

Dálkový archeologický průzkum starého sídelního území Čech Konfrontace výsledků letecké prospekce a analýzy družicových dat

Martin Gojda – Jan John

1. Úvod¹

Aplikace nedestruktivních postupů v oblasti sběru, resp. vyhledávání/detekce archeologických dat je proces, který z mnoha důvodů (zejm. etických, teoreticko–metodologických a technických) razantně vstoupil do studia pravěké i historické minulosti člověka. Stále pravidelnější nasazení neinvazních metod z nich v současnosti učinilo významnou - a často nevyhnutelnou - součástí přípravy projektu terénního výzkumu, v němž se vytrácí rozdíl v hodnotové hierarchii tradičních a nedestruktivních metod.

Vedle klasického vizuálního letecko–archeologického průzkumu, jehož primárním produktem jsou šikmé letecké fotografie, tedy snímky pořizované z ruky, připadá v oblasti identifikace archeologických nemovitých památek a stop minulých krajinných podob stále rostoucí význam datům z tzv. dálkového průzkumu Země (DPZ). Jejich informační potenciál je od osmdesátých let využíván v řadě archeologických a krajinně–historických projektů na celém světě. Ve vývoji tzv. *družicové archeologie* se odráží dynamický rozvoj technických parametrů vlastní snímací techniky (kamer, skenerů), jejich nosičů a komunikačně přenosových systémů - a v nezanedbatelné míře také globálně politické peripetie světa v období studené války a po ní.

Účelem tohoto příspěvku je prezentovat výsledky projektu, v němž jsme se pokusili: 1. analyzovat a interpretovat sérii družicových snímků s velmi vysokým rozlišením (IKONOS, QuickBird) dvou vybraných částí tzv. starého sídelního území (1. Podřipsko; 2. Terežínská kotlina a severní břeh Labe; 3. údolí středního Labe na Kolínsku; 4. střední Poohří–údolí Chomutovky); 2. porovnat jejich výpověď z hlediska detekovatelnosti stop (areálů/objektů) archeologického zájmu s potenciálem šikmých leteckých snímků, které byly na stejném území pořízeny v průběhu dlouhodobě prováděného vizuálního leteckého průzkumu z malých výšek; 3. stručně zhodnotit vypovídací možnosti špiónážních družicových snímků z dob studené války na příkladě série fotografií pořízených satelitním systémem USA KH-7 GAMBIT nad územím dnešní ČR; 4. zobecnit výhody a nevýhody obou druhů dat dálkového archeologického průzkumu a nabídnout náš pohled na míru a charakter jejich použití v současných podmínkách.

2. Archeologie a DPZ

Metody dálkového průzkumu Země, ať už se jedná o šikmé letecké snímkování anebo možnosti využití kolmých fotografií (přehledně u nás naposledy Gojda 2004, Šmejda 2007), jsou dnes již etablovanou součástí naší archeologie. Naproti tomu družicovým snímkům pořizovaným z oběžné dráhy Země bylo u nás zatím věnováno poměrně málo pozornosti (Šmejda 2008). Určitou výjimku tvoří práce českých egyptologů, kde se ovšem jedná o použití družicových snímků pouštních oblastí, poskytujících pro dálkový průzkum země velmi dobré podmínky (viz např. Bárta – Brůna – Křivánek 2003, anebo Satelitní atlas pyramid: Bárta – Brůna 2006). „Družicová archeologie“ se tradičně zaměřuje právě na aridní oblasti Předního východu a Egypta, kde je možno díky absenci vegetace velmi dobře studovat různé typy zejména půdních a stínových příznaků (viz např. Beck et al. 2007; Kennedy 1998; Parcak 2004; Philip et al. 2002). Aktuální vývoj v oblasti využití dat DPZ v archeologii se nejlépe zrcadlí v příspěvcích do sborníků z dnes již pravidelně konaných konferencí na toto téma (zejm. Campana – Forte eds. 2006 a Lasaponara – Masini eds. 2008).

V 50. letech minulého století, zhruba deset let po zahájení studené války vedené někdejšími spojenci v tažení proti hitlerovskému Německu, začaly v atmosféře strachu z nečekaného zničujícího vojenského útoku nepřítele hledat vědecké týmy na obou stranách Železné opony nejúčinnější způsoby, jak získávat aktuální informace o výrobě a rozmístění vojenského materiálu, v první řadě zbraní hromadného ničení. Roku 1957 byla na oběžnou dráhu Země vypuštěna první umělá družice, sovětský (ruský) systém Sputnik. Jeho úspěšná mise stála na startovní čáře závodu o dosažení vesmíru a využití možností, které v něm poválečná společnost tušila a toužila pro své potřeby získat. Zhruba dva roky po tomto historickém datu si pod tlakem okolností (sestřelení „nedosažitelného“ špionážního letounu U2 nad územím SSSR) si vládní kruhy v USA uvědomily nutnost přenést výzvědnou techniku do vesmíru a využít bezpečí, které pro nerušené sledování nepřítele nabízí. První americký satelitní systém, jehož vývoj, uvedení na oběžnou dráhu a provozování na rozdíl od Sputniku podléhaly přísnému utajení, byl dokončen a spuštěn v červnu 1959. Teprve desátá mise (srpen 1960) byla úspěšná a na zem se dostaly vůbec první fotografie zemského povrchu pořízené z vesmíru klasickým fotografickým přístrojem. Jsou to právě snímky družicového systému CORONA, které patří k nejčastěji využívaným zdrojům obrazových dat v archeologických projektech v době po ukončení studené války. Rusové nezůstali pozadu a vyvinuli také podobné špionážní systémy – kupodivu část z nich odtajnili dokonce dříve, než byla odstraněna Železná opona.

2.1. Definice DPZ, jeho základní charakteristiky

Dálkovým průzkumem Země označujeme mezioborovou disciplinu, jejímž úkolem je získávat informace o Zemi pro rozličná odvětví vědy. Spočívá v bezkontaktním získávání informací o terénu a objektech ležících na jeho povrchu, příp. nehluboko pod ním. Nosiči přístrojů pro sběr dat jsou vysoko letící letadla a družice. Do poměrně nedávné doby, kdy rychlý rozvoj digitálních technologií přenesl některé způsoby pořizování speciálních dat (termovize, radarové a laserové systémy; *Shell 2002*; stručný přehled *Gojda 2005, 806*) i na nosiče operující v menších výškách, tedy na letadla, byl pojem DPZ spojován převážně s pořizováním dat z vesmíru, zatímco sběr informací o povrchu Země prostřednictvím letadel býval označován pojmem letecká fotogrammetrie (cf. *Gojda 2004, Halounová – Pavelka 2005, Kolečka – Kučera 2001*; pokud není uvedeno jinak, byly následující informace čerpány z uvedených zdrojů)².

Počátky DPZ jsou spjaty s rozvojem balonové vzduchoplavby a fotografie (*Gojda 2008a*) a s jejich využitím jak pro vojenské, tak i civilní účely (např. *Deuel 1979*). Vzhledem k zaměření tohoto příspěvku se budeme v následující části věnovat výlučně tzv. kosmickému dálkovému průzkumu, jehož vznik před půl stoletím zásadně poznamenaly zpravodajské potřeby období studené války. V současnosti lze hovořit o fungování 4 typů družicových systémů, a to operačních (komečních), experimentálních (vědeckých), vojenských (zpravodajských) a amatérských. Celkový počet satelitů vyslaných (často dnes již ovšem nefunkčních) na oběžnou dráhu Země se odhaduje na zhruba 8 tisíc. Kromě družic může být nosičem snímacího zařízení (resp. radarů) také raketoplán (viz níže).

Snímací technikou používanou v oblasti kosmického DPZ tvoří jednak klasické fotokomory, televizní kamery a mechanicko-optické skenery pořizující analogový záznam, a jednak široká škála přístrojů, které měří intenzitu emitovaného nebo odraženého záření, převádějí jej na elektr. signál a ten zaznamenávají v podobě digitálních dat. Zjednodušeně se tato zařízení nazývají radiometry. Mezi tzv. aktivní radiometry (takové, které emitují svůj vlastní zdroj záření) patří zejména radary a lidary, do skupiny pasivních radiometrů (založených na měření elektromagnetického záření, jehož zdrojem je Slunce), se řadí především elektronické skenery a spektrometry.

Základním parametrem, který kvalifikuje družicová data pro jejich využití v rozmanitých oblastech vědy – archeologii nevyjímaje - je technická kvalita měřicí aparatury. Ta je dána *rozlišovací schopností*, a to:

1. *prostorovou (geometrickou)* – označuje, jak velkou plochu na zemském povrchu ve skutečnosti představuje jeden snímací element (pixel) družicového snímku
2. *spektrální* – udává počet použitých spektrálních intervalů (pásen) a definuje jejich šířku
3. *radiometrickou* – vyjadřuje počet úrovní (šedi), do kterých je digitální obraz kvantován; udává se v bitech (bit/pixel)
4. *termínovou* – udává časový interval mezi po sobě následujícími měřeními. V případě měření z družic se tedy jedná o dva po sobě následující přelety

Pro detekci archeologických památek mají největší význam první dvě uvedená rozlišení. V civilní sféře jsou dnes dostupné snímky s prostorovým rozlišením nízkým–středním (1000 – 10 m), vysokým (10 – 2 m) a velmi vysokým (1 m a méně). Není přitom bez zajímavosti, že již na přelomu padesátých a šedesátých let 20. století dosahovaly fotoprůzkumné špionážní družice na velmi nízkých drahách rozlišení zhruba 0,15 m (Pavelka 2004, 9). Současné snímky špionážních systémů přirozeně nejsou dostupné a jejich prostorové rozlišení není přesně známo, pravděpodobně se ale pohybuje kolem hodnoty 0,1 m.

U spektrálního rozlišení je charakteristika obrazu dána tím, do jaké míry různé objekty odrážejí nebo pohlcují různé vlnové délky elektromagnetického záření, jehož zdrojem je zpravidla Slunce. Rozlišujeme *panchromatická data* pořízená v jediné (viditelné) části spektra, tedy běžné černobílé fotografie, dále *multispektrální data* zachycující odrazivost v několika spektrálních pásmech (zpravidla oddělené hlavní části viditelné R+G+B části spektra, a také infračervená část optického spektra), a konečně hyperspektrální data popisující odrazivost v desítkách až stovkách spektrálních pásen (k jejich aplikaci v archeologii cf. Cavalli et al. 2003). Prostorové rozlišení bohužel bývá u multispektrálních a hyperspektrálních dat podstatně horší než u panchromatických. Existují rovněž aktivní radarová zařízení fungující v mikrovlnné části elektromagnetického spektra, což mimo jiné znamená, že mohou fungovat i v noci a za nepříznivých meteorologických podmínek.

2.2. Satelitní systémy pro dálkový průzkum v archeologii

V této kapitole prezentujeme stručný přehled těch družicových systémů, jejichž data jsou opakovaně využívána v archeologii. Obecně lze konstatovat, že v dosavadní historii využití dat kosmického DPZ v projektech zaměřených na identifikaci, dokumentaci a ochranu archeologického dědictví se uplatnily data ze všech tří základních typů družicových zařízení (přehled o dostupnosti družicových snímků na internetu viz tab. 1). Jedná se o snímky pořízené:

1. klasickými fotografickými kamerami
2. digitálními sensory (skenery, spektrometry)
3. zobrazujícími radary

Ad 1.

CORONA. Nejstarší družicový program určený primárně k pořizování špionážních dat (panchromatických fotografií), fungoval v letech 1960 – 1972. Byl produktem spolupráce mezi US Air Force, CIA a několika soukromými společnostmi. Mise v jednotlivých etapách programu CORONA jsou značeny jako KH (1-4). Nejstarší snímky měly rozlišení cca 12 m, nejvyššího rozlišení pak bylo dosaženo u kamer KH-4B (cca 1,8 m), které fungovaly od roku 1967. Systém KH-4 přinesl výrazná technická zlepšení, především proto, že použitím dvojice kamer začal být povrch Země snímkován stereoskopicky. V tomto rozlišení dosahovala rozloha území zachyceného na jednom filmovém pásu (tzv. scéna) cca 14 x 188 km, a to v měřítku cca 1 : 250 000. Jednotlivé mise trvaly zpočátku jeden den, později se doba obletu zvyšovala a dosáhla délky téměř tři týdnů.

