

ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE  
FAKULTA ŽIVOTNÍHO PROSTŘEDÍ

KATEDRA VODNÍHO HOSPODÁŘSTVÍ A  
ENVIRONMENTÁLNÍHO MODELOVÁNÍ



**Využití dat DPZ pro hydrologické modelování**

**BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

**Vedoucí práce: Ing. Martin Hanel, Ph.D.**

**Bakalant: Tomáš Roub**

**2014**

# ČESKÁ ZEMĚDĚLSKÁ UNIVERZITA V PRAZE

Katedra vodního hospodářství a environmentálního  
modelování

Fakulta životního prostředí

## ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Roub Tomáš

Vodní hospodářství

Název práce

**Využití dat DPZ pro hydrologické modelování**

Anglický název

**Using remote sensing data for hydrological modelling**

---

### Cíle práce

Cílem práce je popis produktů DPZ se zaměřením na využitelnost pro hydrologické modelování

### Metodika

Rešerše CZ a zahraničních pramenů na téma:

Dálkový průzkum země a GIS - obecně, typy produktů

Využití produktů DPZ v hydrologickém modelování

Dostupnost dat DPZ pro hydrologické modelování

### Harmonogram zpracování

březen - červen

primární rešerše, návrh struktury práce, shromáždění podkladů

červenec - prosinec

tvorba vlastní práce

leden - březen

finalizace

### **Rozsah textové části**

cca 30 stran textu + přílohy

### **Klíčová slova**

dálkový průzkum země, GIS, hydrologické modelování

---

### **Doporučené zdroje informací**

Chen et al. (2009) GIS and Remote Sensing in Hydrology, Water Resources and Environment. IAHS Redbook 289.

---

### **Vedoucí práce**

Hanel Martin, Ing., Ph.D.

---

Elektronicky schváleno dne 11.4.2014

**prof. Ing. Pavel Pech, CSc.**

Vedoucí katedry

Elektronicky schváleno dne 11.4.2014

**prof. Ing. Petr Sklenička, CSc.**

Děkan fakulty

---

*Prohlášení*

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma Využití dat DPZ pro hydrologické modelování vypracoval samostatně, pod vedením Ing. Martina Hanela, Ph.D., a že jsem uvedl veškeré literární prameny a publikace, ze kterých jsem čerpal.

V Praze dne 16.4.2014

.....

*Poděkování*

Touto cestou bych chtěl poděkovat vedoucímu práce, panu Ing. Martinovi Hanelovi, Ph.D., za cenné rady a trpělivost při psaní této bakalářské práce. Dále chci poděkovat Mgr. Janě Gabašové za korekturu textu. Samozřejmě chci také poděkovat své rodině za podporu a trpělivost během studií a při realizaci této práce.

V Praze dne 16.4.2014

.....

## **Abstrakt**

Cílem této práce je zpracování literární rešerše, jejíž obsah je věnován základnímu popisu získávání datových produktů z dálkového průzkumu Země (DPZ) pro hydrologické modelování. Část práce popisuje základní principy získávání dat. Dále jsou popsány nejdůležitější produkty DPZ, které jsou nejčastěji aplikovány v hydrologických modelech. Dále práce poskytuje přehled o dostupnosti dat DPZ pro hydrologické modelování.

**Klíčová slova:** dálkový průzkum země, GIS, hydrologické modelování

## **Abstract**

The aim of this thesis is the literature review, the content of which is devoted to the basic description of data acquisition products from remote sensing for hydrological modeling. The first part of thesis gives an overview of the basic principles of data acquisition. The following sections describes the most important remote sensing products that are commonly applied in hydrological models. The work also provides information on the availability of remote sensing data for hydrological modeling.

**Keywords:** remote sensing, GIS, hydrological modeling

1. Úvod.....	9
1.1 Cíl práce.....	9
2. Dálkový průzkum Země.....	10
2.1 Obrazová data .....	10
2.2 Konvenční metody .....	11
2.3 Nekonvenční metody .....	11
2.4 Základní oblasti spektra využívané v DPZ .....	12
3. Využití DPZ v hydrologii.....	13
3.1 Vegetace .....	14
3.1.1 Hlavní rysy spektrálního chování vegetace .....	14
3.1.2 Index listové plochy .....	15
3.1.3 Vegetační index .....	15
3.1.4 Zdroje dat - Satelitní systémy .....	16
3.2 Sněhová pokrývka.....	19
3.2.1 Měření sněhové pokrývky – Gama záření .....	19
3.2.2 Měření sněhové pokrývky - Viditelné záření .....	20
3.2.3 Měření sněhové pokrývky - Mikrovlnné záření.....	20
3.2.4 Mapování sněhu.....	20
3.2.5 Množství vody obsažené ve sněhové pokrývce.....	21
3.2.6 Hloubka sněhové pokrývky .....	22
3.3 Půda.....	22
3.3.1 Optická část elektromagnetického spektra.....	23
3.3.2 Termální část elektromagnetického spektra.....	23
3.3.3 Metoda tepelné setrvačnosti (Thermal inertia method).....	24
3.3.4 Metoda teplotního/vegetačního indexu .....	25
3.3.5 Mikrovlnná část elektromagnetického spektra .....	27
3.4 Topografie .....	29
3.4.1 DEM - Digitální výškový model .....	29
3.4.2 Data pro DEM.....	29
3.4.3 Zdroje dat.....	31
3.5 Data z meteorologických radiolokátorů .....	37
3.5.1 Funkce radaru.....	37
3.5.2 Radiolokační odhady srážek .....	38

3.5.3	Chyby v určování srážek .....	38
3.5.4	Využívání radarových dat .....	39
4.	Dostupnost dat DPZ pro hydrologické modelování .....	40
4.1	NASA (National Aeronautics and Space Administration) .....	41
4.2	ESA (European Space Agency).....	41
4.3	LP DAAC (Land Processes Distributed Active Archive Center) .....	42
4.4	GLCF (The Global Land Cover Facility).....	43
4.5	FLOREO.....	44
4.6	GEODIS.....	45
4.7	Zpětná dostupnost dat .....	48
5.	Diskuze .....	49
6.	Závěr .....	50
	Seznam zkratek.....	51
	Seznam obrázků.....	54
	Seznam tabulek.....	55
	Literatura .....	56



## **1. Úvod**

„Dálkový průzkum je způsob získávání informací o zemském povrchu i v vodních plochách s využitím snímků pořízených z ptačí perspektivy, využívá elektromagnetického záření v jednom nebo více intervalech spektra, toto záření je odráženo nebo emitováno ze zemského povrchu“ (Campbell, 1987).

V několika posledních desetiletích je dálkový průzkum Země a geografický informační systém stále více aplikován v hydrologickém modelování. Mnoho studií prokázalo, že dálkově snímaná data přinášejí výrazný užitek pro hydrologii a vodní zdroje. Dálkový průzkum Země poskytuje prostředky pro sledování hydrologických stavových proměnných na velkých plochách.

V hydrologickém modelování se tradičně používají data z pozemních měřicích stanic. S vývojem a většími nároky na modelování jsou často potřebná prostorová data. Ty se získávají interpolací bodových dat, ovšem při této operaci vznikají chyby. Řešení nabízí dálkový průzkum Země, který umožňuje zpřesnění odhadů prostorového rozložení veličin, které ovlivňují hydrologický cyklus a poskytují informace, které jsou často uváděny nepřesně, ať už se jedná například o charakteristiky vegetace nebo sněhové pokrývky.

Jednou z hlavních výhod radarových a družicových technologií je skenování velkých ploch a tím získání velkého množství informací o jednom konkrétním místě na Zemi.

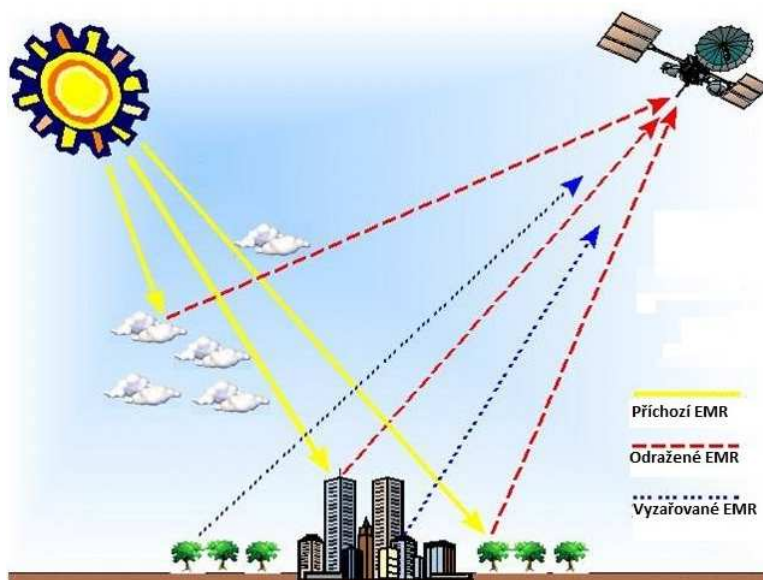
### **1.1 Cíl práce**

Cílem bakalářské práce je popsání jednotlivých metod dálkového průzkumu Země, kterými získáváme data pro hydrologické modelování. Popis je zaměřen na veličiny, které jsou v hydrologickém modelování nejčastěji používány a nejvíce ovlivňují hydrologický cyklus. Jedná se o veličiny: vegetace, sněhu, půdy, topografie a srážek. Dále je cílem poskytnout přehled o dostupnosti získaných dat.

## 2. Dálkový průzkum Země

Dálkový průzkum Země (dále jen DPZ) je věda a schopnost získávat užitečné informace o objektech, plochách a jevech prostřednictvím dat získaných pomocí zařízení, která se zkoumanými objekty, plochami a jevy nejsou v přímém kontaktu. K tomu je využíváno elektromagnetické záření (obr. 2.1). Zařízení, která zaznamenávají toto záření, jsou umístěna na různých nosičích, nejčastějšími nosiči jsou letadla a družice. DPZ patří do kategorie takzvaných moderních geoinformačních technologií, které se skládají ze dvou subsystémů. Prvním subsystémem je sběr a přenos dat, druhým je analýza a vyhodnocení naměřených dat (Reedy, 2008).

Obrázek 2.1 Princip využití elektromagnetického záření.



Zdroj: [www.jugraphia.wordpress.com](http://www.jugraphia.wordpress.com) (upraveno)

### 2.1 Obrazová data

Obrazové materiály obsahují dva typy informací. Prvním typem jsou informace o tvaru, poloze, velikosti objektů. Druhý typ představují informace tematické, například druh vegetace na dané ploše.

Data pořízená metodou DPZ můžeme rozdělit do dvou základních skupin, na skupinu obrazovou (konvekční), může se jednat například o snímek určité oblasti, a na skupinu neobrazovou (nekonvenční), kterou může tvořit graf vytvořený z měření (Dobrovolný, 1998).

## 2.2 Konvenční metody

Jedná se o klasické metody, při kterých vznikají fotografické materiály. Fotografie daného území vzniká centrální projekcí pomocí objektivu na citlivých fotografických vrstvách. Obraz území vniká najednou během doby expozice. Značnou výhodou fotografií je možnost zachytit značné detaily, které nemusí být vidět lidským okem (Dobrovolný, 1998).

Kvalita pořízených snímků nezávisí pouze na parametrech fotografických komor, ale i na tom, zda byly použity barevné, nebo černobílé filmy. Barevné fotografie jsou nejčastěji pořizovány na film se třemi vrstvami, ty jsou citlivé na různé barvy. Nejčastěji se jedná o vrstvy citlivé na modrou, zelenou a červenou barvu. Kombinací těchto barev pak dochází k vyvolání přirozené barevnosti. Jestliže jsou vrstvy citlivé na jinou kombinaci barev, pak dochází k vytvoření obrazu v barvách nepřirozených. K pořízení černobílých fotografií se používají filmy s jednou vrstvou (Svatoňová, Lauer mann, 2010).

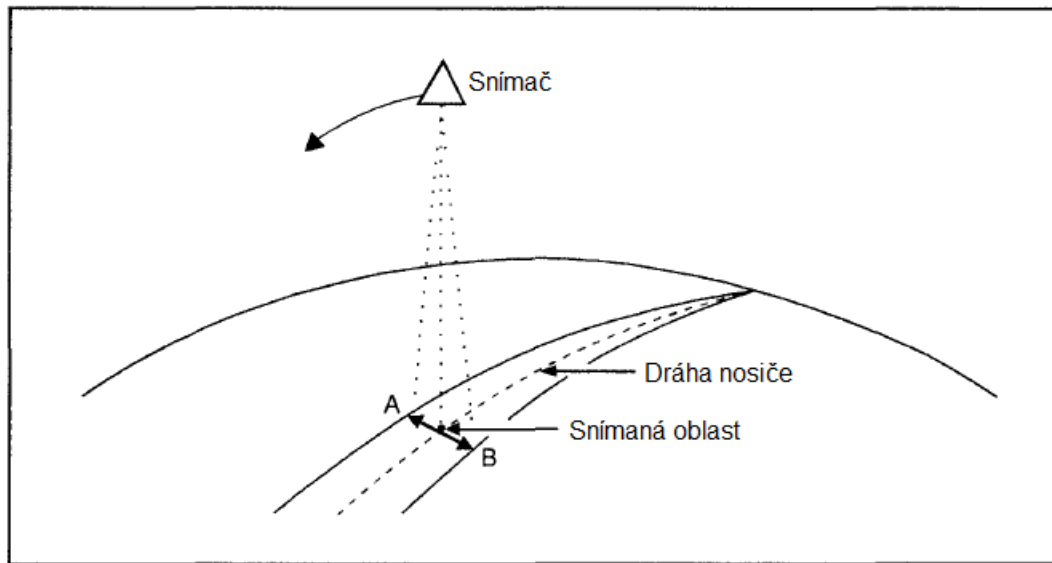
Velký pokrok je zaznamenán v digitální fotogrammetrii. Digitální fotoaparáty vybaveny kvalitní optikou pracují na stejném principu jako optoelektronický skener, ale obraz nevzniká postupně, jako je tomu v případě skeneru, ale v jednom okamžiku (Dobrovolný, 1998).

