkih ZLS, namigujejo na prisotnost arheoloških sledov. Površinske anomalije so pogosto močno preorane in zmeščane, zato same ne ponujajo dovolj namigov, ki bi omogočali podrobnejšo karakterizacijo sledov. Tovrstne značilnosti predvsem kažejo, da so arheološki sledovi še ohranjeni in niso dokončno uničeni in preorani. V teh primerih hiperspektralno snemanje izredno dobro dopolnjuje ZLS in omogoča boljše karakterizacijo močno preoblikovanih, zmeščanih in brezobličnih sledov.

To dejstvo kaže, da so na odprtih, agrarnih površinah arheološki sledovi že močno poškodovani in uničeni. Zdi se, da smo na prodnih zasipih rečnih teras zaradi intenzivnega kmetijstva in čedalje globljega oranja izgubili že večino podpovršinskih arheoloških sledov, ki nastopajo le še kot sledovi v ornici. Podobno sliko kažejo tudi rezultati izkopavanja na trasah avtocest, kje so izkopavanja pogosto dokumentirala le negativne značilnosti, kot so jame, vkopi in jarki. Rezultati naše študije sugerirajo, da je za dokumentiranje arheoloških sledov s pomočjo daljinskega zaznavanja morda že prepozno. Ostanjejo le še metode, ki dokumentirajo uničenje, kot so terenski pregledi.

Zaključek

ZLS in hiperspektralno snemanje sta komplementarni metodi in se na odprtih površinah dobro dopolnjujeta. Metodi sta primerni za različne vrste sledov; ZLS predvsem za anomalije na površju in v topografiji, ki so posledica antropogenih posegov, hiperspektralna snemanja pa so primernejša za odkrivanje pokopanih sledov na

površinah, uničenih z oranjem. Hiperspektralna snemanja so primerna predvsem za zaznavanje vegetacijskih znakov, torej kontrastov v rasti vegetacije, ki so odziv na pokopane arheološke značilnosti. Zato je ključna izbira časa snemanja, ki zajame vegetacijo v rastni dobi, ne pa že zrelo ali odmirajočo vegetacijo. Barvni znaki, torej kontrasti v barvi prsti na odprtih površinah, se niso izkazali kot dober znak za prepoznavanje pokopanih arheoloških sledov, saj izkazujejo mnogo manj kontrasta kot vegetacijski znaki.

Hiperspektralni posnetki so se izkazali predvsem pri razumevanju močno preoranih in nejasnih anomalij, prepoznanih na ZLS. Večinoma gre za linearne znake, ki kažejo na pokopane negative, kot so jarki in podobno. V nekaterih primerih pa tudi pokopane pozitivne strukture, kot so nasipi ter predvsem groblje in gomile.

Kot velika pomanjkljivost hiperspektralnega snemanja se je izkazala prostorska resolucija. Izbrana je bila resolucija 0,5 m, vendar je bila, ob težavah z georeferenciranjem in geometrijskim popačenjem, ki so značilne za hiperspektralno snemanje, dejanska ločljivost še slabša. Ta resolucija je prenizka, da bi zaznali prostorsko majhne anomalije, kot so sledovi zidov in podobno. Zato smo s pomočjo hiperspektralnega snemanja zaznali predvsem večje anomalije, širine od nekaj metrov, do predvsem nekaj deset metrov. Spektralna resolucija se je izkazala za ustrezno oziroma celo previsoko; previsoko zato, ker visoka spektralna resolucija močno poveča čas in kompleksnost procesiranja podatkov. Za arheološko interpretacijo se je najbolj izkazal indeks NDVI; primeren je predvsem za prepoznavanje pozitivnih vegetacijskih znakov. Vendar NDVI ne zadostuje; predvsem za prepoznavanje šibkih pozitivnih vegetacijskih znakov ga je potrebno dopolniti s podobami v lažnih barvah. Te so primerne tudi za prepoznavanje barvnih znakov na površinah brez vegetacije. Za zelo primerno se je izkazala MNF transformacija hiperspektralne kocke. Poglavitna težava pri MNF je, da rezultati obdelave posameznih pasov snemanja med seboj niso primerljivi.

Vsi študijski primeri pokrivajo kulturno krajino, ki sta jo zaznamovala poselitev in intenzivno obdelovanje površja. Značilnosti so močno predelane zaradi oranja in obdelave, zato so običajno ohranjene zgolj kot šibki, zabrisani sledovi. Najpogostejši sledovi so okrogli pozitivni vegetacijski znaki, ki jih v večini primerov lahko interpretiramo kot prazgodovinske ali rimskodobne gomile.

Povežemo jih lahko z vegetacijskimi znaki, ki so bili prepoznani pri zračnem snemanju Prekmurja, in skupki gomil, ki jih prepoznamo na posnetkih ZLS. Pojavljajo pa se tudi ostanki pretekle zemljiške razdelitve in rabe tal ter ostanki komunikacij.

Seveda je uporaba metod daljinskega zaznavanja učinkovita šele, ko jih kombiniramo z drugimi metodami, kot so terenski pregledi, geofizikalne metode in naravoslovna vzorčenja. Vendar ZLS tudi tu prinaša novo kakovost, saj zaradi velikih površin, ki jih pokriva, in z jasno sliko površja omogoča, da lažje načrtujemo druge raziskave in postavimo rezultate raziskav v širši kontekst. Tako je potrebno pričujočo nalogo razumeti zgolj kot prvi korak k resničnemu razumevanju arheoloških sledov. To še posebej velja za vrsto šibkih in težko prepoznavnih značilnosti, ki ji bo mogoče natančneje opredeliti ali celo potrditi le z drugimi raziskavami, to znanje pa nam bo omogočilo boljšo interpretacijo daljinskega zaznavanja.