V roce 1995 proběhla první vlna odtajnění dat z programu CORONA, kdy bylo zpřístupněno více než 860 000 snímků (v tom započítáno asi 40 tisíc snímků z méně známých družicových systémů ARGON a LANYARD). V roce 2000 k nim přibýlo dalších 48 000 snímků družic KH-7-9 (GAMBIT), které již pořizovaly data s velmi vysokým rozlišením 1,2 -

0,6 m/pixel a mapovaly především místa zpravodajského významu na území SSSR, která zůstala nepokrytá družicemi CORONA. Snímky těchto systémů jsou uloženy v US National Archives and Records Administration (NARA) a lze je získat přes US Geological Survey – USGS (*Donoghue et.al. 2002*, 212-214; *Forte 2002*, 208; *Fowler 2007*, 11-13; *Goossens 2005*, 192; *Mac Donald 1995*). Výhodou tohoto archivu je cenová dostupnost snímků, kdy digitalizovaný filmový pozitiv jedné scény lze pořídit za 30 dolarů. Velikost scén je proměnlivá, v závislosti na délce filmového pásu, nicméně se pohybuje minimálně v řádu stovek čtverečních kilometrů (srv. výše). Snímky jsou dnes skenovány s rozlišením 3600 dpi, přičemž nepochybně dochází k určité ztrátě informací. Pro bezeztrátové kopírování by bylo vhodné rozlišení 6400 dpi, což by ovšem vedlo k velké datové náročnosti (*Fowler 2005*, 34). Rozlišení prodáváných snímků systému KH-7 se tak reálně pohybuje v rozmezí 2 - 4 m (cf. *Fowler 2008*, 716).

Snímky z tohoto systému měly pro archeologii velký význam od r. 1995 (odtajnění) do počátku 21. stol., kdy se začaly šířit první data s velice vysokým rozlišením. I nadále je lze využívat jako zdroje historických obrazových dat o tom, jaký byl stav historické krajiny a archeologických památek v 60. – 80. letech 20. století. Po pádu komunistických režimů bývaly tyto snímky také využívány jako podkladové mapy pro rektifikaci z ruky pořízených fotografií, a to v zemích, kde kvalita tamních map byla v té době nízká (např. Rumunsko, cf. *Olteanu 2002*).

KVR-1000. Ruský vojenský systém, pořizoval panchromatické snímky o geometrickém rozlišení 1 – 3 m. Družicové fotografie Evropy logicky pokrývají její západní část, zejména některé oblasti Německa, Velké Británie, Nizozemí, Španělska a Skandinávie (*Fowler 1999*, 20). Pro naše území pravděpodobně neexistují. Snímky byly zpřístupněny r. 1992 (*Donoghue et al 2002*, 212, 215). V roce 1996 upozornil M. Fowler na snímky sovětské družice KVR-1000 (rozlišení až 1,5 m/pixel), Zhodnocení těchto fotografií pro detekci archeologických struktur se ve větším měřítku věnoval M. Fowler. Na snímcích v okolí lokalit Stonehenge a Boreland Hill na nich identifikoval jak porostové, tak půdní příznaky různých objektů (zejména ohrazení), a to v kvalitě srovnatelné s kolmými leteckými snímky (*Fowler 1996*).

Ad 2.

A.Systémy se středním/vysokým rozlišením

LANDSAT. Americký civilní systém provozovaný od r. 1972 NASA; mezi lety 1986-1999 operoval jako komerční podnik, od r. 1999 (start modulu LANDSAT 7) opět provozován vládou. Poskytuje multispektrální data. První tři družice používaly multispektrální sensor (MSS) s rozlišením 80 m. LANDSAT 4 a 5 kromě toho vylepšený multispektrální sensor, tzv. Thematic Mapper, který pracuje s rozlišením 28,5 m. LANDSAT 7 nese výkonnější TM (ETM+), který pořizuje navíc panchromatické snímky s prostor. rozlišením 15 m. Snímky jsou také součástí známého serveru Google Earth.

SPOT. Francouzský civilní družicový systém, na oběžnou dráhu byly postupně vypuštěny tři moduly (první startoval r. 1986). Vybavení: multispektrální sensor o rozlišení 20 m a panchromatický sensor o rozlišení 10 m.

Vzhledem k relativně malému rozlišení je využití snímků z LANDSATu a SPOTu pro identifikaci archeologických dat a jejich přesné mapování velmi omezené, naproti tomu v mnoha projektech posloužily k extrakci důležitých informací o přírodních podmínkách konkrétní studované archeologické krajiny. Velmi dobře se oba systémy osvědčily např. při prospekci zaniklých polních a zavodňovacích systémů a komunikací. Dostupnost: NASA, USGS (*Donoghue et al. 2002*, 215; *Madry 1987*; *Fowler 2007*, 7-9).

Internetová	Družicový systém	URL
-------------	------------------	-----

stránka		
Google Earth	LANDSAT, Quickbird	http://earth.google.com/
NASA World Wind 1.4	LANDSAT	http://worldwind.arc.nasa.gov/
Microsoft Virtual Earth	LANDSAT, Quickbird	http://microsoft.com/virtualearth/default.msp
USGS Earth Explorer	CORONA, GAMBIT, LANDSAT, SIR-C	http://edc.sns.17.cr.usgs.gov/EarthExplorer/
NASA Global Land Cover Facility	LANDSAT, ASTER, SRTM	http://glcapp.umi.acs.umd.edu/index.shtml
NASA	ASTER	http://edcimswww.cr.usgs.gov/pub/imswelcome
SRTM 90m Digital Elevation Data	SRTM	http://srtm.csi.cgiar.org
Geo Eye	IKONOS	http://www.geoeye.com/
Digital Globe	Quickbird	http://digitalglobe.com/
Infoterra	TerraSAR-X	http://infoterra.de/

Tab. 1. Výběr internetových adres, na nichž je možné prohlížet družicové snímky (podle Fowler 2007).

TERRA-ASTER. Snímky z tohoto amerického systému, jehož družice se pohybuje ve výšce 705 km, jsou dostupná od r. 1999. Data pořizovaná senzorem ASTERu jsou snímány ve 14 pásmech a mají prostorové rozlišení 90, 30 a 15 m. Jsou ze všech ostatních systémů nejvhodnější pro trojrozměrné modelování terénu a tvorbu ortofotomap. Je to dáno velmi krátkou dobou, již družice potřebuje k pořízení 3D scény, tedy snímků ze dvou míst (cca 1 minuta, tedy v průběhu jednoho přeletu), což je ve srovnání např. s časem, který k tomu potřebuje SPOT (dny – týdny, tedy během více než jednoho přeletu) významně méně (ke 3D analýze satelitních snímků pro archeologické potřeby cf. *Goossens et al. 2006*). Dostupnost: NASA

B. Systémy s velmi vysokým rozlišením

Vedle zpřístupnění dat ze špiónážních snímků se stejně významným počinem USA stala v polovině 90. letů skutečnost, že americké úřady povolily vyvíjet a uvádět do provozu systémy s velmi vysokými rozlišovacími schopnostmi (metrové a submetrové geometrické rozlišení u panchrom. snímků), které nejsou určeny k vojenským, nýbrž civilním účelům (meteorologie, oceánografie, zemědělství, ekologie aj. Data pořízená těmito systémy mohou společnosti, které je provozují, volně (více méně bez omezení) prodávat (*Donoghue et al. 2002*, 211-212). Snímky lze aplikovat pro vizualizaci do měřítka cca 1 : 5000, jejich kvalita odpovídá kvalitě snímků malého měřítka pořízených leteckou fotogrammetrií (*Boehler et al. 2004*).

Systém **IKONOS** provozuje od r. 1999 na 680 km vzdálené oběžné dráze společnost Space Imaging; senzory této družice poskytují panchromatická data s rozlišením 1 m a multispektrální data (R,G,B,NIR) s rozlišením 4 m, snímky pokrývají plochu 11 x 11 km (*Donoghue et al. 2002*, 215; *Goossens 2005*, 195; *Pavelka 2004*, 81).

Systém **QuickBird** patří společnosti Digital Globe se pohybuje 450 km nad Zemí, přičemž pořizuje snímky scén o velikosti 16,5 x 16,5 km jak v panchromatickém (rozlišení 0,61 m), tak multispektrálním (rozlišení 2,44 m) módu, včetně stereoskopických párů (cf. *Pavelka 2004*, 80;). Na stejné místo nad zemským povrchem se vrací zhruba jednou za tři dny.

V současnosti jsou to právě produkty těchto dvou družicových systémů, které jsou v archeologii z mnoha důvodů nejvyhledávanějším pramenem kosmického DPZ (např. *Grón et*

al. 2004; Lasaponara – Masini 2007; De Laet et al. 2007, tam další odkazy). Přehled nejdůležitějších současných družicových systémů s velmi vysokým rozlišením viz tab. 2.

Stále častěji se také v posledních letech využívá v archeologických projektech dálkového průzkumu pomocí hyperspektrálních spektrometrů

Ad 3.

V oblasti radarové technologie jsou archeologickými projekty využívána data ze zobrazovacích radarů se syntetickou aperturou, jejímiž nosiči jsou jednak satelity, jednak raketoplány. Nízké frekvence použitého záření dovoluje radarům získávat data i přes mlhu, oblačnost a drobný déšť. Radarové vlny také pronikají porostem, do půdy, nebo do sněhové pokrývky, takže dovolují získávat informace i o podpovrchové vrstvě. Obecným problémem bylo vždy relativně malé prostorové rozlišení radarových snímků (10 m a více), což se ale výrazně změnilo v posledních několika málo letech, kdy komerčně dostupné produkty mají rozlišení 1 – 3 m.

Nejčastěji používaná data jsou produktem evropského (**ERS-1** a **ERS-2**), kanadského (**RADARSAT**) a japonského (**JERS**) radarového systému. Do r. 1994 byl celkem třikrát vypuštěn americký systém **Shuttle Imaging Radar - SIR** (SIR-A 1981, SIR-B 1984, SIR-C/X-SAR 1994.), na jehož snímcích byly rozpoznány zaniklé systémy zavlažovacích kanálů v aridních oblastech sev. Ameriky, sev. Afriky a Středního východu, v tropických oblastech Mexika, Guatemaly (mayská sídelní oblast) a JV Asie (Angkor Vat – přes hustou pokrývku vegetace byly přitom odhaleny ceremoniální komplex a systém vodních nádrží a kanálů). **Shuttle Radar Topography Mission (SRTM)** pomohl identifikovat sídlištní pahorky na Předním východě a zaniklý zavlažovací systém v Mezopotámii (souhrnný přehled s odkazy na další liter. - Fowler 2007, 9). Dostupnost: NASA.

Družice	Start	Prostorové rozlišení panchromatických dat (m)	Prostorové rozlišení multispektrálních dat (m)
IKONOS-2	1999	1	4
QuickBird-2	2001	0,61	2,44
OrbView-3	2003	1	4
Kompsat-2	2004	1	4
Eros B	2006	0,7	x
WorldView-1	2007	0,5	x
GeoEye-1	2008	0,41	1,65

Tab. 2. Přehled současných družicových systémů s velmi vysokým rozlišením (podle různých zdrojů)

2.3. Metody zpracování družicových dat

Velmi často se při analýze multispektrálních družicových snímků používají různé metody klasifikace obrazu, které bývají mnohdy automatizované. Jde zpravidla o to, detekovat a sloučit objekty s podobnou odrazivostí do společných tříd, které charakterizují objekty různého typu na zemském povrchu (cf. Sedláček – Hobza 2006, 43). Příznaky archeologických objektů jsou však většinou natolik variabilní, že využití těchto metod umožňují jen v omezené míře a nemohou nahradit prostou vizuální interpretaci (cf. De Laet et al. 2007).