K pořizování fotografických snímků pro účely DPZ se v současnosti nejčastěji používají letadla a družice (Svatoňová, Lauer mann, 2010).

## 2.3 Nekonvenční metody

U nekonvenčních metod vznikají snímky postupně, takzvaným řádkováním za pomoci skenerů a radiometrů. Pořízená data jsou v číslicové, digitální podobě, kdy průsečíkem jednoho řádku a sloupce je definován obrazový prvek, pixel (Halounová, Pavelka, 2005). Měření probíhá většinou na velkém počtu míst, kdy letadlo nebo družice slouží jako nosič pro záznamové zařízení. Zařízení snímá řady, které tvoří digitální nebo číselný záznam o měření podél trati (obr. 2.2). Sada po sobě jdoucích řad pak tvoří obrazová data (Reedy, 2008).

Obrázek 2.2 Snímání zemského povrchu.



Zdroj: Reedy (2008) (upraveno)

## 2.4 Základní oblasti spektra využívané v DPZ

### Viditelné záření (0,4-0,7 $\mu\text{m}$ )

V oblasti viditelného záření pracují všechny konvenční metody a většina družicových systémů. Zdrojem tohoto záření je Slunce. Z historického hlediska je nejvyužívanější částí spektra. Neproniká oblačností a mlhou a nelze jej používat v nočních hodinách (Dobrovolný, 1998).

### Infračervené záření (0,7-3 $\mu\text{m}$ )

V porovnání s viditelným zářením je infračervené záření méně pohlcováno a rozptylováno atmosférou, tím jsou získávány kvalitnější snímky. Infračervené záření má dvě oblasti záření, blízké a střední. Snímky pořízené blízkým infračerveným zářením se hodí k topografickým účelům, ke sledování vodních zdrojů a pro analýzu vegetačního pokryvu. Oblast středního infračerveného záření zahrnuje dvě atmosférická okna, obě se hodí ke studiu vegetace. První okno poskytuje dobré rozlišení druhů vegetace a je také dobré v rozpoznávání sněhu a ledu. Druhé okno je využíváno k zjišťování teplotních vlastností povrchu Země (Dobrovolný, 1998).

### **Tepelné záření (3 $\mu\text{m}$ –1 mm)**

Používá se ke zjišťování povrchové teploty Země, oceánů, vodních zdrojů. Obsahuje dvě atmosférická okna v intervalu 3-5  $\mu\text{m}$  a 8-12  $\mu\text{m}$ . První okno v intervalu 3-5  $\mu\text{m}$  lze využívat pouze v noci. Druhé okno lze využívat i ve dne (Dobrovolný, 1998).

### **Mikrovlnné záření (1 mm–1m)**

Toto záření může za určitých podmínek pronikat i pod zemský povrch. Ze všech záření je nejméně limitováno meteorologickými podmínkami. Je využíváno pasivními a aktivními metodami snímání. Pasivní metody poskytují malé prostorové rozlišení dat, důvodem je nízká intenzita vyzařovaného mikrovlnného záření. Používanější jsou systémy aktivní - radarové, ty poskytují data využitelná především pro studium reliéfu, sněhu, vegetace (Dobrovolný, 1998).

Aktivní metody využívají uměle vytvořené elektromagnetické záření, které je vysíláno z nosiče, který posléze toto záření snímá a zkoumá. Pod tímto pojmem si lze nejnázne představit radarové systémy.

Pasivní metody se ještě dělí na přímé a nepřímé. Přímé metody využívají jako zdroj informací záření Slunce, které se odráží od zemského povrchu. Klasickým příkladem je letecká fotografie. Nepřímé metody pracují se zářením vyzařovaným povrchem nebo atmosférou a jako příklad lze označit termovizi, která sleduje teplotní vlastnosti objektů.

### **Gama záření**

Je to nejenergetičtější část elektromagnetického spektra s nejvyšší frekvencí. Dálkový radiometrický průzkum je zaměřen na stanovení úhrnné intenzity gama záření a na určení absolutního či relativního množství uranu, thoria a draslíku v horninách a půdách.

### **3. Využití DPZ v hydrologii**

Data získaná z materiálů DPZ udávají v hydrologii široké a obsahově různorodé informace o vodních poměrech a jejich působení na krajinu. Jedná se zejména o údaje týkající se výšky sněhové pokrývky a její rychlosti tání, změny,

kteře probíhají u ledovců vlivem globálního oteplování a jejich důsledky na vodní režim toků.

Ze snímků lze identifikovat velikost a tvar povodí, typy říčních sítí, erozní rýhy na svazích, změny meandrujících toků. Dále lze vidět také místa postižená vodní nebo větrnou erozí. Pro sledování záplav jsou nezbytné snímky, které jsou pořizovány opakovaně a v předem zvolených časových intervalech. (Svatoňová, Lauermaun, 2010).

Do jednotlivých hydrologických modelů lze prakticky aplikovat celou řadu produktů DPZ. Vždy záleží na konkrétním modelu, jaké jsou nároky na vstupní data, co chceme modelovat, jaké procesy potřebujeme v modelu reprezentovat a jaký výstup požadujeme. Tato část práce popisuje nejdůležitější data pořízená metodou DPZ využívaná pro hydrologické modelování. Jedná se zejména o data týkající se: stavu a vlivu vegetace, sněhové pokrývky, stavu a vlhkosti půdy, detekce srážek, topografie území.

### **3.1 Vegetace**

Vegetace je významným a dynamickým prvkem v hydrologickém cyklu. Vegetace ovlivňuje hydrologické procesy, jako je zadržetí, evapotranspirace, obsah půdní vody a objemu odtoku. Pro studium změn klimatu, k hospodaření s vodními zdroji a k predikci povodní je potřeba kvantitativních dat o stavu vegetace. Vzhledem k prostorovým změnám heterogenity a sezónním změnám vegetace jsou zapotřebí údaje prostorové a časové (Zhangshi et al., 1997). Krajinný pokryv je nedílnou součástí zemského ekosystému a jako takový tvoří důležitý parametr v hydrologickém modelování (Kite, Pietroniro, 1996).

Pro prostorový hydrologický model jsou vhodné dvojrozměrné vegetační údaje získané ze satelitních snímků. Satelitní údaje jsou používány pro detekci vegetace, mapování, monitorování růstu plodin, odhad výnosu zemědělských ekosystémů, studií a evapotranspirace (Zhangshi et al., 1997).

#### **3.1.1 Hlavní rysy spektrálního chování vegetace**

Takzvané spektrální chování vegetace se vyznačuje především výrazným nárůstem odrazivosti v blízké infračervené části spektra. Na snímcích ve viditelné části spektra odráží povrchy pokryté vegetací v průměru kolem 20 % dopadajícího záření, v blízké infračervené části spektra je to v průměru kolem 60 %.

Záření ve viditelné části spektra je výrazně pohlcováno především zeleným barvivem – chlorofylem. V důsledku toho mají povrchy pokryté vegetací tmavou barvu na černobílých snímcích. Protože pohlcování záření chlorofylem je nejintenzivnější v červené a modré části viditelného záření a méně intenzivní v zelené části kolem 550 nm, jeví se nám vegetace jako zelená. V oblasti kolem 700–800 nm dochází k výraznému nárůstu odrazivosti a v blízké infračervené části spektra (700–1 300 nm) je tato odrazivost dána především uspořádáním buněk těch částí rostlin, které jsou nejvíce vystaveny dopadajícímu slunečnímu záření, tedy odrazivostí listů. Protože buněčná struktura různých druhů rostlin je odlišná, také jejich odrazivost se liší, toho lze využít pro rozpoznávání různých druhů rostlin. Na infračervených snímcích lze například poměrně snadno odlišit porosty listnatých a jehličnatých lesů. Porosty listnatého lesu jsou na snímcích podstatně světlejší (Dobrovolný, 2001).

V intervalu spektra 1 300–3 000 nm je odrazivost vegetace dána především přítomností vody v rostlinách. Odrazivost rostlin se snižuje s vyšším obsahem vody v rostlinách (Dobrovolný, 2001).

Zemský povrch pokrytý vegetací lze identifikovat i na snímcích v mikrovlnné části spektra na radarových snímcích. Odraz mikrovlnného záření od vegetace je však poměrně komplikovaný, protože k němu nedochází pouze na povrchu listů, ale většinou se jedná o několikanásobný odraz v celé vrstvě vegetačního krytu. Na radarových snímcích způsobuje vegetace ve většině případů takzvaný difúzní odraz mikrovlnného záření (Dobrovolný, 2001).

### **3.1.2 Index listové plochy**

Ze satelitních snímků lze získat takzvaný Index listové plochy, dále jako LAI (Leaf Area Index). Znalost LAI a jeho prostorové rozložení je důležité pro odhad fotosyntézy, transpirace, respirace, zachycení a přenosu energie na zem. Význam pro hydrologické modelování je, že LAI charakterizuje krajinný pokryv, který slouží jako základ pro hydrologické modely (Zhangshi et al., 1997).

### **3.1.3 Vegetační index**

Vegetační indexy vyjadřují vztah mezi odrazivostí v intervalu červené viditelné části spektra a v blízké infračervené části spektra. Indexy se využívají k mapování vegetace a k určování množství biomasy. Při vyhodnocování NDVI se

světější plochy na snímku vyznačují vyšší hodnotou indexu a charakterizují tak místa s nejbohatší vegetací.

Využití družicových snímků pro vegetační studie je založeno na různé odrazivosti intervalu červené viditelné části spektra (600–700 nm - RED) a v blízké infračervené části spektra (přibližně 700–900 nm - NIR). Existuje velký počet algoritmů pro výpočet vegetačních indexů, ve většině případů jsou však funkčně ekvivalentní. Indexy se dělí na 2 skupiny: poměrové a ortogonální indexy. Poměrové indexy dávají do vztahu jednoduchým nebo normalizovaným poměrem odrazivost povrchů v červené viditelné a blízké infračervené části spektra. Mezi nejpoužívanější poměrové indexy patří NDVI (Normalized Difference Vegetation Index):

$$NDVI = \frac{NIR - RED}{NIR + RED}, \quad (3.1)$$

kde NIR = blízká infračervená část spektra, RED = červená viditelná část spektra.

Ortogonální indexy jsou lineární kombinací původních pásem multispektrálního obrazu. Zástupcem této skupiny indexů je index PVI (Perpendicular Vegetation Index), pomocí kterého lze do značné míry odlišit odrazivost vegetace a půdního substrátu (Dobrovolný, 2001).

### 3.1.4 Zdroje dat - Satelitní systémy

V oblasti mapování vegetace jsou nejpoužívanější satelitní systémy: Landsat, SPOT, MODIS, NOAA-AVHRR, Ikonos a QuickBird (Yichun et al., 2008).

#### **Landsat**

Satelitní snímání Landsat je nejdelším fungujícím programem pro monitorování Země z vesmíru. Historicky první satelit byl vypuštěn v roce 1972 a jeho hlavním úkolem bylo monitorování a analyzování živé složky zemského povrchu. Na oběžnou dráhu bylo zatím vysláno 8 satelitů s označením Landsat 1-8. Zatím poslední satelit Landsat 8 byl vypuštěn na oběžnou dráhu 11. února 2013 (USGS, 2012).

První tři satelity byly vybaveny MSS (multispektrálním skenerem) s prostorovým rozlišením okolo 80 m, ve čtyřech spektrálních pásmech od zelené k blízké červené vlnové délce. Při vývoji satelitu Landsat 4 (později i u Landsat 5)



došlo k rozšíření o krátkovlnné infračervené spektrum (SWIR) a termální infračervené spektrum (thermal-IR). Rozlišení pro viditelné, blízce infračervené a SWIR spektrum je 30 m, pro thermal-IR je to 120 m. Spojení těchto senzorů je označováno jako TM (Thematic Mapper) (USGS, 2012).

Landsat 7 označený jako ETM+ (Enhanced Thematic Mapper Plus) má ve viditelném, blízce infračerveném a krátkovlnném infračerveném pásmu rozlišení 30 m, v termálním pásmu má rozlišení 60 m a 15 m v panchromatickém módu (USGS, 2012).

Landsat 8 označený jako LDCM (The Landsat Data Continuity Mission) nese dva pushbroom senzory. První senzor má název OLI (Operational Land imager) a snímá data v devíti krátkovlnných pásmech. Celkem osm spektrálních pásem s rozlišením 30 m a jedno panchromatické pásmo s rozlišením 15 m. Druhý senzor je specializovaný na termální pásmo –TIRIS (Thermal Infrared Sensor) (USGS, 2012).