Literatura / References

- AQDUS, S. A., W. S. HANSON, J. DRUMMOND 2012, The potential of hyperspectral and multi-spectral imagery to enhance archaeological cropmark detection: a comparative study. – *Journal of Archaeological Science* 39(7), 1915–1924.
- BANNARI, A., D. MORIN, F. BONN, A. R. HUETE 1995, A review of vegetation indices. – *Remote sensing review* 13(1–2), 95–120.
- BECK, A. R. 2011, Archaeological Applications of Multi/hyperspectral Data – Challenges and Potential. – V / In: D. C. Cowley (ur. / ed.), *Remote Sensing for Archaeological Heritage Management: Proceedings of the 11th EAC Heritage Management Symposium, Reykjavik, Iceland, (Issue 3 of Occasional publication of the Aerial Archaeology Research Group)*, Brussels, 87–98.
- BERNSTEIN, L. S. 2012, Quick atmospheric correction code: algorithm description and recent upgrades. – *Optical Engineering* 51(11), 111719.
- BORENGASSER, M., W. S. HUNGATE, R. L. WATKINS 2008, *Hyperspectral Remote Sensing: Principles and Applications*. Boca Raton.
- CAVALLI, R. M., F. COLOSI, A. P. S. PIGNATTI, M. POSCOLIERI 2007, Remote hyperspectral imagery as a support to archaeological prospection. – *Journal of Cultural Heritage* 8(3), 272–283.
- CAVALLI, R. M. 2013, *Integrated Approach for Archaeological Prospection Exploiting Airborne Hyperspectral Remote Sensing*. Cham.
- DONEUS, M., G. VERHOEVEN, C. ATZBERGER, M. WESS, M. RUŠ 2014, New ways to extract archaeological information from hyperspectral pixels. – *Journal of Archaeological Science* 52, 84–96.
- GITELSON, A. A., M. N. MERZLYAK, H. K. LICHTENTHALER 1996, Detection of Red Edge Position and Chlorophyll Content by Reflectance Measurements Near 700 nm. – *Journal of Plant Physiology* 148(3–4), 501–508.
- GUŠTIN, M., G. TIEFENGRABER 2001, Prazgodovinske najdbe z avtocestnega odseka Murska Sobota-Nova tabla. – *Arheološki vestnik* 52, 107–116.
- KERMAN, B. 1999, Settlement structures in Prekmurje from the air. – *Arheološki vestnik* 50, 333–347.
- MLEKUŽ, D. 2009, Poplavne ravnice v novi luči: LiDAR in tafonomija aluvialnih krajin. – *Arheo* 26, 7–22.
- MLEKUŽ, D. 2012, Messy landscapes: lidar and the practices of landscaping. – V / In: R. S. Opitz, D. Cowley (ur. / eds.), *Interpreting archaeological topography: lasers, 3D data, observation, visualisation and applications*, Oxford, 102–116.
- MLEKUŽ, D. 2013, Skin deep: LiDAR and good practice of landscape archaeology. – V / In: C. Corsi, B. Slapšak, F. Vermeulen (ur. / eds.), *Good practice in archaeological diagnostics: non-invasive survey of complex archaeological sites, (Natural science in archaeology)*, Cham, 113–129.
- MLEKUŽ, D. 2015, Oblike prazgodovinske poljske razdelitve na Krasu. – V / In: M. Preinfalk (ur. / ed.), *Iz zgodovine Krasa. Kronika. Časopis za slovensko krajevno zgodovino* 63/3, Ljubljana, 675–690.
- NEUBAUER, W., M. DONEUS, I. TRINKS, G. VERHOEVEN, A. S. S. HINTERLEITNER, K. LÖCKER 2011, Long-term Integrated Archaeological Prospection at the Roman Town of Carnuntum/Austria. – V / In: P. M. Johnson, M. Martin (ur. / ed.), *Archaeological survey and the city*, Oxford, 202–221.
- OPITZ, R. S. 2012, An overview of airborne and terrestrial laser scanning in archaeology. – V / In: R. S. Opitz, D. Cowley (ur. / eds.), *Interpreting archaeological topography: airborne laser scanning, 3D data, and ground observation*, Oxford, 13–31.
- OŠTIR, K. 2007, *Daljinsko zaznavanje*. Ljubljana.
- PALMER, R. 2011, Knowledge-based aerial image interpretation. – V / In: D. C. Cowley (ur. / ed.), *Remote Sensing for Archaeological Heritage Management: Proceedings of the 11th EAC Heritage Management Symposium, Reykjavik, Iceland, (Issue 3 of Occasional publication of the Aerial Archaeology Research Group)*, Brussels, 283–292.
- PIETRAPERTOSA, C., M. VELLICO, P. STERZAI, F. COREN, F. 2008, Remote sensing applied to the detection of archaeological buried structures in the aquileia site. – V / In: *Proceedings of the 27° Convegno Nazionale GNGTS - 2008*, Trieste, 368–372.

TRAVIGLIA, A. 2005, A semi-empirical index for estimating soil moisture from MIVIS data to identify sub-surface archaeological sites. – V / In: *Atti della 9a Conferenza Nazionale ASITA, Catania, Milano, 1969–1974*.

TRAVIGLIA, A. 2006, Archaeological usability of Hyperspectral images: successes and failures of image processing techniques. – V / In: *From Space to Place. Proceedings of the 2nd International conference on Remote Sensing in Archaeology*, Oxford, 123–130.

TRAVIGLIA, A. 2008, The combinatorial explosion: defining procedures to reduce data redundancy and to validate the results of processed hyperspectral images. – V / In: *Remote Sensing for Archaeology and Cultural Heritage Management. Proceedings of the 1st International EARSeL Workshop, CNR, Rome*, 85–89.