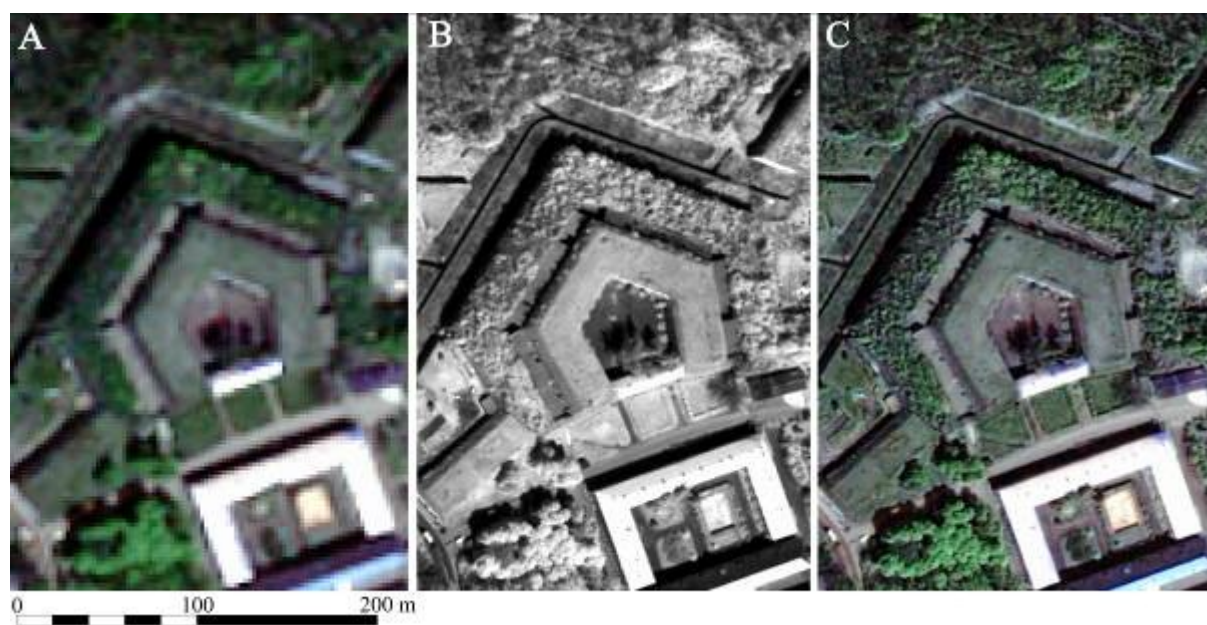
K analýze družicových dat se nejčastěji používají speciální programy určené ke zpracování obrazových dat, které zabírají velkou paměť (v řádu mnoha desítek – stovek megabajtů). V naší práci jsme použily Erdas Imagine, Geomatica a IDRISI.

V následující části budou stručně představeny některé z běžně používaných metod zpracování družicových dat; ty byly zároveň pou v našem projektu.

2.3.1. Pansharpening

Z hlediska prostorového rozlišení se družicová data se hodí zejména ke studiu větších objektů, jako jsou různá ohrazení, mezní systémy polí, anebo zaniklé cesty. Zajímavým projektem tohoto typu je např. mapování zaniklých cest, po nichž byly transportovány sochy moai na Velikonočním ostrově, s pomocí snímků družice QuickBird-2 (Lipo – Hunt 2005).

U současných družicových senzorů narážíme na skutečnost, že panchromatická data s velmi vysokým rozlišením jsou pouze „černobílá“, což znesnadňuje interpretaci snímků, a na druhou stranu „barevné“ multispektrální data v prostorovém rozlišení zaostávají. Problémy s nedostatečným prostorovým rozlišením multispektrálních dat mohou být částečně zredukovány metodou zvanou pansharpening, kdy se do výsledného obrazu kombinují oba typy dat, takže vzniká barevný snímek s rozlišením panchromatických dat. Většinou se jedná o matematický proces založený na různých statistických metodách (např. analýze hlavních komponent). V příkladu demonstrovaném na obr. 1. byl použit automatický algoritmus programu Geomatica (blíže Zhang 2002).



Obr. 1. Terezín (okr. Litoměřice) – bastion č. 6 v severní části terezínské pevnosti. A – multispektrální snímek (R+G+B), B – panchromatický snímek, C – výsledek spojení snímků A a B pomocí metody pansharpening. Snímky družice QuickBird-2 pořízené dne 3. 5. 2006.

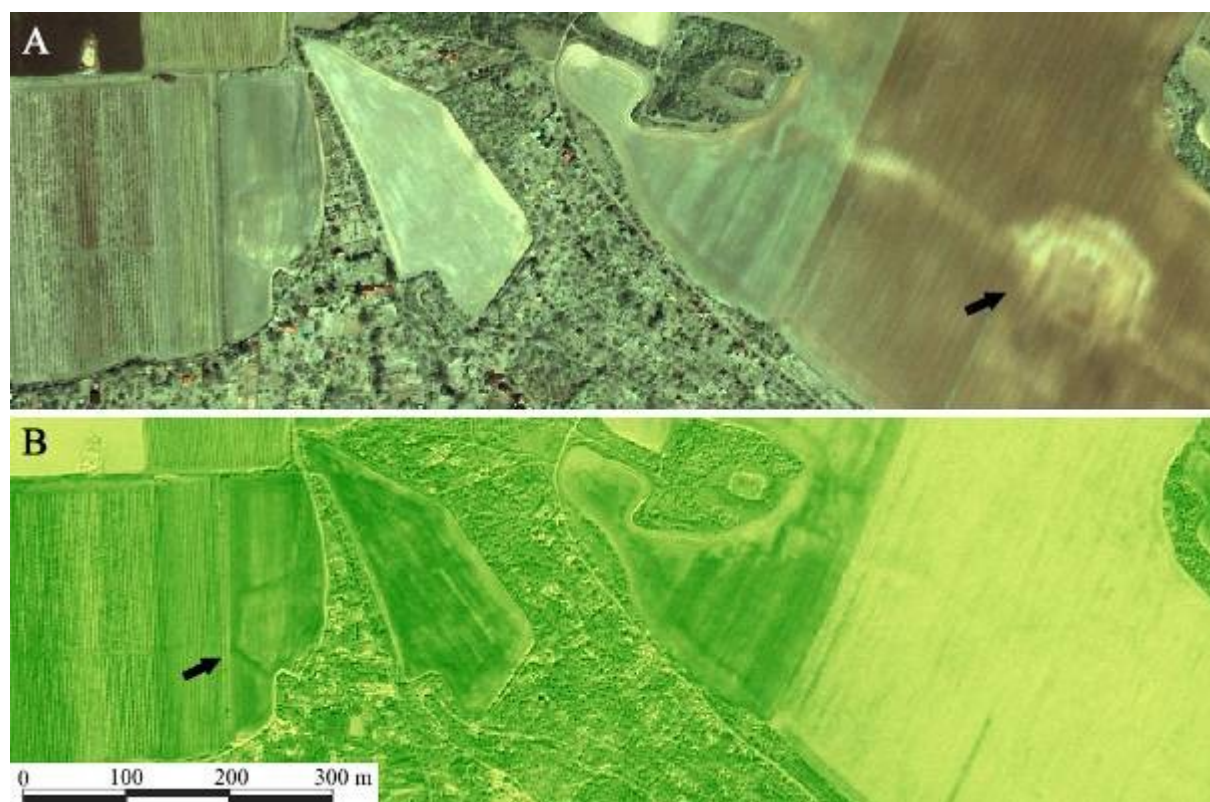
2.3.2. Vegetační indexy

Důležitým zdrojem informací o archeologických objektech jsou tzv. porostové příznaky pozorovatelné na některých typech vegetace. Z tohoto hlediska mohou být výhodné metody výpočtu tzv. vegetačních indexů na základě multispektrálních či hyperspektrálních družicových dat. Tato metoda vychází ze skutečnosti, že v některých pásmech mají rostlinné buňky obsahující chlorofyl velmi vysokou odrazivost, a pokud jsou tato pásma dále matematicky zpracována, dávají velmi dobrý přehled o stavu a změnách vegetace. Často se používají indexy vyjadřující vztah mezi odrazivostí v intervalu červené (RED) viditelné části spektra (600 – 700 nm) a v blízké infračervené (NIR) části spektra (přibližně 700 – 900 nm), neboť zatímco ve viditelném červeném pásmu se záření silně pohlcováno chlorofylem, v neviditelné, blízké infračervené části spektra k tomuto nedochází a odrazivost prudce stoupá (Sedláček – Hobza

2006, 66). Odrazivost je rovněž silně ovlivňována obsahem vody v rostlinách, přičemž obecně platí, že čím je obsah vody nižší, tím je odrazivost vyšší (Halounová - Pavelka 2005, 47).

Přínos vegetačních indexů pro detekci porostových příznaků názorně ilustruje obr. 2, zachycující relikty předsunutých dělostřeleckých baterií v okolí terezínské pevnosti. Zatímco na kompozici složené z viditelných částí spektra jsou nápadné především půdní příznaky rozorané baterie na k. ú. Trnovany (obr. 2/A), v případě poměrového vegetačního indexu (obr. 2/B) jsou zvýrazněny především porostové příznaky další části zaniklého opevnění na katastru Litoměřic. Vegetačních indexů existuje celá řada, v tomto konkrétním případě byl použit tzv. normalizovaný poměrový vegetační index NRVI ($NRVI = RVI - 1 / RVI + R$, přičemž $RVI = RED/NIR$) počítaný programem Idrisi (bližší Eastman 2006, 221).

V důsledku již zmíněného horšího prostorového rozlišení multispektrálních dat je zatím použití této metody omezeno jen na rozměrnější objekty.

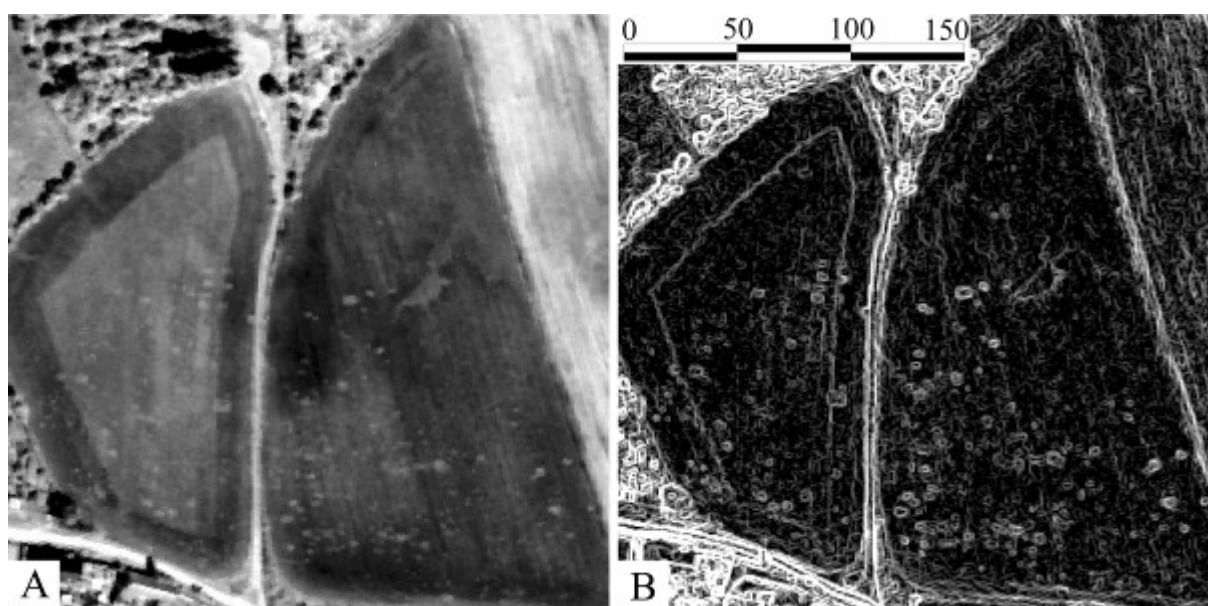


Obr. 2. Litoměřice – Trnovany (okr. Litoměřice) – relikty předsunutého opevnění terezínské pevnosti na pravém břehu Labe (polovina 19. století). A – kombinace multispektrálních snímků viditelné části spektra (R+G+B) upravená pomocí metody pansharpening. B – výsledek výpočtu vegetačního indexu NRVI (rovněž upravený metodou pansharpening). Snímky pořídila družice QuickBird-2 dne 3. 5. 2006.