Nevýhodu satelitů Landsat představují dlouhé intervaly mezi jednotlivými pozorováními stejného bodu, družice Landsat mají interval pozorování 16 dní (Zhangshi et al., 1997).

## **SPOT**

SPOT systém je zpravován francouzskou kosmickou agenturou CNES. Do dnešní doby bylo vypuštěno šest SPOT satelitů. První, SPOT 1, byl vypuštěn v roce 1986, další pak v následujících letech 1990, 1993, 1998, 2002 a 2012. Satelity SPOT 1, 2, 3 byly vybaveny senzory HRV (High Resolution Visible). Satelit SPOT 4 byl vybaven přístrojem HRVIR (High Resolution Visible and Infrared) a SPOT 5 byl vybaven HRG (High Resolution Geometry), který může skenovat v multispektrálním nebo panchromatickém režimu. Dále jsou SPOT 4 a 5 vybaveny přístrojem SPOT vegetation (VGT), který sbírá data v prostorovém rozlišení 1 km a s časovým odstupem 1 dne (Yichun et al., 2008). SPOT 6 je optický satelit schopný zobrazovat Zemi v panchromatickém rozlišení 1,5 m a v multispektrálním 6 m (SIC, 2014). SPOT snímky, zejména SPOT VGT, jsou velmi užitečné pro sledování a analýzu vývoje zemského povrchu a pochopení změn půdy na velkých plochách (Yichun et al., 2008).

## **MODIS**

MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) je nástrojem na palubě družic Terra a Aqua. Terra MODIS a Aqua MODIS jsou schopny zobrazit celý zemský povrch každé 1-2 dny. Shromážděné snímky z MODIS, včetně 36 spektrálních pásem s prostorovým rozlišením 250 m až 1 km, jsou převážně použity pro mapování vegetační dynamiky a procesů ve velkém měřítku. Vzhledem k hrubému rozlišení se snímky nedoporučují k vegetačnímu mapování na místní nebo regionální úrovni. Nicméně, snímky mohou v kombinaci s jinými snímky vést k lepšímu zmapování (Yichun et al., 2008).

## **NOAA-AVHRR**

Dalším systémem pro sběr dat o vegetaci je AVHRR/NOAA (The Advanced Very High Resolution Radiometer/National Oceanic and Atmospheric Administration). AVHRR obrazy jsou široce používány pro studium časové změny vegetace v různých oblastech, jako jsou globální změny vegetace, studium životního prostředí a monitorování růstu plodin. Výhodou systému AVHRR jsou nízké pořizovací náklady na odběr snímků (Zhangshi et al., 1997). Obrazová data AVHRR zaznamenávají zemský povrch každý den ve dvou prostorových rozlišeních: 1,1 km pro místní pokrytí (LAC) a 5 km pro globální pokrytí plochy (GAC). Vzhledem k velikosti archivu a dlouhé historii tohoto programu jsou snímky užitečné pro studium dlouhodobých změn (Yichun et al., 2008).

## **IKONOS**

IKONOS je komerční satelit vypuštěný v roce 1999. Nese dva snímací senzory, panchromatický senzor pořizující snímky v rozlišení 1 m, a multispektrální senzor se čtyřmi kanály (modrý, zelený, červený a infračervený) s prostorovým rozlišením 4 m. Oba snímače mají šířku záběru 11 km a interval snímání 3-5 dnů. IKONOS jsou používány k mapování a vyhodnocování vegetačního pokryvu (Yichun et al., 2008).

## **QuickBird**

Jako IKONOS i QuickBird nabízí velmi přesné snímky s ještě vyšším rozlišením. Panchromatický senzor pořizuje snímky s rozlišením 60-70 cm a multispektrální snímky mají rozlišení 2,4 a 2,8 m. QuickBird snímky jsou obvykle

používány ke studiu ve speciálních, relativně malých oblastech vzhledem k vysokému rozlišení a pořizovací ceně snímků (Yichun et al., 2008).

### **3.2 Sněhová pokrývka**

Sníh je klíčovým prvkem energetické bilance Země, klimatu, životního prostředí a hlavním zdrojem sladké vody v mnoha oblastech. Sníh je velmi důležitou součástí hydrologického cyklu. Z tohoto důvodu je prostorové a časové sledování variability sněhu ve vysokém rozlišení důležité, protože poskytuje cenné informace pro hydrologické a klimatické aplikace (Murioz, Jonathan et al., 2013).

Sníh je forma srážek, se kterou se v hydrologii zachází odlišnými způsoby, než je tomu u ostatních srážek, protože prodleva mezi okamžikem dopadu sněhové srážky a jejího dalšího podílu v hydrologickém procesu odtoku vody, doplnění zásob podzemní vody atd. může trvat i měsíce. Pro hydrologické modelování je důležité znát, jaké množství sněhu respektive vody je naakumulováno v daném území. Množství obsažené vody ve sněhu a rozložení sněhové pokrývky se velice obtížně měří, a to zejména v hornatých oblastech (WMO, 2014).

Dálkový průzkum Země nabízí nový a cenný nástroj pro získávání údajů o sněhové pokrývce pro predikci odtoku z tajícího sněhu, protože je nejlépe identifikovatelným vodním zdrojem z leteckého snímkování nebo satelitních snímků. Současné snímkování zatím pouze poskytuje oblast sněhového pokryvu, fyzické parametry vody těmito systémy zatím nelze přesně měřit. Nicméně se tyto parametry dají ze snímků odhadovat (WMO, 2014).

Užitečné informace o sněhové pokrývce a jejím stavu mohou poskytnout všechny oblasti elektromagnetického spektra.

#### **3.2.1 Měření sněhové pokrývky – Gama záření**

Obsah vody ve sněhové pokrývce lze měřit pomocí nízko letících letadel nesoucích citlivé gama detektory. Tato metoda využívá přirozené emise nízkoúrovňového gama záření z půdy. Přirozeně se vyskytující radioizotopy draslíku, uranu a thalia lze nalézt v každém typu půdy. Letadlo provádí měření území v období bez sněhové pokrývky a během sněhové pokrývky. V důsledku utlumení vyplývajícího ze sněhové vrstvy lze empirickými vztahy určit průměrné vodní hodnoty ve sněhové pokrývce. Nicméně maximální zjiřitelná výška vody ve sněhové pokrývce je omezena na 30-40 mm. Z bezpečnostních hledisek se tento

přístup využívá v rovinných oblastech, protože atmosféra tlumí značnou část záření, proto je tento přístup omezen nízkými přelety do cca 150 m. Dalším omezením je vliv biomasy, která zeslabuje signál (WMO, 2014).

### **3.2.2 Měření sněhové pokrývky - Viditelné záření**

Albedo sněhu je nejjednodušší měřitelnou vlastností pomocí DPZ. Nově napadaný sníh má albedo kolem 90 %, zatímco starší sníh má albedo kolem 40 %. Míra odrazivosti závisí na velikosti vloček, tvaru, obsahu vody, drsnosti a na přítomnosti nečistot. Odrazivost v infračervené oblasti spektra klesá rychleji než u viditelné části (WMO, 2014).

Celkově jsou snímky pořízeny ve viditelné části spektra v detekci a rozsahu sněhové pokrývky lepší než v kvantifikaci sněhových charakteristik, jako je hloubka nebo obsah vody. Negativum v použití této metody je zamezení snímkování v noci nebo při velké oblačnosti (Murioz, Jonathan et al., 2013).

Nejčastěji jsou snímky pořizovány satelity a družicemi NOAA/VHRR, Landsat MSS 4 nebo 5, SPOT, Landsat TM 2 nebo 4 a MODIS.

### **3.2.3 Měření sněhové pokrývky - Mikrovlnné záření**

Mikrovlnné záření poskytuje nejlepší informace o sněhové pokrývce pro hydrologické modelování. Informace se týkají plochy, hloubky sněhu a přítomnosti kapalné vody ve sněhové pokrývce. Tyto informace jsou získávány pasivním mikrovlnným zářením (WMO, 2014).

Měření provedená aktivním zářením téměř neexistují. Ač některé studie ukazují, že aktivní záření má potenciál podobný jako pasivní, ale vyhodnocování získaných dat je náročnější (WMO, 2014).

### **3.2.4 Mapování sněhu**

Jak je již zmíněno výše, zjištěná plocha sněhové pokrývky má malou hodnotu pro predikci odtoku z tajícího sněhu, protože neposkytuje žádné informace o hloubce nebo obsahu vody. Ovšem ve vztahu s některými empirickými vztahy lze odvodit rychlost tání sněhu (WMO, 2014).

Od roku 1960 je mapována sněhová pokrývka. První satelit určený k mapování sněhové pokrývky nesl kamerový systém AVC (Advanced Vidicon) s prostorovým rozlišením 3,7 km. Perioda snímkování byla týdenní. Od roku 1966

začala s týdenním snímkováním severní polokoule také instituce NOAA pomocí různých senzorů a skenovacích radiometrů SR (Scanning Radiometer), VHRR (Very High Resolution Radiometer) a AVHRR (Advanced Very High Resolution Radiometer). V současnosti NOAA poskytuje snímky každý den. Problémem s těmito snímky může být v rozlišení snímků 1km, které mohou být nedostatečné pro sněhové mapování na malých povodích (WMO, 2014).

Existují dvě významné databáze pro šetření prostorové a časové variability sněhové pokrývky na Zemi, NOAA a SMMR (Scanning Multispectral Microwave Radiometer), SSM/I (Special Sensor Microwave/Imager). Prostorový a časový charakter těchto dvou skupin je poměrně hrubý (jedno týdenní sada dat NOAA pokryje 190,5 km polární stereografické sítě, u mikrovlnných dat je pořízení každodenní s rozlišením 25 km), ale je dostačující pro sledování klíčových vlastností, jako je rozloha, akumulace, tání sněhu a další parametry (WMO, 2014).

Dalším zdrojem je MODIS. Produkty jsou poskytovány v různých prostorových a časových rozlišeních. Data z MODIS poskytují snímky s rozlišením až 250 m.

Při mapování a vyhodnocování se vyskytují rušivé faktory v podobě oblačnosti, lesních porostů, stínů a skalnatých oblastí.

### **3.2.5 Množství vody obsažené ve sněhové pokrývce**

Snow water equivalent (SWE) je způsob měření množství vody obsažené ve sněhu. Jedná se o teoretickou výšku vodního sloupce v případě okamžitého tání sněhu. SWE je udáváno v jednotkách  $\text{kg/m}^2$  nebo m.

K získání parametru SWE se historicky nejvíce používají data z pasivního mikrovlnného měření o frekvenci 19 a 37 GHz. Avšak výsledky dosažené touto metodou jsou velmi často přeceňovány, přesnost produktů se pohybuje kolem 68,5 %.

Pro zvýšení přesnosti produktů SWE jsou používány dva přístupy. První přístup, který spojuje viditelná a mikrovlnná data s pozemním pozorováním. Druhý přístup sjednocuje naměřená data, která jsou pořízená aktivním a pasivním mikrovlnným zářením (Murioz, Jonathan et al., 2013).

### **3.2.6 Hloubka sněhové pokrývky**

Nejjednodušším způsobem jak měřit hloubku sněhu pomocí DPZ je stále snímání pomocí lehkých letadel. Tyto průzkumy poskytují přesné bodové měření hloubky sněhu a mnoho takových měření je možné získat v krátkém časovém období. Výška sněhu ze snímků se odečítá z určených vzorových bodů. Tato metoda se používá jak pro letecké, tak pro pozemní měření výšky sněhové pokrývky (WMO, 2014).

Ze snímků pořízených satelity lze odhadnout hloubku v oblastech s relativně malou akumulací sněhu do hloubky až 25 cm. McGinnis et al. (1975) zjistili přímý vztah mezi zvyšujícím se jasnem a zvyšující se hloubkou sněhu v oblastech bez vysoké vegetace. Snímání musí být prováděno brzy po sněhových přeháňkách, protože s časem se mění přírodní změny odrazivosti, to má následně vliv na tento empirický vztah (WMO, 2014).

Mikrovlnné pasivní snímání je také omezeno na rovinné plochy, protože nedostatečné rozlišení senzorů brání v aplikaci ve strmém terénu.

### **3.3 Půda**

Vlhkost půdy je dalším důležitým faktorem v pozemní povrchové hydrologii, který určuje, jaké množství vody se infiltuje do půdy a následně doplňuje zásobu podzemní vody oproti množství vody, které přispívá k povrchovému odtoku a průtoku toku (Lakshmi, 2012). Vlhkost v horních vrstvách půdního profilu je důležitou součástí celkové vodní bilance a je důležitou stavovou proměnnou v každém hydrologickém modelu. Jedná se o vrstvu půdy, která může vzájemně reagovat s atmosférou prostřednictvím evapotranspirace. Hloubka této vrstvy je závislá na typu a stupni zralosti porostu, ale obvykle se pohybuje v rozmezí 1-2 m (v ČR do hloubky 1m). Odhad uložené vody v této hloubce půdního profilu je nezbytný pro většinu vodohospodářských projektů, pro vodní hospodářství a hydrologické modelování. V mnoha případech je půdní vlhkost monitorována a modelována odvozením ze snadněji získaných hydrologických proměnných, jako jsou dešťové srážky, odtok a teploty (Kite, Pietroniro, 1996).