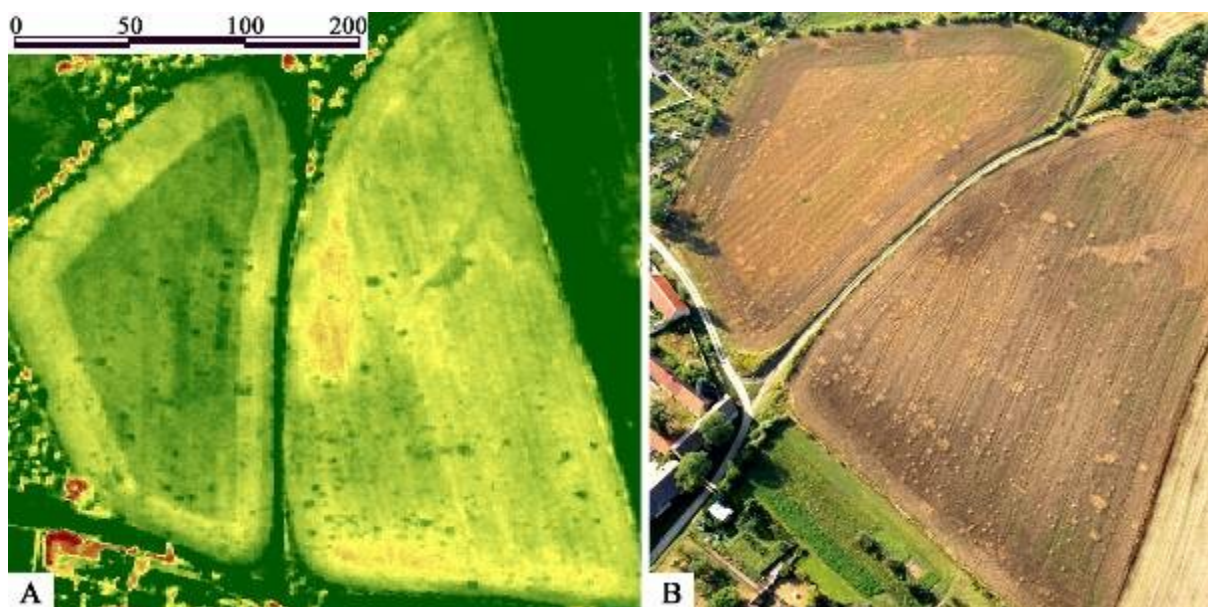
2.3.3. Filtrace obrazu

Pro zvýraznění jednotlivých objektů v rámci snímku mohou být použity i filtry pro detekci hran (Prewittův, Sobelův apod). Na možnosti úspěšné detekce porostových příznaků zahloubených objektů s pomocí vegetačních indexů a metod filtrace obrazu již bylo poukázáno na příkladu zaniklé středověké vesnice Monte Irsi a kláštera Iure Vetere v jižní Itálii (Lasaponara – Masini 2007).

Sobelův hranový filtr, kdy je při výpočtu nové hodnoty pro každou rastrovou buňku počítáno i s osmi sousedními buňkami (kernel 3x3), byl použit v případě lokality Ledčice (viz obr. 3), kde filtr poměrně úspěšně detekoval hrany desítek objektů.



Obr. 3. Ledčice (okr. Mělník). Srovnání panchromatického snímku porostových příznaků nad bodovými objekty (jámy, zemnice) na pravěkém sídlišti (A) a téhož snímku zpracovaného pomocí Sobelova filtru (B). Snímky pořídila družice QuickBird-2 dne 29. 7. 2008.



Obr. 4. Ledčice (okr. Mělník). Porovnání panchromatického snímku v nepravých barvách (QuickBird-2, 29. 7. 2008) a šikmého leteckého snímku (M. Gojda, 27. 7. 2008).

3. Srovnání vizuálního leteckého průzkumu a analýzy družicových dat: příkladové studie z Čech

Od roku 1992 probíhá dlouhodobý projekt pražského Archeologického ústavu AV ČR (k dosavadním výsledkům např. Gojda 1997 a 2004; Gojda ed. 2004). Data - šikmé letecké snímky uchované na různých druzích médií, a to v analogové a digitální formě - jsou jako dlouhodobě využitelný zdroj informací o projevech minulých sídelních aktivit člověka na území

Čech shromažďována v Archivu leteckých snímků ARÚ (dále jen ALS; *Gojda 2008b*). Právě tohoto zdroje jsme využili jako srovnávacího materiálu ke zjištění potenciálu družicových obrazových dat v archeologickém průzkumu.

K uvedenému účelu byly vybrány čtyři oblasti – Podřipsko, Terezínská kotlina a severní břeh Labe, Kolínsko (údolí středního Labe) a údolí řeky Chomutovky (Podkrušnohoří/střední Poohří) - jejichž vizuální prospekci byla v minulých zhruba patnácti letech věnována víceméně systematická pozornost. Určitou výjimkou je údolí Chomutovky, kde byl systematicky průzkum praktikován pouze nárazově (resp. v letech 2005 a 2008). Proto bude zajímavé konfrontovat potenciál příslušného snímku s výsledky, jichž zde bylo dosaženo v rámci dlouhodobého projektu ÚAPP SZ Čech (Z. Smrž).

Družicové snímky lze u nás v současnosti objednat přes několik společností. V našem projektu jsme prostřednictvím ArcData Praha získali:

1. Archivní panchromatické snímky části údolí Chomutovky (z 2.7.2003), Podřipska (z 29.5.2005) a Kolínska (z 15.6.2006) pořízené družicí IKONOS-2;
2. Archivní panchromatické a multispektrální snímky Podřipska (23.4.2005) a Terezínskou kotlinu (3.5.2006) pořízené družicí QuickBird;
3. Panchromatické a multispektrální snímky Podřipska pořízené na objednávku družicí QuickBird dne 29.7.2008.
4. Panchromatické snímky tří oblastí z území ČR (údolí Cidliny a jeho širší okolí, Olomouc a okolí; Znojensko) ze špiónážní družice GAMBIT (KH-7) z dubna-května roku 1966; tyto snímky byly dodány také v multispektrálním provedení, jehož rozlišení je ale vzhledem k tehdejšímu technickému možnostem velmi nízké, takže pro detekci archeologických památek jsou nepoužitelné.

Družicové snímky nabízené provozovateli satelitních systémů jsou dvojího druhu:

- a) *Archivní snímky*, které byly pořízeny v minulosti a pro potřeby archeologického průzkumu mohou být velmi vhodné, protože na nich může být zachycen areál/objekt, který mohl později zaniknout či být poškozen. Výhodou je také jejich cena, která je zhruba o polovinu nižší než u snímků pořizovaných na zakázku. Jejich nevýhodou je, že přirozeně nejsou pořizovány přímo pro potřeby archeologie, takže pro vyžádané území jsou často k dispozici pouze snímky pořízené v ročních obdobích nepříznivých pro výskyt vegetačních (event. půdních) příznaků.
- b) *Snímky pořizované na zakázku objednavatele*. Jelikož archivní data bývají poměrně zřídka pořizována v ročním období, které je nejvhodnější pro detekci porostových příznaků, pokusili jsme se (pro Podřipsko) objednat snímek družice QuickBird-2, který by prostor zachytil v námi přesně vymezeném časovém úseku. Zde je nutné nutno upozornit na úskalí, s nímž jsme se při této objednávce setkali. Přestože distributor dat uvádí, že se družice vrací na stejné místo nad Zemí zhruba jednou za tři dny, skutečnost je evidentně poněkud komplikovanější. Z hlediska možnosti kolmého snímkování je tato doba rozhodně delší a tato skutečnost je nejspíše příčinou faktu, že snímek byl pořízen až 29.7.2008, v době vrcholící sklizně, kdy je výskyt porostových příznaků na zemědělských plodinách vlivem pokročilé sklizně omezen. Např. v případě zřetelně viditelného lichoběžníkového ohrazení v poloze Vražkov 4 došlo k tomu, že poslední šikmé snímkování této lokality se uskutečnilo 27. 7. 08, ale dva dny poté, kdy byl pořízen družicový snímek, již bylo pole sklizeno, takže za této situace (nad objektem je strniště) nebylo možné tento objekt zviditelnit žádným z výše uvedených postupů zpracování multispektrálních snímků.

Jak dokládají výše uvedené údaje (viz též tab. 3), v našem projektu jsme aplikovali oba typy dat.

Oblast	Družice	Datum snímku	Rozlišení panchromatické	Rozlišení multispektrální
Chomutovsko	IKONOS-2	2.7.2003	1 m	x
Podřipsko	QuickBird-2	23.4.2005	0,61 m	2,44 m
Podřipsko	IKONOS-2	29.5.2005	1 m	x
Podřipsko	QuickBird-2	29.7.2008	0,61 m	2,44 m
Terezín. kotlina	QuickBird-2	3.5.2006	0,61 m	2,44 m
Kolínsko	IKONOS-2	15.6.2006	1 m	x

Tab. 3. Základní informace o družicových datech použitých v projektu

Důkladnou vizuální prospekci těchto družicových snímků jsme sledovali ta místa zemského povrchu, na nichž byly v průběhu posledních patnácti let prostřednictvím leteckého průzkumu, praktikovaného z letadla ve výšce kolem 300 metrů nad terénem, identifikovány rozmanité druhy objektů a areálů antropogenního původu pravěkého, středověkého a novověkého stáří (Podřipsko, okolí Terezína, Kolínsko). Hlavním indikátorem, který způsobil jejich odhalení, je vegetace rostoucí nad těmito objekty, jejíž barva, výška a hustota se za určitých podmínek odlišují od okolní vegetace (stejněho druhu, především obilovin). Tento efekt označujeme termínem porostové/vegetační příznaky (Gojda 2004, 76-80). Ojedinele byly identifikovány objekty zvýrazněné pomocí tzv. půdních příznaků (*ibid.*, 80-82). Vedle toho jsme také věnovali pozornost historickým špionážním snímkům ze 60. let (KH-7 GAMBIT), které jenom částečně pokrývají území dlouhodobě sledované v programu letecké prospekce AÚ (Cidlina), protože většina území pokrytá získanými snímky je mimo dosah uvedeného programu (Olomoucko, Znojensko). V následující části budeme sledovat výsledky srovnání v jednotlivých oblastech (čísla za lokalitami odpovídají pořadovým číslům, označujícím v ALS lokality objevené při leteckém průzkumu v jednotlivých katastrech).

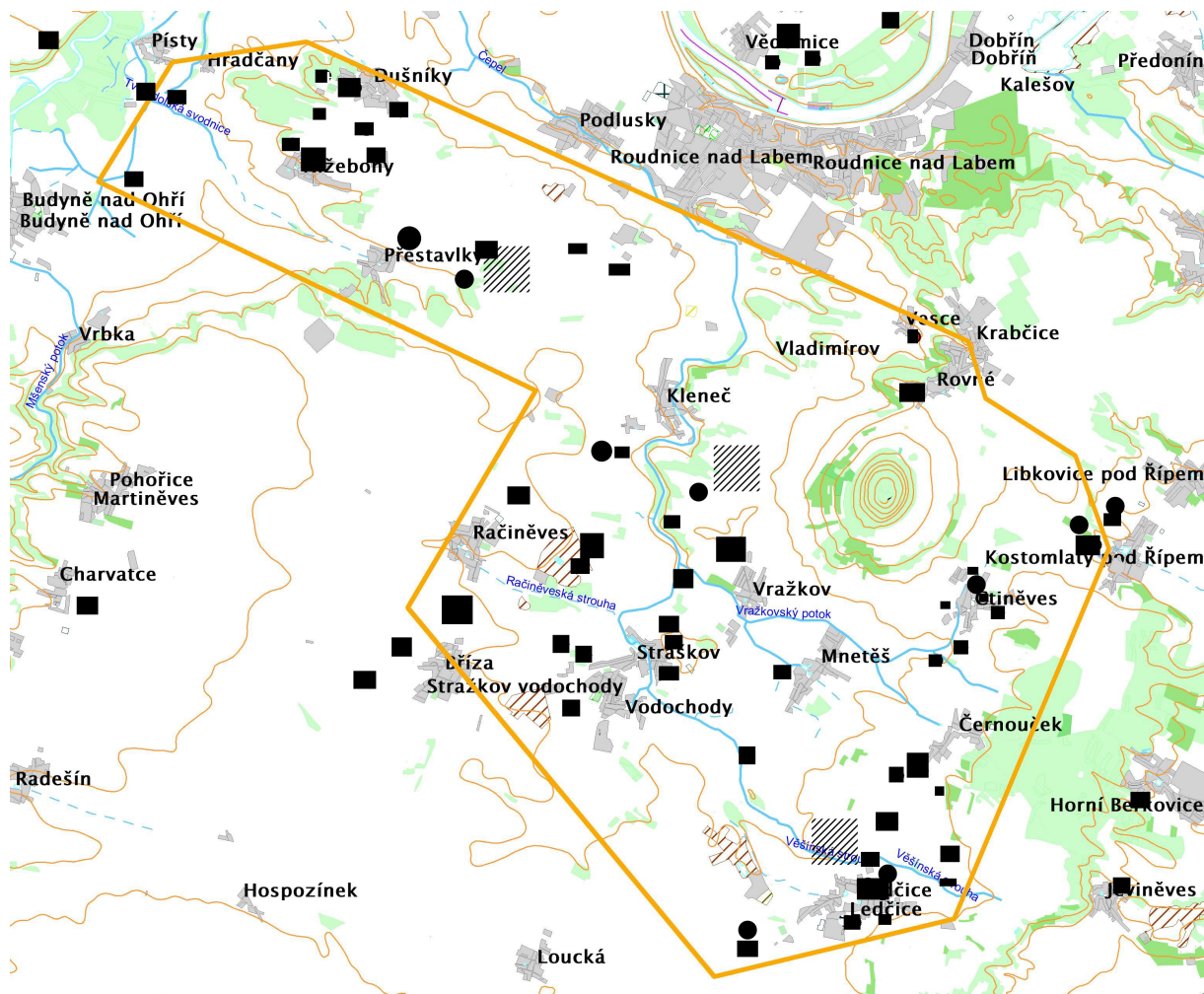
3.1. Podřipsko

V tomto regionu (resp. v té jeho části, kterou zabíraly použité družicové snímky; viz mapa na obr. 6) bylo v předchozích letech aktivitami Archeologického ústavu AVG ČR a KAR identifikováno 51 míst (lokalit), charakterizovaných výskytem často velkého počtu bodových objektů, malých a středně velkých (výjimečně i velkých) příkopových ohrazení (naposledy Gojda 2007). Jak je patrné z mapy, v případě Podřipska se na satelitních snímcích podařilo dohledat vegetací zvýrazněné objekty pouze na čtyřech z těchto lokalit (IKONOS – Ctíněves 4, Kostomlaty p.Ř. 1, Kostomlaty p. Ř. 2, Ledčice 2), resp. na třech (QuickBird – Kleneč 1, Ledčice 2, Ledčice 6). Přitom je třeba říci, že detekovatelnost objektů na některých z těchto lokalit na je samé hranici rozpoznatelnosti a bez předběžné znalosti konkrétní lokality ze šikmých snímků by s nemalou dávkou pravděpodobnosti nebyly vůbec evidovány. Kupodivu jsou často lépe viditelné bodové objekty (zahloubené chaty, jámy, např. Ledčice 2, viz obr. 3. a 4.) než ohrazující příkopy (např. většina poloh v okolí Straškova; obr. 5).



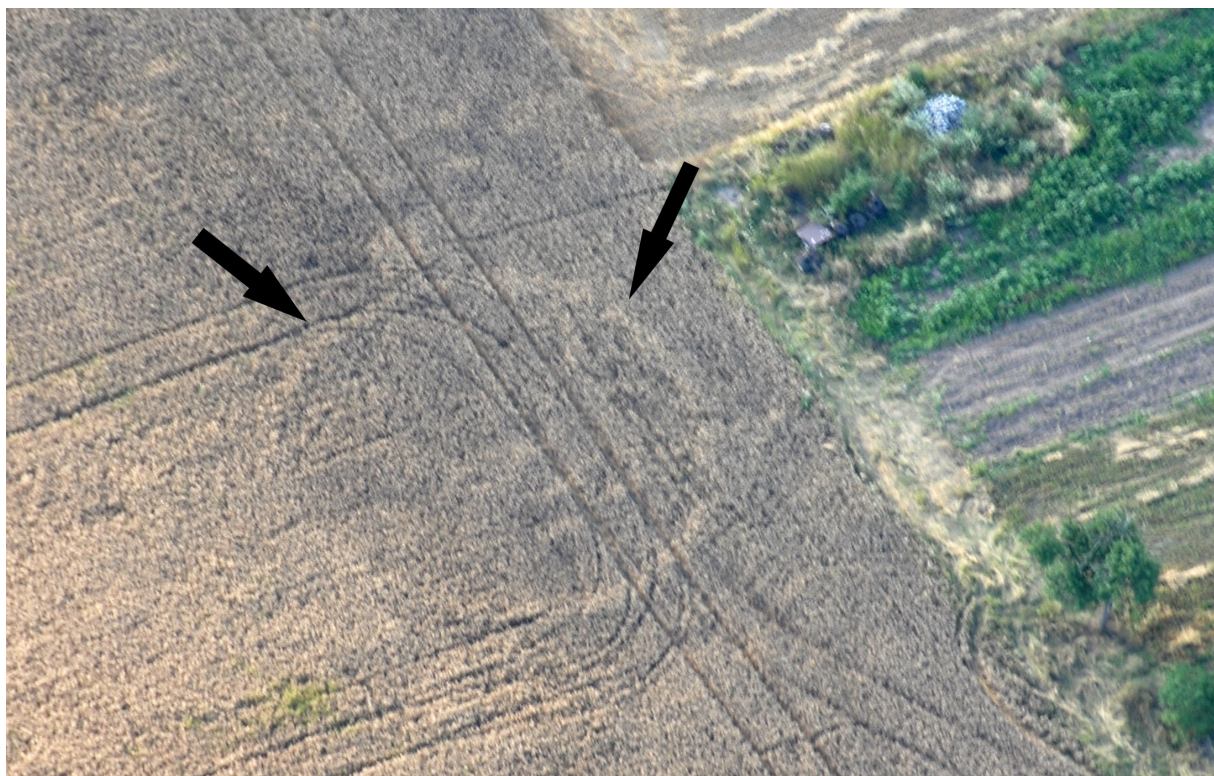
Obr. 5. Straškov I (okr. Litoměřice). Srovnání šikmého snímku pravěkého sídelního areálu (dole) pořízeného 27.7.08 za ideálních podmínek (vrcholná fáze vegetač. cyklu, vynikající světelné podmínky v podvečer jasného slunného dne) a družicového snímku QuickBird-2 pořízeného o dva dny později. Šipky ukazují na půdorys zahloubeného obydlí (zemnice) a

halové stavby (základový žlab, paralelní řady kůl. jam uvnitř, vstup/brána s kůl. jámami po stranách).



Obr. 6. Podřipsko. Lokality identifikované a) leteckým průzkumem a dokumentované pomocí šikmých fotografií (obdélníky; jejich velikost odpovídá zhruba poměrnému plošnému rozsahu identifikovaných areálů); b) na družicových snímcích (kružky); šikmou šrafurou vyznačeny plošně rozsáhlé liniové systémy identifikované na družicových snímcích. Rámeček vymezuje území družicového snímku QuickBird-2 z 29.7.2008, ale na mapě jsou údaje ze všech analyzovaných družicových snímků.

Na lokalitě Černouček 1 (LT) byly 27.7.2008 snímkovány porostové příznaky středně velkého kruhového příkopového ohrazení, známého od první poloviny 90. let minulého století (průměr 16-18 m), které však na panchrom. snímku skenovaném družicí Quickbird o dva dny později je téměř nerozpoznatelné, a to do té míry, že by jej patrně neevidoval ani zkušený pozorovatel v případě, že by o jeho existenci předem nevěděl; obr. 7a-b).



Obr. 7. Černouček 1 (okr. Litoměřice). Rozdíl ve stupni viditelnosti malého kruhového objektu (pravděpodobně obvodového příkopu hrobu) na šikmé letecké fotografii (27.7.2008; nahoře) a na družicovém snímku (29.7. 2009; dole – přibližná poloha objektu je označena šipkami).

Naproti tomu se ale podařilo na družicových snímcích identifikovat místa s výskytem příznaků, které s větší či menší mírou pravděpodobnosti jsou archeologického původu a která dosud nebyla evidována (cf. tab. 4 a obr. 8-9). Jedná se převážně o plošně rozsáhlé liniové systémy, které bývají na družicových snímcích výrazně dobře patrné, a to ve srovnání nejen se šikmými fotografiemi pořizovanými z malých výšek, ale i s ortosnímky dostupnými na internetových serverech.

Katastr	Lokalizace S-42 (střed)	Popis	Velikost
Přestavlky	558650 - 344340	čtyřnásobná lomená linie	délka cca 750 m
Přestavlky	558610 - 344440	dvě linie napříč terén. bloku (zaniklé 2-3 dílné hradiště?)	délka linií 150-200 m
Roudnice n.L.	558640 – 344480	šachovnicový liniový systém (zaniklá pole?)	cca 1 km ²
Kleneč	558450 – 344800	šachovnicový liniový systém (zaniklá pole?)	cca 1,5 km ²
Kleneč	558470 – 344610	dvojitá linie (geol.?, příkopy?)	šířka 10-25 m
Ledčice	557980 – 344960	šachovnicový liniový systém (zaniklá pole?)	cca 0,5 km ²
Vražkov	558400 – 344730	pravoúhlé ohrazení	cca 200 x 100 m

Tab. 4. Podřipsko: areály/objekty nově identifikované na družicových snímcích



Obr. 8. Přestavlky (okr. Litoměřice). Nově identifikované lokality na družicových snímcích IKONOS. Liniový pravoúhlý systém, pravděpodobně zaniklá pole (v pravé horní polovině snímku); šipky uprostřed indikují velký útvar, který je vzhledem k terénní morfologii zach. vlevo od železnice možné s jistou opatrností interpretovat jako zaniklé hradiště se dvěma viditelnými liniemi, snad zaniklými příčnými valy/příkopy (malé šipky uvnitř). Šipky vlevo ukazují na čtyřnásobnou nepravidelně lomenou linii (dvě silné, dvě tenké linie; novověké opevnění?).

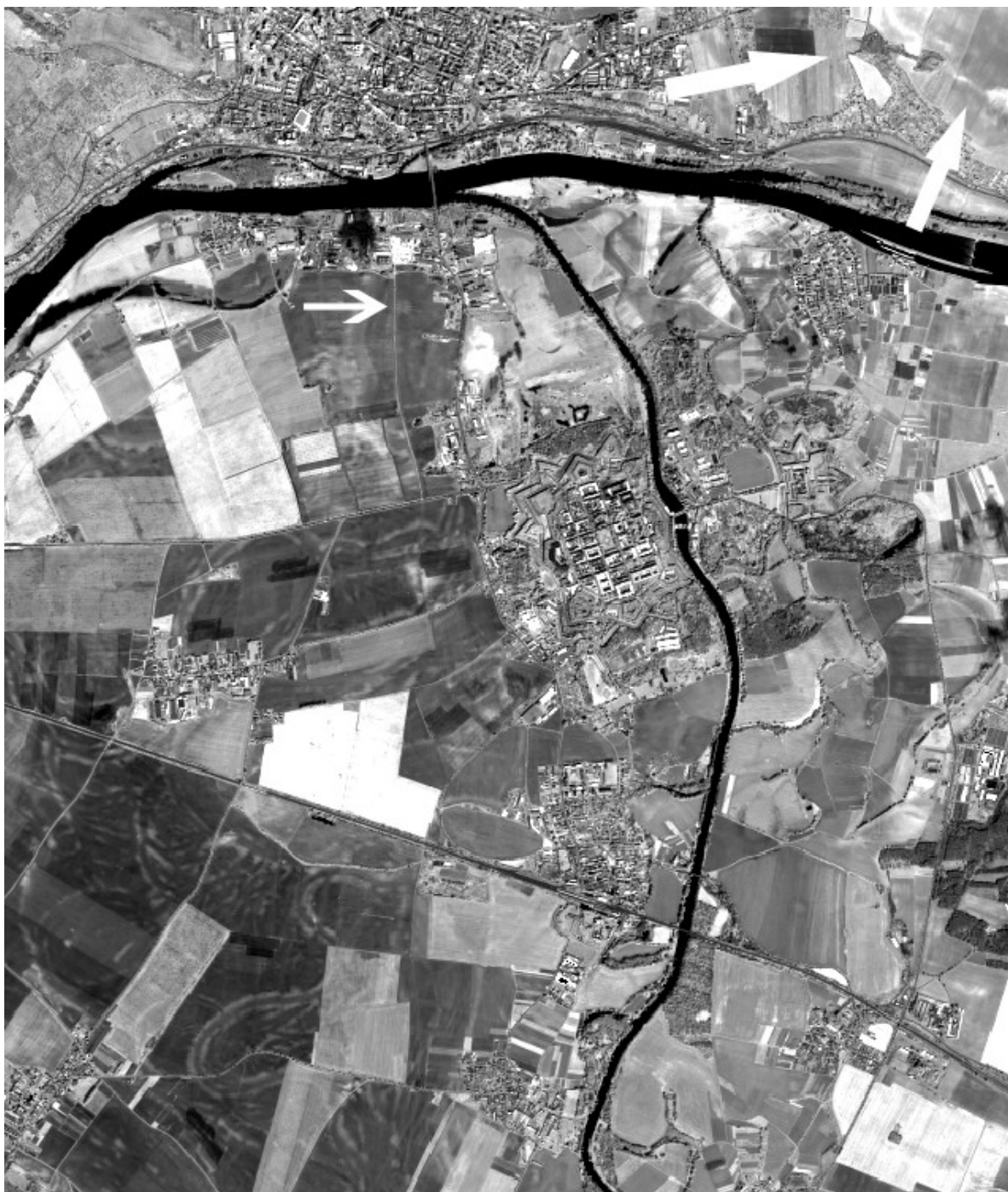


Obr. 9. Ledčice (okr. Mělník). Liniový pravoúhlý systém (levá horní část fotografie; zaniklá pole?). Šipky ukazují na lokalitu Ledčice 2 (viz obr. 3, 4.). IKONOS-2 (29.5.2005).