Modely půdní vlhkosti se vyvíjely v průběhu posledních tří desetiletí. Jsou obvykle rozděleny do čtyř hlavních skupin, které jsou uspořádány podle konkrétní šířky pásma použitého elektromagnetického spektra. Jedná se o skupiny viditelného

(optického) a infračerveného spektra, termálního spektra, mikrovlnné části aktivního a pasivního spektra (Kite, Pietroniro, 1996).

### **3.3.1 Optická část elektromagnetického spektra**

Dálkový průzkum vlhkosti půdy, pomocí slunečního spektra s vlnovou délkou mezi 0,4 a 2,5  $\mu\text{m}$  je založen na odrazu slunečního záření od zemského povrchu. Ve srovnání s mikrovlnnou a termální částí spektra je využívána optická část spektra minimálně.

Bylo navrženo několik empirických postupů, které popisují propojení mezi odrazivostí povrchu půdy a obsahem vlhkosti. Tyto empirické přístupy, ale poskytují špatné údaje o obsahu vlhkosti půdy, protože spektrální charakteristika půdy závisí také na řadě dalších faktorů, jako je minerální složení, půdní organická hmota, textura a drsnost povrchu, což způsobuje velké rozdíly.

Bylo vyvinuto mnoho fyzikálních modelů a indexů k odhadu půdní vlhkosti. Mezi indexy patří NMDI (Normalized multi-Band Drought Index), který podobně jako NDWI (Normalized Difference Water Index) využívá pásmo o vlnové délce 0,86  $\mu\text{m}$ . Ovšem NMDI využívá místo jednoho absorpčního pásma rozdíl mezi dvěma absorpčními pásmy, které jsou citlivé ke změně obsahu vody v rostlinách a půdě, umístěnými v krátkých infračervených vlnových délkách 1,64 a 2,13  $\mu\text{m}$ . Všechny tyto přístupy přezkoumávají nový směr v používání dálkového průzkumu směrem k půdnímu odhadu vlhkosti a demonstrují potenciál pro sledování stavu vlhkosti pomocí slunečního záření.

Nicméně mělké pronikání záření skrz půdu, oblačnost a další faktory, které mají vliv na odrazivost půdy a nemohou být účinně minimalizovány, omezují užitečnost měření sluneční odrazivosti pro stanovení obsahu vlhkosti v půdě (Wang, Qu, 2009). Viditelné oblasti elektromagnetického spektra umožňují pouze detekci horní části několika milimetru půdního profilu. Odražené záření může být snadno ovlivněno faktory organické hmoty, půdní textury, drsnosti povrchu, úhlu dopadu, krytu a barvy vegetace, což způsobuje velké rozdíly v albedu půdních typů (Huang Qiu, 2006).

### **3.3.2 Termální část elektromagnetického spektra**

Tepelné infračervené dálkové snímání měří tepelné vyzařování Země pomocí elektromagnetických vlnových délek v rozmezí 3,5 a 14  $\mu\text{m}$ . Odhad povrchové

vlhkosti půdy pomocí dálkového průzkumu tepelného záření závisí především na měření teploty povrchu půdy a to buď jednotlivě (například metoda tepelné setrvačnosti), nebo v kombinaci s vegetačními indexy (například metoda teplotního/vegetačního indexu).

### 3.3.3 Metoda tepelné setrvačnosti (Thermal inertia method)

Tato metoda je založena na skutečnosti, že vodní útvary mají vyšší tepelnou setrvačnost (TI) než suché zeminy a horniny a vykazují nižší denní kolísání teploty (Huang Qiu, 2006). Změny v půdní vlhkosti mají silný vliv na tepelné vlastnosti půdy, což je vnitřní faktor změny teploty povrchu půdy. Amplituda denního rozsahu povrchové teploty půdy úzce souvisí s obsahem vlhkosti povrchu půdy. Oblasti s vyšší půdní vlhkostí jsou chladnější během dne a teplejší v noci (Wang, Qu, 2009).

Tepelné vlastnosti, které řídí denní rozsah teplot půdy je půdní tepelná vodivost  $\lambda$  a tepelná kapacita půdy  $C_T$ . Tepelná půdní setrvačnost je pak vyjádřena jako:

$$TI = \sqrt{\lambda \cdot C_T}, \quad (3.2)$$

kde TI = tepelná půdní setrvačnost, vlastnost materiálu, která popisuje jeho odolnost vůči změnám teploty,  $\lambda$  = půdní tepelná vodivost,  $C_T$  = tepelná kapacita půdy.

Když se zvýší obsah vody v půdě, TI se úměrně zvýší, čímž se sníží denní rozsah kolísání teploty (Wang, Qu, 2009). Avšak parametry k výpočtu nelze získat z měření DPZ, a proto jsou buď odhadovány, nebo modelovány pomocí pozemně měřených dat (Scheidt et al., 2010).

Proto je TI nahrazeno zdánlivou tepelnou setrvačností ATI (Apparent Thermal Inertia), která může být odvozena přímo z multispektrálních dálkových snímků, pomocí albeda povrchu  $\alpha$  a denního rozsahu teplot  $\Delta T$ :

$$ATI = \frac{1-\alpha}{\Delta T}, \quad (3.3)$$

$\alpha$  = albedo povrchu,  $\Delta T$  = denní rozsah teplot.



Poté lze vypočítat objemovou půdní vlhkost  $W_S$  pomocí lineární empirické rovnice:

$$W_S = \alpha_0 \cdot ATI + \alpha_1, \quad (3.4)$$

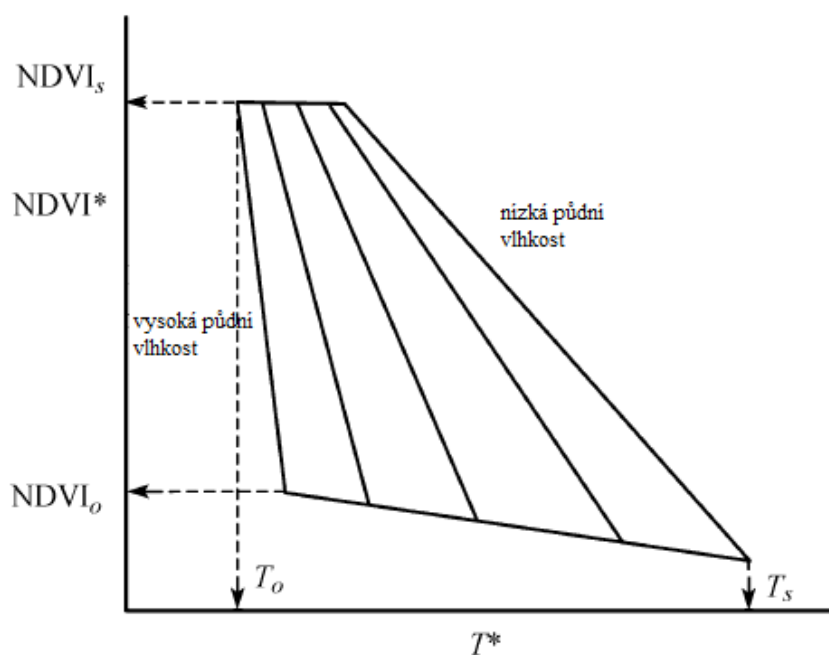
$\alpha_0$  a  $\alpha_1$  = empirické parametry.

Způsob stanovení tepelné setrvačnosti je jednoduchý a snadno použitelný. Při odhadu vodního obsahu v půdě lze dosáhnout vysoké přesnosti. Nicméně použitelnost je pouze v regionech s žádnou nebo velmi malou vegetací (Wang, Qu, 2009).

### 3.3.4 Metoda teplotního/vegetačního indexu

Tato metoda, někdy také nazývána jako trojúhelníková metoda popisuje složitou závislost vegetace (NDVI) a teploty zemského povrchu (LTS) na vlhkosti půdy. Tento vztah popsali Carlson a et al. (1991) a Gilles a et al. (1997), výsledky studie byly potvrzeny a aplikovány v SVAT (Soil-Vegetation-Atmosphere Transfer) modelu, který je navržen k popisu základních odpařovacích procesů, transpirace rostlin, odvodnění, povrchového odtoku a změn vlhkosti půdy. Schematický popis vztahu mezi půdní vlhkostí, teplotou a vegetačním indexem NDVI je na obrázku 3.1.

Obrázek 3.1 Schematický popis vztahu mezi půdní vlhkostí, teplotou a vegetačním indexem NDVI.



Zdroj: Wang, Qu (2009)

Na obrázku 3.1 představují osy X a Y standardizované hodnoty povrchové teploty  $T^*$  a vegetačního indexu  $NDVI^*$ , které se počítají:

$$T^* = \frac{T - T_0}{T_s - T_0} \quad (3.5)$$

$$NDVI^* = \frac{NDVI - NDVI_0}{NDVI_s - NDVI_0}, \quad (3.6)$$

kde  $NDVI$  a  $T$  jsou pozorované hodnoty a členy s indexy  $_0$  a  $_s$  jsou hodnoty minimální a maximální (Wang, Qu, 2009).

Carlson a et al. (1994) zjistili, že vztah mezi vlhkostí půdy,  $NDVI^*$  a  $T^*$  lze vyjádřit pomocí regresivní rovnice:

$$Ws = \sum_{i=0}^{i=n} \sum_{j=0}^{j=n} a_{ij} \cdot NDVI^{*(i)} \cdot T^{*(j)}, \quad (3.7)$$

kde  $NDVI^*$  = vegetační index,  $T^*$  = odstupňovaná hodnota povrchové teploty,

$a_{ij}$  = regresní koeficienty.

Takový přístup může být aplikován rovněž v kombinaci pozemního měření a družicového pozorování. Wang a et al. (2007) prokázali potenciál odhadu půdní vlhkosti tím, že zkombinovali terénní měření vlhkosti půdy a data pozemních parametrů LST a NDVI z radiometru MODIS pro dosažení prostorového rozlišení 1 km.

Další přístupy vycházející z trojúhelníkové techniky jsou například TVDI (Temperature Vegetation Dryness Index) nebo T/NDVI (Surface Temperature-Vegetation Index).

Přístupy založené buď na povrchové teplotě, nebo na teplotním vegetačním indexu jsou silné a mají jasný fyzikální význam, ale mají svá omezení. Stejně jako u všech optických technik se jedná o omezení detekce vlhkosti pouze z několika vrchních centimetrů půdního profilu, dále mají veliký vliv meteorologické podmínky (Wang, Qu, 2009).

### 3.3.5 Mikrovlnná část elektromagnetického spektra

Mikrovlnný dálkový průzkum poskytuje možnost odhadu vlhkosti půdy na základě měření elektromagnetického záření v mikrovlnné oblasti v rozmezí 0,5 až 100 cm. Základem mikrovlnného dálkového průzkumu Země pro zjištění půdní vlhkosti je velký kontrast mezi dielektrickými vlastnostmi vody (přibližná hodnota pro vodu je 80) a půdních částic (<4). Dielektrická vlastnost je lineárním koeficientem úměrnosti mezi elektrickou indukcí a intenzitou elektrického pole. Jak se zvyšuje vlhkost půdy, tím se zvyšuje dielektrická konstanta a tato změna je zjištělná pomocí mikrovlnných senzorů. U mikrovlnné části elektromagnetického spektra se využívají dva přístupy, aktivní a pasivní technika. Obě metody mikrovlnné techniky dálkového průzkumu prokázaly, že jsou nejslibnější možností pro globální monitorování změny vlhkosti půdy (Wang, Qu, 2009). Mikrovlnné měření má oproti jiným metodám tu výhodu, že není ovlivněno slunečním zářením a oblačností, ale v přesném odhadu vlhkosti je omezeno na regiony, které jsou buď holé, nebo jsou pokryty nízkou až středně hustou vegetací (Njokul Eni, Entekhabi, 1994).

#### **Pasivní metoda**

Pasivní dálkové mikrovlnné snímání je založeno na měření tepelného záření povrchu půdy, které závisí na fyzikální teplotě a emisivitě povrchu. Pasivní snímače měří přírodní termální vyzařování zemského povrchu v mikrovlnné vlnové délce (Lakhankar et al., 2009). Zvláštní výhodou pasivních mikrovlnných snímačů je, že při absenci vegetačního pokryvu je informace o vlhkosti půdy dominantním údajem v přijatém signálu. Prostorové rozlišení pasivních mikrovlnných senzorů půdní vlhkosti je v současné době koncipováno v rozmezí od 10 do 20 km, nejužitečnější frekvenční rozsah pro snímání půdní vlhkosti je 1-5 GHz (Njokul Eni, Entekhabi, 1994).

#### **Aktivní metoda**

Velkého pokroku bylo dosaženo v oblasti mapování regionální vlhkosti půdy pomocí aktivních snímačů mikrovlnného vlnění. Aktivní metody pracují na principu vyslaného mikrovlnného impulzu směrem k Zemi, po jehož odrazu je jeho navracená část přijata. Síla přijímaného signálu ve srovnání s odeslaným signálem slouží ke stanovení zpětného koeficientu povrchu, který stanovuje vlhkost půdy. Větší velikost přijatého signálu poukazuje na vyšší vlhkost. Nejběžněji používaným zařízením je radar SAR se syntetickou aperturou. Systémy SAR poskytují rozlišení v řádu desítek

metrů na šířku záběru 50 až 500 km. V současné době existuje pět operačních systémů SAR s frekvencí vhodnou pro získávání vlhkosti půdy: ESA ERS-1/2 C-band SAR, ESA ENVISAT (ERS-3) C-band ASAR (Advanced SAR), kanadský C-band RADARSAT-1/2, japonský L-band ALOS-PALSAR (Advanced Land Observing Satellite- Phased Array type L-band SAR, JERS-2), německý X-band Terra- SAT (Wang, Qu, 2009).

Od počátku SAR studií bylo vyvinuto mnoho teoretických, empirických a semi-empirických modelů týkajících se SAR koeficientu zpětného rozptylu k určení vlhkosti půdy.

Teoretické přístupy jsou obvykle odvozeny od difrakční teorie elektromagnetických vln a mají různé rozsahy platnosti, v závislosti na vlnové délce a rozsahu drsnosti povrchu. Fung a et al. (1992) vyvinuli model IEM (Integral Equation Model), tento model byl používán k získávání údajů o půdní vlhkosti nebo drsnosti povrchu a také pro ověření údajů získaných z terénních studií. Teoretické modely mohou poměrně dobře odhadnout obecný trend koeficientu zpětného rozptylu v závislosti na změnách drsnosti nebo půdní vlhkosti. Nicméně, jejich složitost a omezující požadavek na parametrizaci vegetace a půdy, povrchové vrstvy brání jejich efektivní využitelnost pro získávání vlhkosti půdy.

Empirické modely jsou obvykle odvozeny z experimentálních měření, ze kterých se stanovují empirické vztahy pro derivaci půdní vlhkosti z rozptylu pozorování. Příkladem používané empirické metody je normalizovaný index zpětného rozptylu vlhkosti NBMI (Normalized Backscatter Moisture Index). Byly vyvinuty i další empirické modely založené na využívání horizontální a vertikální polarizace k získání parametru vlhkosti a drsnosti. Empirické metody poskytují často přesné výsledky půdní vlhkosti, ale nemohou být použitelné pro datové sady, které překračují podmínky kalibrace, protože velké množství experimentálních měření je třeba odvodit obecnými statistickými zákony a vytvořit užitečný empirický vztah pro inverzi půdní vlhkosti z rozptylu pozorování, zatímco běžné empirické modely jsou obecně odvozeny z omezeného počtu pozorování.

Alternativou jsou semi-empirické modely, které představují přijatelný kompromis mezi teoretickými a empirickými přístupy, které byly vyvinuty na základě teoretického základu s modelovými parametry odvozenými

z experimentálních dat. Ve většině případů jsou tyto typy modelů vhodné spíše pro zemský povrch bez vegetace.

Nedávné pokroky v dálkovém průzkumu prokázaly schopnost měřit prostorové změny vlhkosti povrchu půdy pod různými topografickými a půdními pokryvy s použitím aktivního, ale i pasivního mikrovlnného měření, z nichž každý způsob má své vlastní silné a slabé stránky. Aktivní čidla, ačkoli mají schopnost poskytnout vysoké prostorové rozlišení v řádu desítek metrů, mají špatné rozlišení v čase s opakováním času více než 1 měsíc. Na druhou stranu mohou pasivní systémy poskytnout prostorové rozlišení pouze v řádu desítek kilometrů, ale s vyšším časovým rozlišením (Wang, QU John, 2009).

### **3.4 Topografie**

Topografie povodí má významný vliv na hydrologické, geomorfologické a biologické procesy v krajině. Prostorové rozložení topografických atributů může být často používáno jako nepřímé měření prostorové variability těchto procesů a umožňuje jejich mapování pomocí relativně jednoduchých technik. Dále se topografie používá k vytvoření reálnější fyzikální struktury hydrologických modelů a k jejich větší kvalitě. Digitální výškový model je primárním údajem pro analýzu topografie povodí.

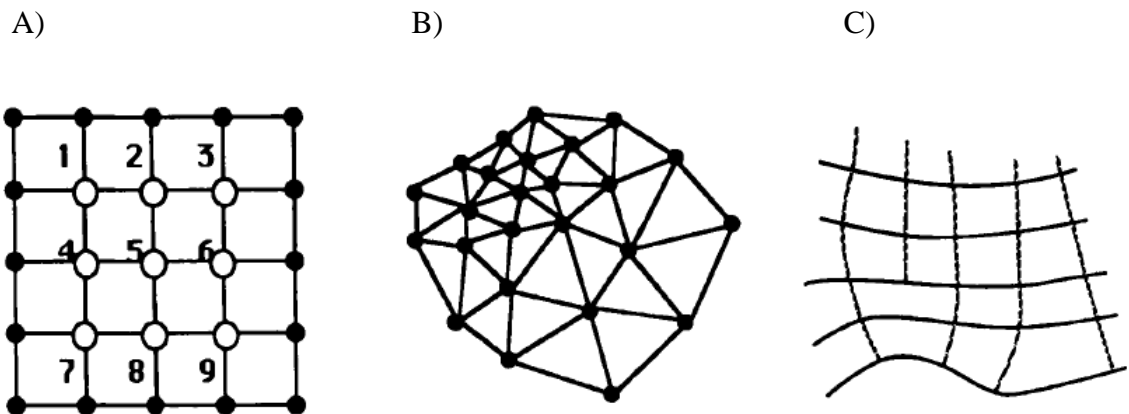
#### **3.4.1 DEM - Digitální výškový model**

„Digital Elevation Model (DEM) jsou data používaná geografickými informačními systémy (GIS) ke znázornění tvaru zemského povrchu. Obvykle se vztahuje k rastrovým datům, kde každá buňka rastru je nositelem výšky povrchu nad hladinou moře nebo jiné známé hodnoty“ (Kemp, 2008).

#### **3.4.2 Data pro DEM**

Při používání DEM je důležité vzít v úvahu strukturu daného typu DEM, a zda vyhovuje potřebám uživatele. Existují tři hlavní kategorie strukturovaných dat pro DEM: pravidelná síť (Regular-Grid Network), trojúhelníková nepravidelná síť bodů (Triangulated Irregular Network, TIN) a liniová síť (Contour-Based Network) (obr. 3.2) (Moore et al., 1991).

Obrázek 3.2 Kategorie strukturovaných dat pro tvorbu DEM: A) pravidelná síť, B) trojúhelníková nepravidelná síť bodů - TIN), C) liniová síť.



Zdroj: Moore et al. (1991)

### **Pravidelná síť (Regular-Grid Network)**

Jedná se o síť bodů s jednoznačně specifikovanými souřadnicemi X, Y a Z, které tvoří pravidelnou mřížku. Hustota sítě by měla odpovídat požadavku na zachycení co největších detailů terénních nerovností. Ale čím větší je hustota sítě, tím jsou větší nároky na výpočetní techniku (Moore et al., 1991). Každá buňka má pak vlastní nadmořskou výšku vztahující se ke středu čtverce (grid cell) nebo uzlu mřížky (Voženílek et al., 2001).

Grid patří mezi pravidelné rastrové struktury, kdy je povrch rozdělen do matice buněk, které mají pro jednoduchost výpočtů nejčastěji tvar čtverce. To s sebou ovšem nese několik nevýhod: 1. velmi těžce zachycují náhlé změny v nadmořské výšce, 2. velikost jednotlivých buněk mřížky má vliv na výpočetní účinnost a dosažené výsledky, 3. nereálné výpočty průběhů odtokových cest, 4. nepřesnosti ve vymezení konkrétních oblastí povodí (Moore et al., 1991).

Tvary mohou být ale různé: čtvercové, obdélníkové, šestiúhelníkové, trojúhelníkové, tvar polí je vždy stejný a přesně definovaný (Voženílek et al., 2001).

### **Trojúhelníková nepravidelná síť bodů (Triangulated Irregular Network, TIN)**

Síť je tvořena jednotlivými body povrchu, jako jsou vrcholy, hřebeny, zlomy ve svahu, které tvoří nepravidelné síť bodů se souřadnicemi X, Y a Z. Spojením těchto tří sousedních bodů vznikne jedna trojúhelníková elementární plocha (Moore

et al., 1991). Trojúhelníky jsou voleny dle Delaunayho kritéria, tedy tak, aby uvnitř kružnice opsané trojúhelníku neležel jiný bod. Hustota bodů je opět volena dle členitosti terénu. Kromě modelování reliéfu povrchu Země umí také TIN výpočet sklonu, výšky, polohy a vzdálenosti mezi jednotlivými body.

#### **Liniová síť (Contour-Based Network)**

Tato metoda je tvořena digitalizací vrstevnic, které jsou ukládány jako digitální liniové grafy (DLG, Digital Line Graphs) a mají souřadnice X a Y svoji specifickou výšku Z. Tyto linie slouží k rozdělení prostoru do nepravidelných polygonů ohraničené sousedními polygony a přilehlými izoliniemi. Tato data jsou nejčastěji aplikovaná pro hydrologické modely, protože umožňují sledování a orientaci toků (Moore et al., 1991).

#### **3.4.3 Zdroje dat**

Údaje pro tvorbu DMT jsou pořizovány různými technikami, jako je pozemní měření pomocí teodolitu, totální stanicí, GPS nebo digitalizací stávajících kartografických děl anebo leteckým a kosmickým snímkováním.

#### **Letecké a kosmické snímky**

Letecké snímky jsou nejvíce efektivním způsobem, jak lze vytvářet a aktualizovat topografické mapy. Letecké fotografie jsou také nejcennějším zdrojem dat pro tvorbu vysoce kvalitního DEM velkého měřítka. Kvalita komor je v současné době na tak vysoké úrovni, že obrazové zkreslení v důsledku nedokonalosti objektivu fotoaparátu je velmi malé. Standardní velikost leteckých snímků je 23×23 cm. Studie ukazují, že k udržení geometrické kvality analogových snímků pořízených na film je dostačující velikost pixelu 30 μm (LI et al., 2004).

Kromě záznamu na film mohou být snímky zaznamenány přímo elektronickým zařízením pro záznam digitálních snímků s použitím CCD (Charge-Coupled Device) fotoaparátu (LI et al., 2004).

Dalším typem záznamu leteckých snímků jsou skenery. Ty jsou pro získávání dat pro modelování digitálního terénu používány méně. Ovšem snímky získané skenováním z kosmického prostoru, tedy ze satelitů systému SPOT, jsou široce používány k tvorbě DEM malých měřítek v rozsáhlých oblastech (LI et al., 2004).

## **Fotogrammetrie**

Slovo fotogrammetrie se skládá ze tří řeckých slov: photos - světlo, gramma - to, co jest zapsáno nebo nakresleno, tedy záznam, a metron-měřit.

Základním principem fotogrammetrie je využití dvojice stereoskopických snímků k rekonstrukci původních 3-D tvarů objektů, ze kterých se následně odměřují 3-D souřadnice. Dvojice snímků musí mít vždy určitý stupeň překrytí. Pouze z oblasti překrytí se mohou tvořit 3-D modely. U leteckého snímkování je obvykle míra překrytí 60 % ve směru letu a 30 % mezi letovými pásy. Každá fotografie je charakterizována šesti orientačními prvky, třemi úhlovými pro každou osu (X, Y, Z) a třemi překladovými (X, Y, Z) v souřadnicovém systému, nejčastěji v geodetickém systému. U kosmických snímků není překrytí tak standardizované (LI et al., 2004).

Pro fotogrammetrické mapování, měření se používají tři typy snímačů: vzdušné filmové kamery, vzdušné digitální mapovací fotoaparáty, satelitní a zobrazovací snímače. Každý z nich má určité vlastnosti, výhody a nevýhody, ale principy extrakce výškového modelu a obrazu jsou stejné (Maidment et al., 2007).

Vzdušné filmové kamery jsou používány po celá desetiletí. Velmi vysoká přesnost při výrobě jednotlivých prvků, jako je objektiv, tělo a velmi přesná kalibrace s neustálým zdokonalováním, vedlo k vyspělé technologii schopné produkovat stabilní, geometricky dobře definovaný obraz ve vysokém rozlišení. V dnešním fotogrammetrickém produkčním prostředí je vše zaznamenáváno v digitální podobě (Maidment et al., 2007).

Vzdušné digitální mapovací fotoaparáty se vyvíjely v průběhu několika posledních let, z prototypů se přešlo k sériově vyráběným aparátům. V mnoha ohledech poskytují vynikající výkon, mají zvýšené spektrální a radiometrické rozlišení a celkově je měření přesnější (Maidment et al., 2007).

Satelitní snímače poskytují snímky ve vysokém rozlišení. Snímky jsou k dispozici od celé řady komerčních distributorů.

Fotogrammetrie je vyspělá technologie, které čerpá z desetiletí praktických zkušeností a vývoje. Ač jsou výsledky fotogrammetrických měření díky osvědčeným postupům konzistentní a předvídatelné a mají svojí kvalitu, nemohou dostatečně



uspokojit poptávku po velmi přesných snímcích a tvorbě DEM (Maidment et al., 2007).

### **Radar se syntetickou aperturou**

Dalším široce používaným aparátem k pořizování snímků je SAR (Synthetic Aperture Radar). SAR byl vyvinut v roce 1960 s cílem zlepšení tradičních radarů založených na principu Dopplerova posunu frekvence. Radar funguje jako aktivní čidlo, které poskytuje vlastní osvětlení ve formě mikrovln. Přijímá záznamy ozvěny odražené od cíle a pak mapuje intenzitu ozvěny na šedé stupnici pro vytvoření obrazu. Na rozdíl od optických a infračervených zobrazovacích senzorů, zobrazovací radar je schopen přijmout jasné obrázky ve dne v noci za všech povětrnostních podmínek (LI et al., 2004).