3.2. Terezínská kotlina a severní břeh Labe

Na území zachyceném na příslušném satelitním snímku (QuickBird-2, 3.5.2006; obr. 10) je v ALS evidována jednak velká koncentrace poloh na katastru obce Hrdly (celkem sedm) a jednak dalších osm lokalit na jiných katastrálních územích. Na snímku jsou zřetelně identifikovatelné tři z těchto lokalit – všechny souvisejí s novověkým opevněním. Jednak se jedná o dvě ze série šesti dělostřeleckých baterií na S břehu Labe (dodatečně vybudované předsunuté opevnění Terezína z pol. 19. stol. u Třeboutic; podrobně k tomu *Gojda 2008c*), z nichž jedna je patrná díky porostovým, druhá díky půdním příznakům (viz kap. 2.3.2 a obr. 2), a jednak o objekt podobného pentagonálního tvaru (a pravděpodobně i podobného účelu) po levé straně Ohře těsně před soutokem s Labem u Mlékojed.

Mimořádně dobře je na družicovém snímku vykreslen systém zaniklých koryt a meandrů v krajině na soutoku Labe a Ohře západně od Terezína.



Obr. 10. Terezińska kotlina na satelitním snímku systému QuickBird-2 (3.5.2006). Šipky v pravém rohu ukazují na polohu novověkého opevnění u Třeboutic (okr. Litoměřice; cf. obr. 2), šipka uprostřed nahoře indikuje umístění polygonálního plošného objektu, velmi pravděpodobně novověké reduty (Mlékojedy I, okr. Litoměřice; cf. obr. 11).



Obr. 11. Mlékojedy 1 (okr. Litoměřice). Pentagonální plošný objekt interpretovatelný s velkou pravděpodobností jako novověké polní opevnění (reduta). Nahoře šikmý snímek (2.4.2006),

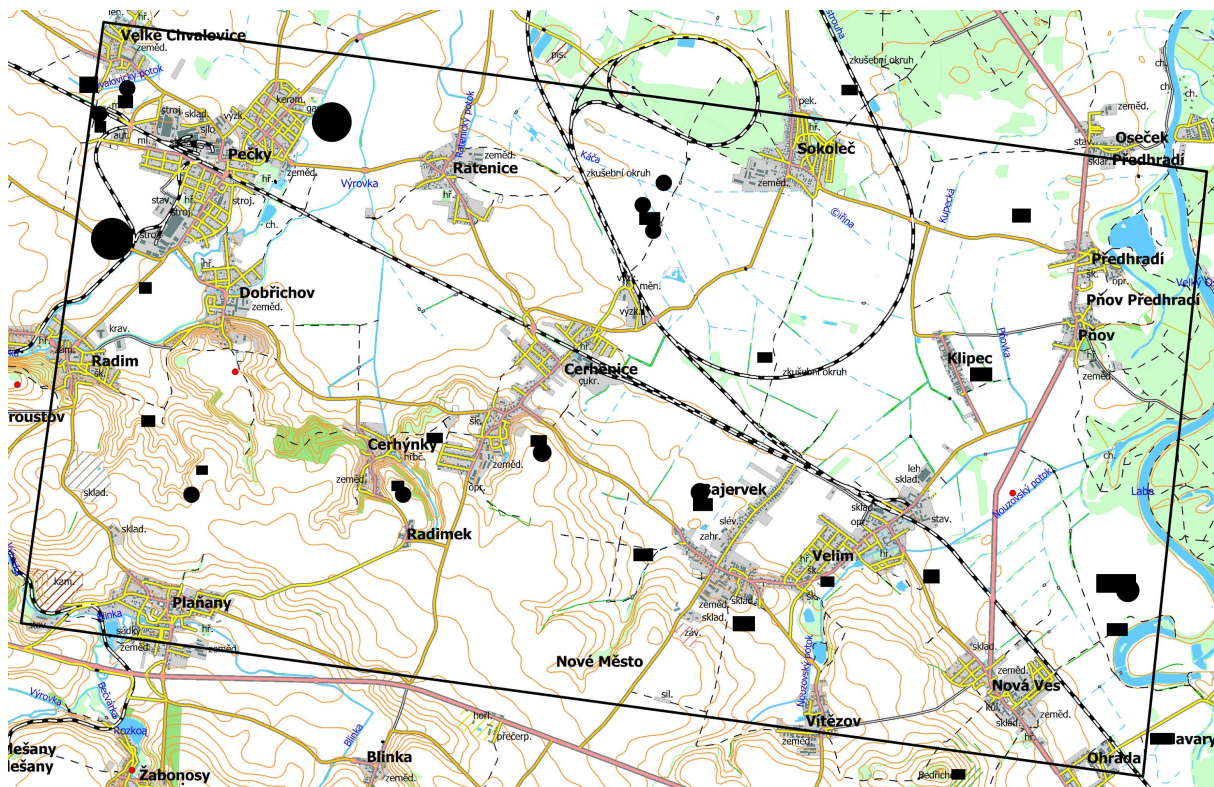
dole zvětšený výřez objektu ze satelitního snímku QuickBird-2 na obr. 10, pořízeného o měsíc později (3.5.2006).

3.3. Údolí středního Labe na Kolínsku

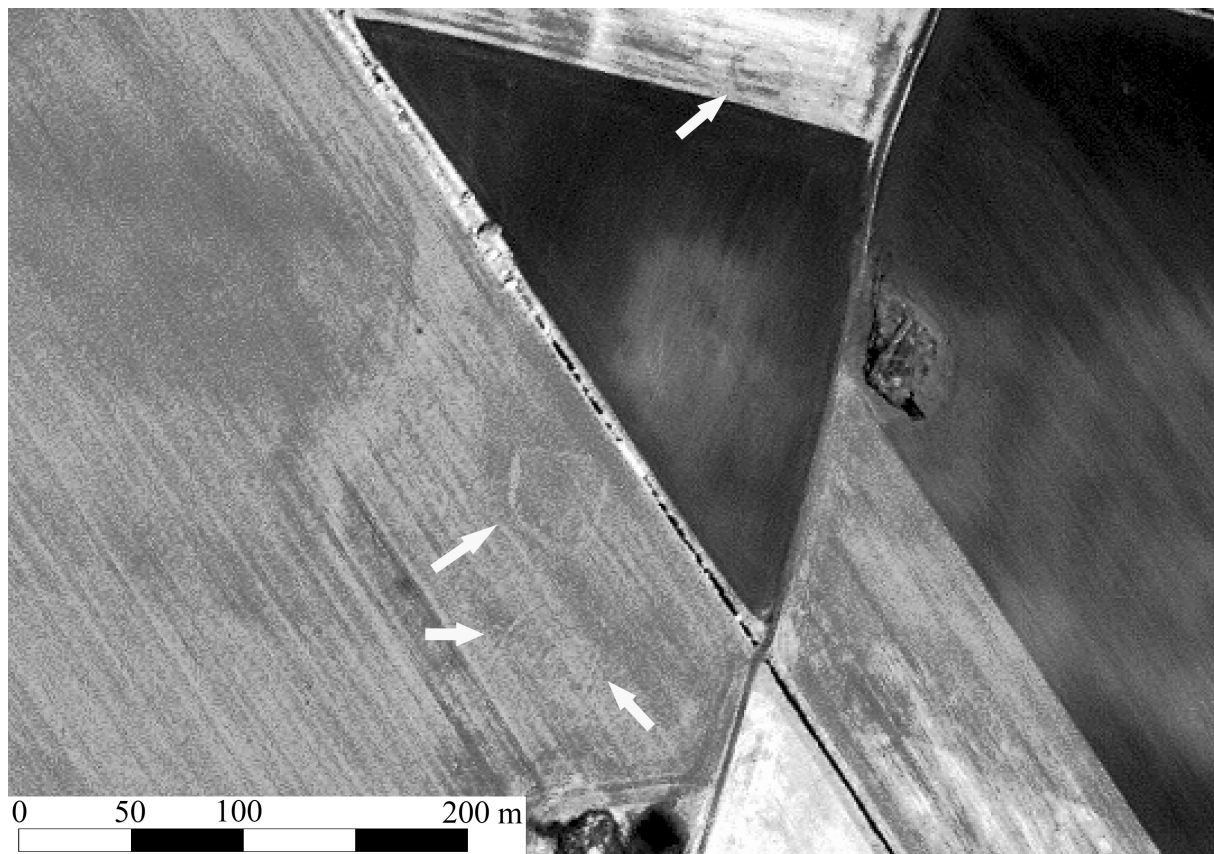
V transektu zachyceném na panchromatickém družicovém snímku systému IKONOS bylo předchozími aktivitami Archeologického ústavu AV ČR rozpoznáno a evidováno celkem 21 poloh s výskytem porostových příznaků. Na družicovém snímku Kolínska jsou porostové příznaky patrné na sedmi polohách z oněch 21, i když některé z nich lze jednoznačně označit za projevy archeologické situace pouze s výhradami (obr. 12). Podobně jako u Podřipska i na Kolínsku jsme na družicovém snímku identifikovali dosud neznámé areály s bodovými objekty (snad pravěké jámy a zahloubené chaty) a jeden liniový objekt. Zcela výjimečná je situace u lokality Sokoleč, kde poblíž nepravidelného čtyřúhelníkového ohrazení identifikovaného při letecké prospekci v minulém desetiletí (Sokoleč 1) jsme na družicovém snímku dohledali v jeho bezprostřední blízkosti další podobný objekt a o 170 m severněji malý kruhový objekt (tab. 5, obr. 13). Zhruba 700 m dlouhá tmavá lomená linie dvojitého příkopu (?) se světlou linií valu (?), do značné míry podobná objektu z Přestavlk na Podřipsku, byla na snímku identifikována Z od Cerhenic (obr. 14). Zajímavou situaci jsme zjistili při analýze družicového snímku u SV okraje obce Velké Chvalovice. Pentagonální tvar jednoho v reliéfu zachovaného objektu a uspořádání liniových útvarů v jeho blízkosti dovolují uvažovat o pozůstatcích novověkých fortifikačních prvků (reduta, resp. redan), které by bylo možno eventuelně spojovat s bitvou sedmileté války u Kolína (obr. 15).

Katastr	Lokalizace S-42 (střed)	Popis	Velikost
Pečky	555030 – 350100	bodové objekty	desítky
Pečky	555150 – 350330	bodové objekty	desítky
Plaňany	554750 – 350230	linie	cca 150 x 120 m
Sokoleč	555009 – 350650	ohrazení pravoúhlé (?)	cca 45 x 40 m
Sokoleč	555115 – 350650	ohrazení kruhové	cca 25 x 22 m
Cerhenice	555000 - 350490	dvojitá lomená linie	délka cca 700 m

Tab. 5. Kolínsko: areály/objekty nově identifikované na družicových snímcích



Obr. 12. Kolínsko. Lokality identifikované a) leteckým průzkumem a dokumentované pomocí šikmých fotografií (obdélníky); b) na družicových snímcích (kroužky). Rámeček vymezuje území družicového snímku IKONOS-2 z 15.6.2006.



Obr. 13. Sokolec (okr. Kolín). Družicový snímek IKONOS-2 (15.6.2006). Šipky v dolní části snímku ukazují na 2 nepravidelná příkopová ohrazení (dole: poprvé rozpoznané na tomto

družicovém snímku, nad ním: identifikované již v 90. letech 20. stol. při letecké prospekci a v ALS evidováno jako Sokoleč 1). Uprostřed nahoře nově identifikovaný malý kruhový příkopový objekt.



Obr. 14. Cerhenice (okr. Kolín). Dvojitá lomená linie. IKONOS-2 (15.6.2006).



Obr. 15. Velké Chvalovice (okr. Kolín). Polygonální útvar zachovaný v terénním reliéfu. Jeho tvar a velikost dovolují uvažovat o interpretaci tohoto objektu jako novověké pevnosti (reduty). IKONOS-2 (15.6.2006).

3.4. Údolí Chomutovky

Relativně největší počet nově identifikovaných lokalit, se podařilo rozlišit na panchromatickém snímku z družice IKONOS. Je to jistě ovlivněno tím, že letecká prospekce zde byla praktikována pouze krátce, v průběhu praktických kurzů leteckého průzkumu se studenty plzeňské katedry v červnu 2005 a 2008. Při tom zde bylo identifikováno 10 poloh s výskytem převážně obytných a pohřebních komponent. Vedle bodových objektů - převahou jam a zahloubených obytných jednotek - zde byly odhaleny i tři malá čtverhranná liniová ohrazení a část jednoho středně velkého ohrazení. Pouze na dvou z celkového počtu deseti lokalit byly při vizuální analýze satelitního snímku dohledány nevýrazné stopy, které lze s jistou rezervou považovat za porostové příznaky obytných komponent. Nově bylo na satelitním snímku identifikováno 7 objektů/areálů (3 liniové objekty/ohrazení, 2 systémy paralelních linií, 2 areály s bodovými objekty – tab. 6), u některých z nich není však jejich archeologický výklad jednoznačný. Mimo uvedené lokality lze na snímku vidět řadu obtížně interpretovatelných linií (zaniklé cesty a vodoteče, moderní produktovody).

Katastr	Lokalizace S-42 (střed)	Popis	Velikost
Všestudy	559200 – 339470	bodové objekty	desítky
Údlice	559100 – 339190	paralelní linie	délka 400 – 100 m
Údlice	559130 – 339150	bodové objekty	Desítky
Březno – Střezov	558620 – 338930	neprav. kruh. ohrazení	průměr cca 50 x 50 m
Bílence	559100 – 339500	kruhové ohrazení	cca 35 x 40 m
Velemyšleves	558840 - 339920	lichoběž. ohrazení	cca 55 x 25 m
Velemyšleves	558750 – 339780	paralelní lomené linie; zaniklý systém teras (?)	délka: několik set m

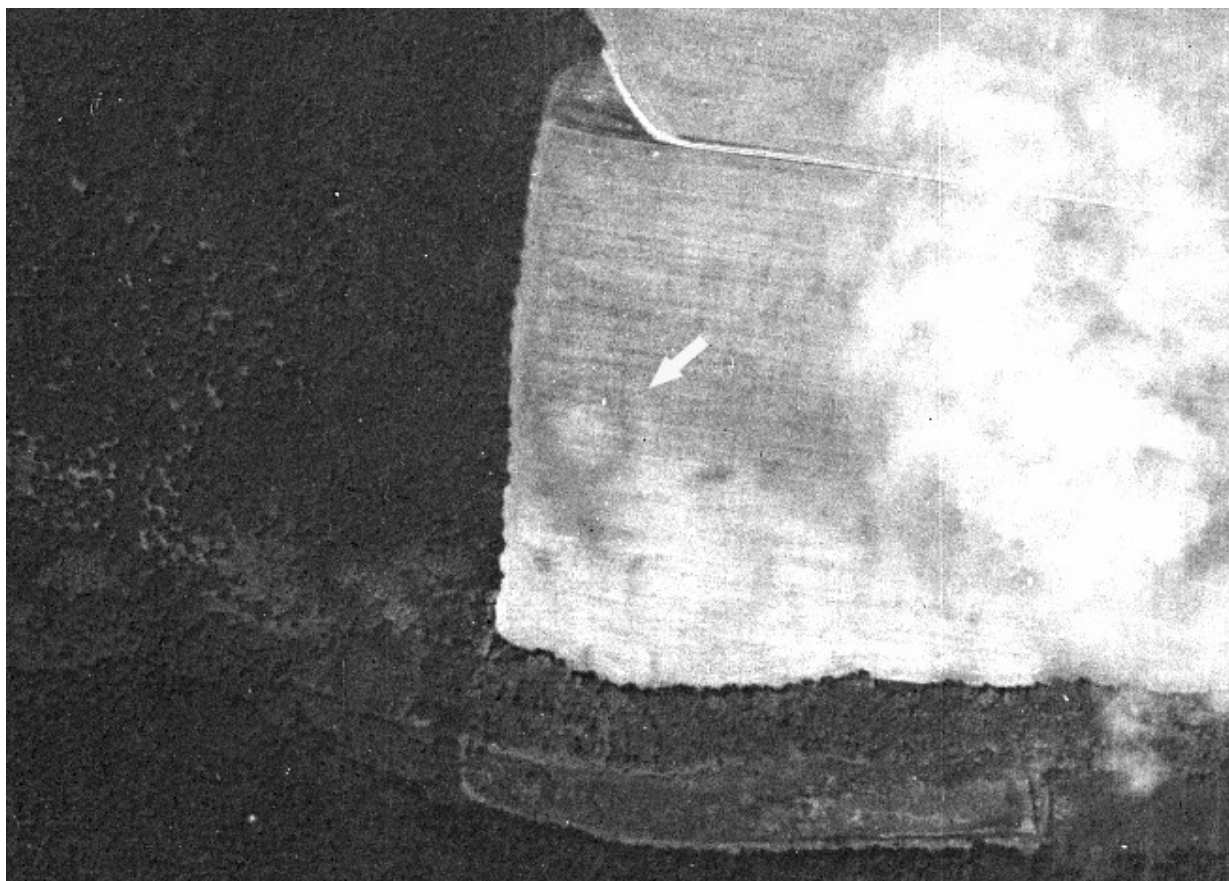
Tab. 6. Údolí Chomutovky: areály/objekty nově identifikované na družicovém snímku



Obr. 16. Velemyšleves (okr. Chomutov). Satelitní snímek IKONOS-2 (2.7.2003). Paralelní linie mohou být zaniklé polní terasy indikované prostřednictvím vegetačních příznaků.

3.5. Regiony Cidlina, Olomouc, Znojmo

Na závěr se ještě stručně zmíníme o analýze série odtajněných špionážních snímků americké série GAMBIT (KH-7) z širší oblasti údolí Cidliny, z Olomoucka a Znojemska, pořízených v roce 1966 (k zákl. parametrům tohoto systému viz kap. 2.2). Zřetelně je na nich patrné, že byly pořízeny před více 40 lety, kdy technické možnosti snímačů byly ve srovnání se současností výrazně horší. Projevuje se to např. v přítomnosti různých šumů (zejm. paralelních vodorovných linií, které mají pravděpodobně původ v navíjení negativů na původní cívky). Přesto i na nich lze dohledat archeologické objekty prostřednictvím vegetačních příznaků (cf. těšetický neolitický rondel na obr. 17), avšak je to obtížnější než je tomu u snímků ze současných družic. Nezanedbatelnou mají cenu jako historický pramen, protože zobrazují podobu krajiny 60. let minulého století jednak v celku, jednak v detailech lokálních komponent, které z ní od té doby zmizely (např. plůžina, komunikace). Bohužel značnou nevýhodou námi zkoumaných snímků je jejich značné (až třicet procentní) zastření povrchu země kvůli oblačnosti, což je ale obecný problém satelitních dat. Ke snímkům byl dodán také jednoduchý program umožňující je otevírat, nikoli upravovat. Nevýhodou je, že snímky se otevírají v nestandardní orientaci – jejich horní okraj je místo na sever pootočen zhruba o 30 stupňů na východ, což lze řešit jen tehdy, použijeme-li k práci s nimi některý ze speciálních softwarů (cf. kap. 2.3.; v případě použití programu Erdas Imagine trvá ovšem jejich otevření několik minut, protože snímky mají velký rozměr a každý z nich zabírá více než 1 GB paměti).



Obr. 17. – Těšetice-Kyjovice (okr. Znojmo) – porostové příznaky neolitického rondelu a okolních objektů v poloze Sutny. Snímek pořídila družice KH7-29 dne 4. 6. 1966.

4. Zhodnocení, diskuze, závěry

V projektu, jehož výsledky jsou předmětem této studie, došlo poprvé v naší archeologii k systematickému využití družicových snímků území ČR. Hlavním cílem bylo zhodnotit jejich potenciál a využití jak při identifikaci archeologických lokalit, tak při výzkumu krajinných celků/transektů v jejich historickém vývoji. V následujících řádcích se pokusíme stručně shrnout nejdůležitější fakta a vyvodit z nich závěry.

Satelitní data jsou výhodným zdrojem informací, dosažených formou vertikálního snímání velkých ploch zemského povrchu, přičemž výsledkem jsou kolmé, (víceméně přesně) georeferencované snímky pořízené často v různých částech spektra. Přitom lze snímkování realizovat i v oblastech nepřístupných pro klasický letecký průzkum. Digitální charakter těchto dat zároveň umožňuje použití rozličných metod zpracování obrazu (filtrace, detekce hran, pansharpening, výpočet vegetačních indexů z multispektrálních dat apod.). Všechny tyto metody jsme pokusně aplikovali na konkrétních lokalitách s využitím programů Erdas Imagine, Idrisi a Geomatica.

K nevýhodám satelitních snímků patří silná závislost na atmosférických vlivech, které mohou snímkování zkreslovat nebo zcela znemožnit (platí zejména o oblačnosti). To může být dosti limitující, např. v případě projektu Podřipsko nastaly vhodné podmínky pro snímkování až na samém konci sezóny července 2008, kdy mnoho lokalit již postrádalo porost, a tudíž i porostové příznaky. Přesné načasování snímkování je poněkud problematické. Naše praktická zkušenost ukázala, že ačkoliv provozovatel systému QuickBird-2 uvádí návrat družice nad stejné místo nad Zemí jednou za 3 dny, pro účely kolmého snímkování je tato doba výrazně

delší (zhruba 2 týdny), což výrazně snižuje počet možných pokusů o snímkování např. ve vegetačním období.

Na některá omezení, s nimiž musíme při aplikaci družicových dat počítat, jsme narazili i v průběhu našeho projektu. Z nich je třeba zmínit ta, která jsou spojena s jejich analýzou pro účely detekce zahloubených objektů. Jedná se především o stále relativně nedostatečné prostorové rozlišení (to se týká zejména multispektrálních dat, jejichž rozlišení je čtyřikrát menší než u dat panchromatických), a také o obtížnost správného načasování pořízení snímku zvolené oblasti, související např. s oblačností v atmosféře. Ukázalo se například, že pro detekci zahloubených objektů, a to jak bodových (jámy o průměru 1 – 2/3 metry, které jsou nejčastějším druhem zahloubeného objektu v našem prostředí), tak liniových (ohrazující příkopy o šířce pod 2 metry), jsou družicové snímky o rozlišení kolem 0,5 m dostatečně kvalitní na to, aby na nich tyto objekty byly vizuálně detekovatelné. Způsoby analýzy multispektrálních dat, které jsme v našem projektu aplikovali, umožnily zvýraznění kontur konkrétních objektů (tak především vegetační indexy), které ale jsou viditelné i na paralelním snímku panchromatickém. V žádném případě se nepodařilo zvolenými postupy identifikovat neznámý objekt, který by na panchrom. snímku nebyl zachycen, resp. nebyl vizuálně detekovatelný. Vzhledem k tomu, že družicové snímky, s nimiž jsme měli možnost pracovat, jsou dosti citlivé z hlediska sledování větších lineárních objektů (zaniklé vodoteče, cesty, fortifikace, mezní systémy polí apod.), jsou cenným pramenem pro studium zaniklých podob krajiny jako celku. V této oblasti je potenciál družicových dat nepominutelný i v našem prostředí.

Do budoucna je možno počítat s obohacením našich znalostí o minulé krajině prostřednictvím studia odtajněných archivních špionážních snímků z období studené války, a rovněž s lepší dostupností snímků komerčních družic, jejichž technické parametry se neustále zlepšují. Přitom dosažení většího prostorové rozlišení není ani tak problémem technickým, jako spíše finančním a politickým. V současné době dosahuje mezi komerčními družicemi nejvyššího prostorového rozlišení družice GeoEye-1, která byla vypuštěna v září 2008. Ta je schopna pořizovat snímky s rozlišením 0,41 m (panchromatické) a 1,65 m (multispektrální). Při prodeji panchromatických dat je bohužel toto rozlišení záměrně zhoršováno na 0,5 m, a to na základě smlouvy společnosti GeoEye s vládou USA. Setkáváme se tedy s podobným problémem, jakým byla v minulosti umělá chyba (Selective availability) vkládaná do roku 2000 do signálu GPS. Přesto můžeme počítat s tím, že se v blízké budoucnosti bude rozlišení družicových dat nadále zlepšovat. Nárůst počtu archivních snímků komerčních systémů pravděpodobně povede k jejich lepší cenové dostupnosti. Pro archeologii by bylo rozhodně zajímavé i zveřejnění novějších špionážních snímků. Větší dostupnost družicových dat nutně povede i k jejich častější integraci do GIS (např. rozšířený program ArcGIS byl od verze 9.2 obohacen o nástroje pro pansharpening) a do internetových prohlížečů typu oblíbeného programu Google Earth.