Snímky pořízeny SAR jsou velice citlivé na variabilitu terénu a jsou základem pro tři typy technik k získávání dat pro tvorbu DEM. Je to radargrammetrie, která získává data DEM prostřednictvím měření paralaxy. Interferometrie, která získává data prostřednictvím stanovení fázových posunů mezi dvěma ozvěnami. A radarclinometrie jenž získává data z tvaru stínů, ale pro tvorbu DEM není tato metoda dostatečně přesná a pro vytváření DEM se nedoporučuje (LI et al., 2004).

### **Princip interferometrie**

Graham (1974) uvádí, že dvojice SAR snímků stejné oblasti přijaté v mírně různých polohách mohou být použity k vytvoření interferogramu a fázové rozdíly zaznamenané v interferogramu mohou být použity k odvození topografické mapy zemského povrchu. Tato technologie se nazývá InSAR nebo IFSAR interferometrie (LI et al., 2004).

InSAR je technika zpracování signálu. Informace o výškách je odvozena interferogramem, který zaznamenává fázové rozdíly mezi dvěma komplexními radarovými snímky stejné oblasti přijatých dvěma SAR na palubě stejného nosiče nebo jedním SAR, který se vrací na stejné místo snímání. Podle teorie šíření rádiových vln, fázové zpoždění měřené anténou je přímo úměrné šikmému rozmezí od antény k cílovému bodu (LI et al., 2004).

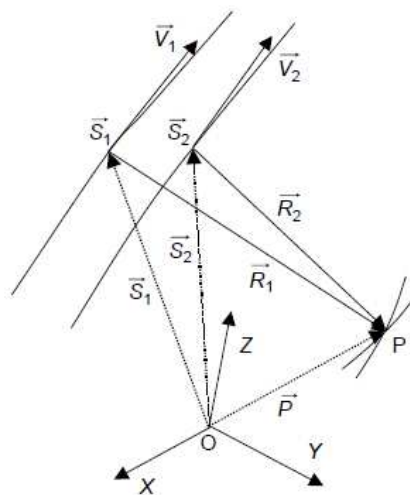
### Princip interferometrie - výpočet fázových rozdílů

Obrazy mohou mít různou orientaci, protože antény mohou mít mírně odlišné přístupy v různých časech. Proto musí být transformovány do stejného souřadnicového systému a dále převzorkovány do pixelů o stejné velikosti, aby se pozemní vzdálenosti snímků rovnaly. Tyto dva procesy mohou být prováděny souběžně, celý proces je pak nazýván co-registrace (LI et al., 2004).

### Radargrammetrie

Stejně jako u fotogrammetrie je pro potřeby radargrammetrie dvojice stereoskopických snímků. Rozdílem je, že radargrammetrie vyžaduje snímky s různými úhly dopadu. Na obrázku 3.3 je celková konfigurace radargrammetrie kde jsou dva pořízené snímky s různými úhly dopadu po dvou různých trasách snímání (LI et al., 2004).

Obrázek 3.3 Konfigurace radargrammetrie.



Zdroj: LI et al. (2004)

Za předpokladu, že osy X, Y a Z představují geodetický systém, pak lze odvodit vzorce pro výpočet stereoskopie. Na obrázku znázorňují S1 a S2 polohu, respektive vektor snímače, R1 a R2 značí vektor dvou radarových paprsků a P polohu objektu. To znamená, že poloha objektu je určena průsečíkem dvou radarových paprsků s různými úhly. Kvalita DEM závisí na poměru výšky a úhlu průsečíku páru snímačů (LI et al., 2004).

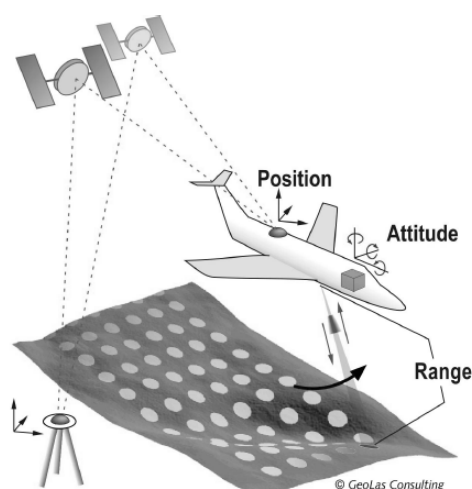
Před zahájením snímání je důležité definovat některé parametry měření. Jedná se hlavně o polohu a rychlost snímačů, jelikož každá složka z vektorů je obecně modelována jako funkce zobrazovacího času. Přestože dráha nebo orbitální data z GPS mohou poskytnout podklady pro takové modelování, jejich přesnost není vždy dostačující pro přesné sestavení 3D modelu. Proto se provádí zpřesnění parametrů pomocí přístupu nejmenších čtverců (LI et al., 2004).

### **Letecké laserové skenování (LIDAR)**

Laser byl pro dálkový průzkum Země poprvé použit v 60. letech 20. století. Vzhledem k pokroku v oblasti spolehlivosti a řešení v uplynulých desetiletích se systém palubního laserového skenování (ALS-Airborne Laser Scanning) stává důležitým nástrojem v dálkovém průzkumu Země, fotogrammetrii, geodezii a mapování. Systém ALS, v komerčním sektoru nazývaný jako LIDAR (Light Detection And Ranging), patří mezi aktivní systémy. Užitečnost ALS systémů byla prokázána řadou aplikací tam, kde tradiční fotogrammetrické metody selhávají nebo jsou příliš drahé, například získávání terénních údajů o nadmořské výšce i v oblastech s hustou vegetací (LI et al., 2004).

ALS je komplexní integrovaný systém, který se skládá z laserového dálkoměru (LRF), počítačového systému pro získávání on-line dat, paměťového média, skeneru a systému GPS/INS pro určování polohy a orientaci v systému. Základní princip snímání je na obrázku 3.4 (LI et al., 2004).

Obrázek 3.4 Princip LIDAR snímání.



Zdroj: LI et al. (2004).

Laserový vysílač vysílá krátký puls koherentního světla ve velmi úzkém (monochromatickém) pásmu vlnových délek, která se od cíle odráží zpět k vysílači. K měření času mezi vyslaným impulzem a zpětné ozvěny se používají velmi přesné hodiny. Vzdálenost vysílače k objektu (zemský povrch) se vypočte vynásobením uplynulého času rychlostí světla a vydělí se 2. Vlnová délka laseru je v nebo těsně nad vizuální oblastí elektromagnetického spektra, která je v rozmezí od 1 040 do 1 060 nm (Maidment et al., 2007).

Tato technologie je vhodná pro mapování v případě, že je známa absolutní poloha a směr snímání laseru vůči souřadnému systému. Přímé georeferencování je klíčovou technologií pro použití LIDAR systému. Pozici snímače sleduje GPS/IMU. Trojrozměrné souřadnice během snímání jsou uváděny v operačním systému souřadnic, kterým je elipsoid WGS84. Souřadnice Z tedy ještě není výška v souřadnicovém systému, je to výška vztažená k elipsoidu. Pro přepočítání výšky elipsoidu na výšku geodetickou se používá model geoidu GEOID03 (Maidment et al., 2007).

Komerční nástroje LIDAR jsou vytvořeny řadou výrobců, každý z nich má jiné zaměření nebo parametry. Ovšem některé parametry a přístupy jsou neměnné:

- Vlnová délka laseru jak je psáno výše, je v rozmezí 1 040 do 1 060 nm, nejpoužívanější vlnovou délkou je 1 064 nm.
- Rychlost skenování se pohybuje mezi 25 a 40 Hz, záleží na výrobcí.
- Úhel skenování se liší podle výrobce, ale je obvykle nastaven na 40 stupňů pro maximální proniknutí vegetací a minimální geometrické zkreslení.
- Počet zachycených zpětných impulzů je v rozmezí 1-5.
- Maximální impulzní frekvence je 150 kHz.

LIDAR je výkonný a cenově efektivní způsob pro získávání 3D bodových dat tak, aby vyhovoval široké škále uživatelských požadavků. Dále je nejvíce robustní technologií dálkového průzkumu Země pro tvorbu výškových modelů. Stejně jako u jiných DPZ technologií, tak i u LIDAR dochází k neustálému vývoji. Vývoj nových technologií a jejich postupnému zapracování vede ke zkvalitnění pořízených dat a k úsporám nákladů a času pro koncové uživatele (Maidment et al., 2007).

### 3.5 Data z meteorologických radiolokátorů

Nejdůležitějším vstupem do jakéhokoli hydrologického modelu jsou srážky. Ke zjišťování okamžitých intenzit atmosférických srážek a výskytů jevů oblačnosti slouží meteorologické radiolokátory, zkráceně radary (Řezáčová et al., 2007). Radarová měření díky plošnému pokrytí a dobrému prostorovému i časovému rozlišení dat vhodně doplňují síť pozemních stanic i družicová pozorování pro synoptickou a leteckou meteorologii. Měření poskytují velkoplošné informace a okamžitý přehled o pohybu a struktuře srážkových systémů, umožňují velmi krátkodobou předpověď a varování před nebezpečnými jevy, spojenými s konvektivní oblačností (Kráčmar, 2004).

#### 3.5.1 Funkce radaru

Vysílač radaru produkuje krátké pulsy s vysokým okamžitým výkonem v řádu 100 kW. Elektromagnetická energie je vysílána parabolickou anténou ve tvaru úzkého svazku do atmosféry, kde dochází k odrazu části vyslané energie od meteorologických cílů, jako jsou srážkové částice, ale i od nemeteorologických cílů, jako jsou terénní tvary, letadla a další objekty. Část odražené energie je přijata anténou, následně zesilována a detekována přijímačem radaru. Podle polohy antény (azimut a elevace) a času mezi vysláním a příjmem signálu je určena pozice cíle. Intenzitu cíle ukazuje množství odražené energie, které je úměrné radiolokační odrazivosti  $Z$ . Radiolokační odrazivost  $Z$  lze stanovit pomocí radarové rovnice (ve zjednodušeném tvaru) :

$$P_r = P_t \cdot (Z/R^2), \quad (3.8)$$

kde  $P_r$  = přijatý výkon,  $P_t$  = meteorologický potenciál radaru (přístrojová konstanta),  $R$  = vzdálenost cíle,  $Z$  = radiolokační odrazivost.

Pro meteorologické cíle skládající se z velkého množství vodních a ledových částic, je radiolokační odrazivost  $Z$  přímo úměrná sumě šestých mocnin průměrů kapiček v jednotkovém objemu:

$$Z = \sum D_i^6, \quad (3.9)$$

kde  $D$  = průměr částice vodní kapky.

To platí pro Rayleighův rozptyl. Tedy pro částice s průměrem řádově menším než vlnová délka radaru. Jednotkou odrazivosti je  $1 \text{ mm}^6/\text{m}^3$ , pro praktické účely se

užívá logaritmická jednotka dBZ, kde  $Z[\text{dBZ}] = 10 \cdot \log(Z[\text{mm}^6/\text{m}^3])$ , tedy 0 dBZ odpovídá  $Z=1\text{mm}^6/\text{m}^3$  (Kráčmar, 2004).

### 3.5.2 Radiolokační odhady srážek

Měřená radiolokační odrazivost  $Z$  má přímý vztah k okamžité intenzitě srážek v daném místě, to lze využít v operativní hydrologii. Pro určování intenzity srážek  $I$  v závislosti na odrazivosti  $Z$  se obvykle používá Marshall - Palmerův vzorec:

$$Z = a \cdot I^b \quad (3.10)$$

s experimentálně zjištěnými konstantami (např.  $a = 200$ ,  $b = 1,6$ ). Aby byl výpočet intenzity srážek co nejspolehlivější, je třeba měřit odrazivost co nejbližše zemskému povrchu, ale bez vlivu pozemních odrazů. Nejčastěji se používají data z výšky 1 až 1,5 km nad zemským povrchem, případně maxima odrazivosti ve vertikálním sloupci (Kráčmar, 2004).

Radar zachycuje prostorově kontinuální rozložení srážkových polí včetně jejich trojrozměrné struktury a pohybu. Radarová pozorování však ukazují pouze okamžitá rozložení intenzit srážek v diskrétních časech. Srážková pole mají přitom velkou variabilitu v prostoru i v čase, okamžité intenzity se na vzdálenosti několika málo km nebo během 10 min. mohou lišit o řád (Kráčmar, 2004).

### 3.5.3 Chyby v určování srážek

Při určování množství srážek za delší časové období v řádu hodin, se musí počítat s kumulací chyb. Z důvodu velké prostorové i časové proměnlivosti intenzit srážek je nutné používat co nejkratší interval měření, maximálně 5 minut. Celkové chyby určování intenzit srážek pomocí radaru jsou v řádu desítek až stovek procent, částečně mohou být sníženy vhodným zpracováním dat. Radarová měření tedy nekonkurují klasickým srážkoměrným sítím, ale poskytují okamžitý přehled o rozložení intenzit srážek na velké ploše (Kráčmar, 2004).

Odhadování intenzit přízemních srážek na základě měření radiolokační odrazivosti  $Z$  přináší mnohé nepřesnosti, rostoucí se vzdáleností od radaru:

- Se vzrůstající vzdáleností se radarový paprsek vlivem zakřivení Země vzdaluje od povrchu (horizontální paprsek ve vzdálenosti 130 km je 1 km, ve vzdálenosti 185 km je 2 km a ve vzdálenosti 225 km již

3 km nad povrchem). Radiolokační odrazivost většiny meteorologických cílů přitom obvykle rychle klesá s výškou.

- Svazek paprsků se s rostoucí vzdáleností rozšiřuje, zvyšuje se práh zachycení echa (citlivost radaru se vzdáleností klesá), zároveň radarový svazek již nebývá homogenně zaplněn srážkovými částicemi.
- Se vzdáleností se také zvyšuje pravděpodobnost výskytu útlumu ve srážkách ležících na dráze svazku.

Další zdroj nepřesností je proměnlivost spektra velikostí srážkových částic, ta znesnadňuje určení vztahu mezi odrazivostí  $Z$  a intenzitou srážek  $I$ . Navíc ve vrstvě tání srážek pod nulovou izotermou může docházet k přechodnému zvýšení odrazivosti (až o 15 dBZ). Určování intenzit srážek je nepříznivě ovlivněno také terénními předměty v dráze radarového paprsku, které způsobují rušivé odrazy a zastínění vzdálenějších meteorologických cílů (Kráčmar, 2004).

Obecně dochází poblíž radaru ke slabému nadhodnocení intenzit srážek, které s rostoucí vzdáleností od radaru přechází ve stále výraznější podcenění odhadu srážek. Důležitou roli přitom hraje zakřivení Země spolu s vertikálními profily radiolokační odrazivosti. Okamžité odhady intenzit srážek se tak mohou lišit o faktor 3 (tj. v rozsahu 1/3 až 3-násobek), v nepříznivých případech faktorem 5 a více (Kráčmar, 2004).

#### **3.5.4 Využívání radarových dat**

Aby bylo možno kvantitativně využívat radarová data pro hydrologické účely, je potřeba zavést dostatečně účinné procedury eliminace nemeteorologických (především pozemních) radarových odrazů. Dále je zapotřebí zvýšit přesnost odhadu intenzit srážek následujícím postupem:

- Zajistit přesnost hardwarové kalibrace a stabilitu radaru.
- Korigovat data na vertikální profily odrazivosti, tj. získat nejlepší odhad radiolokační odrazivosti v přízemní vrstvě.
- Na základě optimálního  $Z$ - $R$  vztahu vypočítat intenzitu srážek.
- Kombinovat radarový odhad s pozemním měřením srážek.

Některé moderní radary umožňují kromě měření srážek navíc také měření radiálních rychlostí částic a intenzity turbulence nebo polarizace odraženého záření. Více parametrická radarová měření jsou často užívána při výzkumu struktury srážkových systémů a probíhajících procesů v nich (Kráčmar J., 2004).

Účinný dosah běžně používaných meteorologických radarů pro určování intenzit srážek bývá přibližně 100-150 km, pro detekci bouřkové oblačnosti do cca 250-300 km. Schopnost detekce jevu radarem klesá se vzdáleností díky geometrii šíření paprsku nad zakřiveným povrchem Země a vlivy útlumu. Tato omezení radiolokační metody lze překonat pomocí kombinace dat z více radarů propojených do radarové sítě. Síť digitálních radarů byly v jednotlivých evropských zemích vytvářeny během 70. a 80. let, v průběhu 90. let se postupně formuje mezinárodní výměna operativních radarových dat (Kráčmar, 2004).

#### **4. Dostupnost dat DPZ pro hydrologické modelování**

V současné době všechna data pořizována z vesmíru spravují a distribuují jednotlivé kosmické agentury jednotlivých států či mezinárodních uskupení. Mezi nejdůležitější a nejvýznamnější distributory patří instituce NASA (National Aeronautics and Space Administration) a ESA (European Space Agency) jejímž členem je od roku 2008 i Česká republika.

Fotogrammetrické snímky spravují a distribuují státní i soukromé společnosti. Na území České republiky zajišťuje letecké snímkování a tvorbu ortofoto mezinárodní společnost GEODIS, dále pak Armáda České republiky, Gisat, Aerodata s.r.o., Český úřad zeměměřický a katastrální. Do roku 1992 měla výhradní právo leteckého snímkování pouze armáda.

Data pořizovaná těmito národními a mezinárodními agenturami jsou prezentována na mnoha internetových webech v digitální, elektronické podobě. Data na těchto webech jsou pro cílové uživatele velmi lehce dostupná a kvalitní.

V této části práce jsou stručně popsány dvě nejvýznamnější distributorské agentury v současnosti. Dále je popsána dostupnost jednotlivých dat na internetu, potřebných k hydrologickému modelování.



#### **4.1 NASA (National Aeronautics and Space Administration)**

Národní úřad pro letectví a kosmonautiku, dále jen NASA (National Aeronautics and Space Administration), je americká vládní agentura, která je zodpovědná za americký výzkum v oblasti letectví a kosmonautiky.

NASA byla založena 29. července 1958 prezidentem Dwightem D. Eisenhowerem. NASA vznikla z Národního poradního výboru pro letectví NACA (National Advisory Committee on Aeronautics) jako reakce na zahájení Sovětského vesmírného programu. V 60. letech v období studené války a závodu o Měsíc byl prováděn mimo jiné vývoj nových aplikací a technologií v rámci komunikačních satelitů.

NASA vykonává svoji činnost pomocí čtyř hlavních organizací:

- Aeronautika: vyvíjí a propaguje nové letecké technologie, které zlepšují naši schopnost prozkoumávat a které mají praktické využití na Zemi.
- Lidský průzkum a operace: zaměřuje se na činnosti Mezinárodní kosmické stanice a na průzkum mimo oběžnou dráhu Země.
- Věda: zkoumá Zemi, sluneční soustavu a vesmír.
- Vesmírné technologie: rychle vyvíjí, inovuje, ukazuje převratné technologie, které umožňují budoucí mise NASA, a zároveň poskytuje ekonomický přínos (NASA, 2014).

#### **4.2 ESA (European Space Agency)**

Evropská kosmická agentura dále jen (ESA), je mezivládní organizace pro využití vesmíru. Agentura byla zřízena Úmluvou o založení ESA ze dne 30. května 1975. Členy ESA je devatenáct států: Belgie, Česko, Dánsko, Finsko, Francie, Německo, Rakousko, Řecko, Irsko, Itálie, Lucembursko, Nizozemsko, Norsko, Portugalsko, Rumunsko, Španělsko, Švédsko, Švýcarsko a Velká Británie. Maďarsko a Polsko mají podepsanou smlouvu pouze o spolupráci, která těmto státům umožňuje zapojení do většiny programů. Zvláštní postavení má v organizaci Kanada, která díky své formální příslušnosti k britskému Společenství národů má úzké vztahy s Evropou a zapojuje se do vybraných projektů ESA na základě vzájemných smluv.

Hlavní sídlo ESA je v Paříži. ESA má vedle hlavního sídla 5 výzkumných středisek se specifickým zaměřením. Tato střediska jsou rozmístěna v různých členských státech ESA:

- ESTEC (European Space Research and Technology Centre), umístěné v Noordwijk v Nizozemí, je největší středisko ESA. Jedná se o testovací středisko a centrum evropských kosmických aktivit. ESTEC je odpovědný za technickou přípravu a vedení kosmických projektů ESA.
- ESRIN (European Space Research Institute), umístěné ve Frascati v Itálii. Toto středisko zejména řídí pozemní segment pro družice určené k pozorování Země a udržuje největší archiv dat o životním prostředí v Evropě.
- ESOC (European Space Operations Centre), umístěné v Darmstadtu v Německu, je středisko zajišťující činnost kosmických objektů na oběžné dráze.
- EAC (European Astronauts Centre), umístěné v Kolíně nad Rýnem v Německu, je školícím střediskem a základnou pro evropské astronauty.
- ESAC (European Space Astronomy Centre), umístěné blízko Madridu ve Španělsku, je středisko ve kterém jsou soustředěny kapacity pro astronomické a planetární mise. V tomto středisku jsou umístěny vědecké archivy.

Kromě těchto středisek ESA disponuje i vesmírným střediskem v Guayaně (Guiana Space Centre - GSC).

Zvláštní formu spolupráce s ESA představuje program Plán evropského spolupracujícího státu - PECS (Plan for European Cooperating States). Tento program má nečlenskými státy ESA zejména ze střední a východní Evropy usnadnit spolupráci na evropských kosmických programech. Smyslem programu PECS je poskytnout i takovým státům možnost připojit se ke stávajícím programům ESA (Český kosmický portál, 2014).

#### **4.3 LP DAAC (Land Processes Distributed Active Archive Center)**

LP DAAC je součástí NASA systému EOS (Earth Observing System) a informačního systému EOSDIS (Earth Observing System Data and Information System). LP DAAC má na starost zpracování, archivaci a distribuci dat DPZ

a odvozených produktů z EOS snímačů. LP DAAC pracuje s daty ze tří EOS systémů: ASTER Terra, MODIS Terra a MODIS Aqua. MODIS data jsou přijata, distribuována a archivována zatímco data z ASTER jsou ještě zpracovávána. Tyto soubory dat patří k nejvýznamnějším přispěvatelům do inter disciplinární studie integrovaného systému Země. Představují přibližně 1,5 PB objemu dat v LP DAAC (LP DAAC, 2014).

Nabízených produktů na tomto portálu je celá řada. Navíc jsou data a produkty z LP DAAC k dispozici zcela zdarma, nenesou žádná omezení.

LP DAAC nabízí několik on-line přístupů sloužících k vyhledávání, vizualizaci, zpracování požadovaných dat. Jedná se o nástroje:

- USGS Earth Explorer je nástroj, který poskytuje uživatelům možnost dotazování, vyhledávání družicových snímků, leteckých snímků a kartografických produktů od několika zdrojů.
- USGS Global Visualization Viewer je nástroj, jehož prostřednictvím lze v grafickém rozhraní okamžitě nalézt všechny dostupné snímky na určeném místě. Dále nabízí přístup k metadatům.
- Global Data Explorer je rozhraním, jež je výsledkem spolupráce mezi Land Processes (LP), Distributed Active Archive Center (DAAC) a George Mason University's Center for Spatial Information Science and Systems. Uživatelé tohoto rozhraní musí mít registrovaný účet v systému NASA.
- LP DAAC Data Pool tvoří přímější cestu k vyhledávání nástrojů a dat on-line. Všechna data jsou pro uživatele zdarma.

#### **4.4 GLCF (The Global Land Cover Facility)**

Global Land Cover Facility, dále jen GLCF poskytuje vědecká data a produkty, která pomáhají lepšímu pochopení globálních environmentálních systémů. Vytváří a distribuuje zejména dálkově snímaná data, která popisují zemský povrch v lokálním i celosvětovém měřítku.

Základní údaje a produkty jsou k dispozici zcela zdarma pro každého uživatele přes FTP (File Transfer Protocol). On-line datové soubory mohou být přístupné elektronicky přes rozhraní Earth Science Data Interface (ESDI).

GLCF výzkum se zaměřuje na stanovení krajinného pokryvu a jeho změn po celém světě. Krajinným pokryvem se rozumí rozpoznatelná vegetace, geologické, hydrologické a antropogenní prvky na zemském povrchu. GLCF je cenným zdrojem NDVI indexu.

Pořízená data pochází ze satelitů: ASTER, IKONOS, QuickBird, OrbView, Landsat, MODIS, SRTM.

Data z GLCF nejčastěji využívají tyto vědní obory:

- Věda: zeměpis, věda o Zemi, ekologie, klimatologie, vzdělávání.
- Politika životního prostředí: globální oteplování, udržitelný rozvoj, řízení rizik.
- Management zdrojů: hodnocení biodiverzity, lesnictví, správa chráněné krajinné oblasti, lesní zásoby.
- Management katastrof: požáry, sledování povodní a sucha, zmírňování následků katastrof.
- Počítačové vědy: získávání údajů, slučování dat.

#### **4.5 FLOREO**

Projekt FLOREO, nazýván “Demonstration of ESA Environments in support to FLOod Risk Earth Observation monitoring”, je programem řešeným v rámci PECS, který je společnou aktivitou České republiky a Evropské kosmické agentury (ESA) zaměřenou na podporu zapojení českých firem a institucí do programů ESA.

Projekt je zaměřen na vybudování systému včasné předpovědi nebezpečí vzniku povodní na regionální a národní úrovni ČR a vizuální prezentaci výsledků pomocí webového portálu a mapového serveru. Podoba a náplň projektu byly konzultovány s Českým hydrometeorologickým ústavem, dále jen ČHMÚ.

Metodika je založena na kombinaci družicového snímání povrchu Země s vysokou časovou periodou měření (optická a radarová data středního rozlišení) a in-situ dat v diskretních bodech meteorologických stanic provozovaných ČHMÚ. Spojením obou souborů dat v jednom systému přináší více detailních informací pro hydrologický monitoring a včasnou předpověď povodní.

Navrhovaný systém je založen na moderních metodách monitorování bilance vody v krajině za pomoci metody DPZ. Součástí systému bude detailní mapování a monitorování sněhové pokrývky, tání sněhu v jarních měsících a vznik potenciálního ohrožení povodněmi. V druhé navazující části se systém zaměřuje na monitoring vlhkosti půdy a distribuci dešťových srážek v krajině, tedy hlavně na rychlost infiltrace a případné riziko povrchového odtoku přispívající ke vzniku povodní.