Porovnávat potenciál *družicových (podobně i leteckých fotogrammetrických) snímků a šikmých fotografií pořizovaných z malé výšky při cíleném letecko-archeologickém průzkumu* je stejně obtížné jako kdybychom se například pokoušeli srovnávat vypovídací schopnost artefaktů a ekofaktů, resp. z tohoto srovnání stanovit míru jejich významu v archeologické syntéze. Jak artefakty, tak ekofakty jsou nezastupitelné a jedinečné a stejnou měrou se podílejí na poznání života našich předků v celé jeho složitosti. Podle dosavadních zkušeností je kontraproduktivní nekriticky upřednostňovat jeden či druhý typ leteckých obrazových dat (resp. způsobů, jimiž byly pořízeny), neboť každý z nich nabízí informace více či méně odlišného druhu. Jako příklad budiž uveden satelitní snímek a z ruky pořízená letecká fotografie lokality na obr. 5 (Straškov 1). Na prvně jmenovaném snímku jsou velmi nejasně vidět jeden bodový a jeden liniový objekt, jejichž poloha je ovšem poměrně přesně určitelná díky tomu, že snímek je ortorektifikován. Opačně je tomu u šikmé fotografie téhož areálu, kde vidíme velmi zřetelně kontury obou jmenovaných (a mnoha dalších včetně linie části velkého pravoúhlého ohrazení) objektů a v dokonalém detailu i konstrukci malého ohrazení (vstup s dobře patrnými křivými jámami nosných sloupů brány, paralelní linie křivých jam uvnitř). Vzhledem ke zkrácení dané

šikmých pohledem neznáme přesný tvar a velikost identifikovaných objektů, což je jejich nevýhoda. Připomeňme, že šikmé snímky můžeme dodatečně rektifikovat a podle použitého postupu, s ohledem na terénní konfiguraci a úhel, pod nímž byl snímek pořízen, velikost a tvar těchto objektů dodatečně – byť i s menší přesností – zjistit. Je pochopitelné, že přístup k těmto datům a případná preference jednoho z nich je do určité míry ovlivněna zaměřením konkrétního badatele a jeho subjektivní volbou, podobně jako je tomu při práci s jinými druhy pramenů/dat.

Jak již bylo naznačeno v předchozím odstavci, je potenciál družicových dat pro aplikace v archeologii a výzkumu zaniklých krajin v poslední době významným způsobem konfrontován s potenciálem fotogrammetrických snímků (ortosnímků), které jsou ve stále větší míře – ve formě tzv. ortofotomap - dostupné k prohlížení na internetu (zejm. Google Earth, www.mapy.cz, <http://amapy.atlas.cz>; podrobně Šmejda 2007) a které je možné od provozovatelů nakoupit a dále s nimi pracovat (např. známé historické kolmé fotografie ČR, které jsou uloženy v Dobrušce a spravovány armádní službou; současné ortosnímky s největším rozlišením cca 25 cm). Protože předmětem předložené práce není detailní komparace družicových a leteckých dat DPZ, omezíme se na jejich stručné srovnání: družicové snímky mají nižší prostorové rozlišení a obrazovou kvalitu ve srovnání s kolmými leteckými snímky a relativně vysokou cenu (u komerčních archivních snímků s velmi vysokým rozlišením cca 400 Kč/km², u snímků pořízených na objednávku je cena o více než polovinu vyšší; oproti tomu cena leteckého fotogrammetrického snímku činí zhruba 50 Kč/km² a za méně než dvojnásobek lze pořídit snímek ortorektifikovaný; ústní sdělení L. Šmejdy). Za současné situace se jasné, že k práci s obrazovými daty DPZ – zejména pro detailní výzkum zemského povrchu, resp. identifikaci sídelních areálů a sídelních zón – jsou jak po stránce kvalitativní, tak ekonomické vhodnější snímky letecké.

Problematika nastíněná v posledních dvou odstavcích by vyžadovala hlubší analýzu, která by tak jako tak ukázala na jednoznačnou přednost kombinovaného uplatnění obou druhů dat dálkového průzkumu – šikmých fotografií a družicových/fotogrammetrických snímků - před apriorním upřednostňováním jednoho či druhého.

Literatura

- Bárta, M. – Brůna, V. 2006: Satellite Atlas of the Pyramids – Satelitní atlas pyramid. Dryada a Český egyptologický ústav, Praha.
- Bárta, M. - Brůna, V. - Křivánek, R. 2003: Research at South Abusir in 2001-2002 - methods and results. Průzkum jižního Abúsíru v letech 2001-2002 – metody a výsledky. Památky archeologické 94, 49-82.
- Beck, A. et al. 2007: Evaluation of Corona and Ikonos high resolution satellite imagery for archaeological prospection in western Syria. Antiquity 81, 161-175.
- Campana, S. – Forte, M. 2006: From Space to Place, BAR Int. Series 1568, Archaeopress, Oxford.
- Cavalli, R.M. – Marino, C.M. – Pignatti, S. 2003: Hyperspectral airborne remote sensing as an aid to a better understanding and characterization of buried elements in different archaeological sites. In: Forte, M. – Williams, P.R.: The Reconstruction of Archaeological Landscapes through Digital Technologies, BAR Int. Series 1151, 29-32.
- De Laet, V. et al. 2007: Methods for the extraction of archaeological features from very high-resolution Ikonos-2 remote sensing imagery, Hisar (southwest Turkey). Journal of Archaeological Science 34, 830-841.
- Deuel, L. 1979: Objevy z ptačí perspektivy. Praha: Mladá fronta.
- Donoghue, D. – Galiatsakos, N. – Philip, G. – Beck, A.R. 2002: Satellite imagery for archaeological applications: a case study from the Orontes Valley, Syria. In: Bewley, R. – Raczkowski (eds): Aerial Archaeology. IOS Press, Amsterdam etc., 211-223.

- Eastman, J. R. 2006: IDRISI Andes – Guide to GIS and Image Processing. Clark University, Worcester.*
- Forte, M. 2002: GIS, aerial photographs and microtopography in Archaeology: Methods and applications. In: Bewley, R. – Raczkowski (eds): Aerial Archaeology. IOS Press, Amsterdam etc., 196-210.*
- Fowler, M. 1996: High-resolution satellite imagery in archaeological application: a Russian satellite photograph of the Stonehenge region. Antiquity 70, 667 - 671.*
- 1999: High resolution satellite imagery from the internet. AARGnews 18, 19 – 21.
 - 2005: An evaluation of scanned CORONA intelligence satellite photography. AARGnews 31, 34 – 37.
 - 2007: Sputnik at fifty: the archaeological legacy of the world's first artificial satellite. AARGnews 35, 7 – 17.
 - 2008: The application of declassified KH-7 GAMBIT satellite photographs to studies of Cold War material culture: a case study from the former Soviet Union. Antiquity 82, 714–731.
- Gojda, M. 1997: Letecká archeologie v Čechách. Praha: Archeologický ústav AV ČR.*
- 2004: Letecká archeologie a dálkový průzkum. In: M. Kuna a kolektiv, Nedestruktivní archeologie. Praha: Academia, 49-115.
 - 2005: LIDAR a jeho možnosti ve výzkumu historické krajiny, Archeologické rozhledy 57, 806-809.
 - 2007: Letecká archeologie a dálkový průzkum v prvním roce projektu Archeologie krajiny Podřipska. In: Opomíjená archeologie 2005 – 2006 (Křišťuf, P. – Šmejda, L. – Vařeka, P. eds.). Plzeň, 19-25.
 - 2008a: Výročí dvou průkopníků letecké fotografie a dálkového průzkumu, Archeologické rozhledy (v tisku).
 - 2008b: Archiv leteckých snímků Archeologického ústavu AV ČR v Praze (1992 – 2007). Archeologické rozhledy 60, 144-146.
 - 2008c: Post-medieval to early modern military landscape of Bohemia. Earthworks and buried monuments in the view of air survey, *Akta Fakulty filozofické Západočeské univerzity v Plzni*, 9-20.
- Gojda, M. (ed.) 2004: Ancient Landscape, Settlement Dynamics and Non-Destructive Archaeology. Praha: Academia.*
- Goossens, R. 2005: 3D analysis of satellite images for archaeology. The example of CORONA, Quickbird, IKONOS and Aster and oblique aerial pictures. In: Bourgeois, J – Megansk (eds.): Air Photography and Archaeology 2003. A Century of Information. Gent, 189-199.*
- Goossens, R. et al. 2006: Satellite imagery and archaeology: the example of CORONA in the Altai mountains. Journal of Archaeological Science 33, 745-755.*
- Halounová, L. – Pavelka, K. 2005: Dálkový průzkum Země. Vydavatelství ČVUT, Praha.*
- Kennedy, D. 1998: Declassified satellite photographs and archaeology in the Middle East: case studies from Turkey, Antiquity 72, 553-561.*
- Kolejka, - Kučera 2001: Bystré oči nad planetou. Současné možnosti fotografování ze satelitů, Computer 8/20, 6-8.*
- Kuna, M. 1999: Využití GPS při zaměřování archeologických nemovitých památek. In: A. Beneš – J. Michálek – P. Zavřel: Soupis archeologických památek v okrese České Budějovice, 193-195.*
- Kuna, M. et al. 2004: Nedestruktivní archeologie – Non-destructive Archeology. Academia, Praha.*
- Lasaponara, R. – Masini, N. 2007: Detection of archaeological crop marks by using satellite QuickBird multispectral imagery. Journal of Archaeological Science 34, 214-221.*
- Lasaponara, R. – Masini, N. eds. 2008: Remote Sensing for Archaeology and Cultural Heritage Management. Aracne, Rome.*
- Lipo, C. P. – Hunt, T. L. 2005: Mapping prehistoric statue roads on Easter Island. Antiquity 79, 158-168.*

- Mac Donald 1995*: CORONA: success for reconnaissance, a look into the cold war, and a revolution for intelligence, *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* 61, 689-720.
- Madry, 1987*: A multiscalar approach to remote sensing in a temperate regional archaeological survey. In: Crumley, C.L. – Marquardt, W.H. (eds.): *Regional Dynamics: Burgundian Landscapes in a Historical Perspective*. San Diego, 173-235.
- Olteanu, I. 2002*: The use of satellite imagery for the transcription of oblique aerial photographs. In: Bewley, R. – Raczkowski (eds): *Aerial Archaeology*. IOS Press, Amsterdam etc.,
- Pavelka, K. 2004*: Dálkový průzkum Země 10: Operační systémy. Vydavatelství ČVUT, Praha.
- Philip, G. et al. 2002*: CORONA satellite photography: an archaeological application from the Middle East. *Antiquity* 76, 109 – 118.
- Sedlák, P. – Hobza, O. 2006*: Digitální zpracování obrazu: Systém Idrisi32 Release Two. Univerzita Palackého v Olomouci – Přírodovědecká fakulta, Olomouc.
- Shell, C. 2002*: Airborne high-resolution digital, visible, infra-red and thermal sensing for archaeology. In: Bewley, R. – Raczkowski (eds): *Aerial Archaeology*. IOS Press, Amsterdam etc., 181-196.
- Šmejda, L. 2007*: Letecká archeologie a internetové zdroje dat: situace v ČR. In: P. Křišťuf – L. Šmejda – P. Vařeka edd., *Opomíjená archeologie*, Plzeň: Katedra archeologie ZČU, 255-260.
- Šmejda, L. 2008*: Možnosti využití kolmých leteckých snímků a družicových dat v archeologii. Nepublikovaný rukopis disertační práce, Západočeská univerzita - Fakulta filozofická - Katedra archeologie.
- Zhang, Y. 2002*: A new automatic approach for effectively fusing Landsat 7 as well as IKONOS images. *Proceedings of the International Geoscience and Remote Sensing Symposium IEEE/IGARSS 02*, Toronto, Canada.

Poznámky

1. Článek je výstupem z výzkumného záměru ministerstva školství MSM-4977751314 *Opomíjená archeologie* (resp. tématu *Letecká archeologie*, řešeného v jeho rámci) a z projektu specifického výzkumu Fakulty filozofické Západočeské univerzity v Plzni.
2. Autoři děkují K. Pavelkovi z ČVUT Praha za laskavé přečtení tohoto příspěvku, za připomínky a upřesnění, týkající se údajů o dálkovém průzkumu Země.