Sněhová pokrývky a její změny jsou v systému FLOREO monitorovány pomocí několika družic. Nízké rozlišení snímků z METEOSAT a NOAA znesnadňuje jejich praktické využití. Alternativou jsou optické snímky družice Terra a skeneru MODIS v rozlišení 250 m nebo radarové snímky družice Envisat a skeneru ASAR v rozlišení 150 m. Výhodou dat MODIS je každodenní snímání nad daným územím a přímočařejší vyhodnocení dat. Data ASAR je naopak možné zpracovávat bez omezení oblačností, ovšem perioda opakovaného měření je přibližně 10 až 14 dní. FLOREO kombinuje a používá oba zdroje dat. Systém také umožňuje porovnání s výsledky z tzv. sněhového modelu založeného na matematickém výpočtu ze srážek a teplot měřených v síti meteorologických stanic ČHMÚ.

Pro zjištění parametru indexu listové plochy LAI je používán osmi denní produkt v rozlišení 1 km, který je odvozen ze snímků MODIS.

Služba poskytuje denně zpracovávané vizualizace meteo dat ze staniční sítě ČHMÚ a umožňuje jejich další využití prostřednictvím exportů (PNG, GeoTIFF, SHP, ASCII grid) nebo přímo službou WMS (Web Map Service).

Pro každý den jsou dostupná následující měření: min/max teplota, průměrná teplota, srážky, rychlost větru, tlak vodní páry, úhrn slunečního svitu, ukazatele evapotranspirace. V zimní sezóně jsou také v některých dnech k dispozici satelitní snímky MODIS s klasifikací sněhové pokrývky na našem území.

#### **4.6 GEODIS**

Společnost GEODIS je přední evropská společnost v oblasti geodézie, fotogrammetrie a dálkového průzkumu Země. GEODIS GROUP sdružuje celkově třináct společností, které působí v šesti zemích, jedna z divizí je i v České republice.

V oblasti leteckého snímkování disponuje společnost nejmodernější technikou a patří k nejlépe vybaveným pracovištím v Evropě.

V následující tabulce č. 1 je uveden přehled nejvýznamnějších satelitů s uvedenými distributory, prostorovým rozlišením, periodou snímání, přístupem a použitím dat.

Tabulka č. 1 – Přehled dostupnosti dat DPZ

<b>Přehled dostupnosti dat DPZ</b>			
<b>Satelit/Družice</b>	<b>Poskytovatel</b>	<b>Perioda snímání</b>	<b>Přístup/Omezení</b>
Landsat 5 TM	NASA / USGS	Každých 16 dnů	Volný přístup
Landsat 7 ETM+	NASA / USGS	Každých 16 dnů	Volný přístup
Landsat 8	NASA / USGS	Každých 16 dnů	Volný přístup
AVHRR / 3	NOAA / USGS	Dvakrát denně, celá planeta	Volný přístup
MODIS	NASA	Denní	Volný přístup
QuickBird	Digital Globe	2-9 dní	Komerční prodej, lze poskytnout data na speciální žádost
IKONOS	Digital Globe	Jednou za 3 dny	Komerční prodej, lze poskytnout data na speciální žádost
SPOT	EADS Astrium	Každé 1-3dny	Prodej od EADS Astrium, lze poskytnout na speciální žádost
RADARSAT	Kanadská kosmická agentura MDA	14 x za den	Prodej od MDA, lze poskytnout data pro výzkum

#### 4.7 Zpětná dostupnost dat

Pro potřeby nejen hydrologického modelování jsou zapotřebí i historicky archivovaná data. V následující tabulce č. 2 jsou uvedeny jednotlivé satelitní systémy s dostupností pořízených dat a jejich rozlišením.

Tabulka č. 2 – Satelitní systémy s nabízeným rozlišením a dobou archivace.

<b>Satelitní systém - Satelit</b>	<b>Rozlišení</b>	<b>Archiv dat</b>
ASTER (Advanced Spaceborne Thermal Emission a Reflection Radiometer)	15-90 m	2000 - současnost
AVHRR (Advanced Very High Resolution Radiometer)	1 km	1979 - současnost
Hyperion a Advanced Land Imager (ALI)	10-30 m	2000 - současnost
LANDSAT	15-120 m	1970 - současnost
Landsat ETM+ (Enhanced Thematic Mapper Plus)	15-60 m	1999 - současnost
Landsat MSS (Multispectral Scanner) Landsat 1-5	80 m	1972-1992
Landsat TM (Thematic Mapper)	30-120 m	1982 - současnost
MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) - Aqua	250-1 000 m	2002 - současnost
MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) - Terra	250-1 000 m	2000 - současnost
QuickBird	0,6-2,4 m	2001 - současnost
SPOT	6-1 000 m	1986 - současnost
IKONOS	1-4 m	1999 - současnost

Největším archivem leteckých měřických snímků v České republice disponuje Vojenský geografický a hydrometeorologický úřad v Dobrušce. Leteckými snímky disponuje také Český úřad zeměměřičský a katastrální a v neposlední řadě brněnská firma Geodis, která je v současnosti správcem nejaktuálnější databáze leteckých snímků.



## 5. Diskuze

V práci byly popsány základní metody získávání dat pro hydrologické modelování a jejich dostupnost. Plnohodnotné využití potenciálu dálkově snímaných dat v hydrologickém modelování se zatím 100% nedaří. Hlavním důvodem je málo operačních metod a algoritmů, které by sloužily ke kvalitnímu odvození důležitých proměnných z dálkově snímaných dat. To je například hlavní překážkou při kvalitním určování půdní vlhkosti. Dále pokulhávající vývoj nových algoritmů ovlivňuje součinnost GIS a propojení dat DPZ ve velkém měřítku a rozlišení. Další omezení se týkají pravidelného snímání daného místa v co nejkvalitnějším rozlišení a bez rušivých elementů. Vývoj by se kromě technického zdokonalování měl ubírat právě ke zlepšování algoritmů a analytických operačních metod.

Dostupnost dat je v době internetu pro cílového uživatele velmi dobrá. Valná většina institucí a serverů poskytuje data zdarma. Jediným problémem je někdy komplikovaná dostupnost historických dat, a to hlavně dat pořízených leteckou fotogrammetrií.

## **6. Závěr**

Dálkový průzkum Země a s ním pořízená data jsou v mnoha ohledech nezbytnou součástí různých oborů lidské činnosti. Použití dálkově snímaných dat v hydrologii může přinést efektivnější obranu proti povodním, plánování při zavlažování a hospodaření s vodními zdroji.

První část práce obecně popisuje, jakými způsoby lze získávat data z DPZ nejen pro hydrologické účely.

Stěžejní část práce popisuje, jaká data z DPZ jsou aplikovatelná pro hydrologické modelování. Dále jsou uvedeny systémy, které data pořizují a jak se analyzují a vyhodnocují. Nakonec je shrnuta dostupnost naměřených dat s některými příklady distribučních institucí.

Vývoj DPZ a geoinformačních technologií se vyvíjí obrovským tempem. Momentálně se vývoj ubírá ke zdokonalování hlavně kosmického segmentu DPZ. Každá metoda snímání má své výhody i nevýhody, ovšem rozlišení, snímání velkých ploch a nízké náklady na provoz, které momentálně nabízí radarové a družicové snímání, bude vytlačovat letecké snímání. Se stále se zdokonalujícími přístroji a metodami vyhodnocení se jistě bude zdokonalovat i hydrologické modelování.

## Seznam zkratk

ALS	Airborne Laser Scanning
AVC	Advanced Vidicon
ATI	Apparent Thermal Inertia
AVHRR	The Advanced Very High Resolution Radiometer
CCD	Charge-Coupled Device
CNES	Centre National d'Études Spatiales
ČHMÚ	Český hydrometeorologický ústav
DAAC	Distributed Active Archive Center
DEM	Digital Elevation Model
DPZ	Dálkový průzkum Země
EAC	European Astronauts Centre
EOS	Earth Observing System
EOSDIS	Earth Observing System Data and Information System
ESA	European Space Agency
ESAC	European Space Astronomy Centre
ESDI	Earth Science Data Interface
ESOC	European Space Operations Centre
ESRIN	European Space Research Institute
ESTEC	European Space Research and Technology Centre
ETM+	Enhanced Thematic Mapper Plus
FTP	File Transfer Protocol
GAC	Global Area Cover
GIS	Geografický informační systém
GLCF	Global Land Cover Facility
GPS	Global Positioning System
HRG	High Resolution Geometry

HRV	High Resolution Visible
HRVI	High Resolution Visible and Infrared
IEM	Integral Equation Model
IMU	Inertial Measurement Unit
INS	Inertial Navigation System
InSAR	Interferometric Synthetic Aperture Radar
LAC	Local Area Cover
LAI	Leaf Area Index
LDCM	The Landsat Data Continuity Mission
LIDAR	Light Detection And Ranging
LP	Land Processes
LP DAAC	Land Processes Distributed Active Archive Center
LRF	Laser Rangefinder
LTS	Land Surface Temperature
MODIS	Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer
MSS	Multispectral Scanner
NACA	National Advisory Committee on Aeronautics
NASA	National Aeronautics and Space Administration
NBMI	Normalized Backscatter Moisture Index
NDVI	Normalized Difference Vegetation Index
NDWI	Normalized Difference Water Index
NIR	Near-infrared
NMDI	Normalized multi-Band Drought Index
NOAA	National Oceanic and Atmospheric Administration
OLI	Operational Land imager
PECS	Planfor European Cooperating States
PVI	Perpendicular Vegetation Index

SAR	Synthetic Aperture Radar
SMMR	Scanning Multispectral Microwave Radiometer
SR	Scanning Radiometer
SSM/I	Special Sensor Microwave/Imager
SVAT	Soil-Vegetation-Atmosphere Transfer
SWE	Snow Water Equivalent
SWIR	Short-Wavelength Infrared
T/NDVI	Surface Temperature-Vegetation Index
thermal-IR	Thermal-infrared
TI	Thermal Inertia
TIN	Triangulated Irregular Network
TIRIS	Thermal Infrared Sensor
TM	Thematic Mapper
TVDI	Temperature Vegetation Dryness Index
VHRR	Very High Resolution Radiometer
WMS	Web Map Service

## Seznam obrázků

Obrázek	2.1 Princip využití elektromagnetického záření .....	10
Obrázek	2.2 Snímání zemského povrchu .....	12
Obrázek	3.1 Schematický popis vztahu mezi půdní vlhkostí, teplotou a vegetačním indexem NDVI .....	25
Obrázek	3.2 Kategorie strukturovaných dat pro tvorbu DEM: A) pravidelná síť, B) trojúhelníková nepravidelná síť bodů - TIN), C) liniová síť .....	30
Obrázek	3.3 Konfigurace radargrammetrie .....	34
Obrázek	3.4 Princip LIDAR snímání .....	35

**Seznam tabulek:**

Tabulka	č. 1 – Přehled dostupnosti dat DPZ.....	47
Tabulka	č. 2 – Satelitní systémy s nabízeným rozlišením a dobou archivace.....	48

## **Literatura:**

CAMPBELL, J. B., 1987: Introduction to remote sensing. Taylor & Francis, 551 s.

Český kosmický portál, 2014: Informační stránky Koordinační rady ministra dopravy pro kosmické aktivity, online: <http://www.czechspaceportal.cz>.

DOBROVOLNÝ P., 1998: Dálkový průzkum Země. Digitální zpracování obrazu. Masarykova univerzita, Brno, 208 s.

DOBROVOLNÝ P., 2001: Masarykova univerzita, Brno. Mapování vegetace s využitím družicových snímků, online: [http://www.sci.muni.cz/~dobro/zemsky\\_povrch\\_vegetace.html](http://www.sci.muni.cz/~dobro/zemsky_povrch_vegetace.html), cit. 2.3.2014

ESA, 2014: European Space Agency, online: <http://www.esa.int>.

FLOREO, 2014: Demonstration of ESA Environments in support to FLOod Risk Earth Observation monitoring, online: <http://www.floreo.cz>.

GEODIS 2014: Mezinárodní společnost provádějící letecké snímkování, online: <http://sluzby.geodis.cz>.

GLCF 2014: The Global Land Cover Facility, online: <http://www.landcover.org>.

HALOUNOVÁ L., PAVELKA K., 2005: Dálkový průzkum Země. Vydavatelství ČVUT, Praha.

KEMP, K. K., 2008: Encyclopedia of Geographic information science. SAGE Publications, Inc.

KITE G.W., PIETRONIRO A., 1996: Remote sensing applications in hydrological modelling. Hydrological Sciences Journal: 563-591.

KRÁČMAR J., 2004: Meteorologické radiolokátory. Interní materiál ČHMÚ.

LAKHANKAR T., KRAKAUER N., KHANBILVARDI R., 2009: Applications of microwave remote sensing of soil moisture for agricultural applications. International Journal of Terraspace Science and Engineering: 81-91.



LAKSHMI V., 2012: Review Article: Remote Sensing of Soil Moisture. Hindawi Publishing Corporation, ISRN Soil Science: 1-34.

LI Z., ZHU Q., GOLD C., 2004: Digital Terrain Modeling: Principles and Methodology. Boca Raton: CRC Press, 323 s.

LP DAAC, 2014: Land Processes Distributed Active Archive Center, online: <http://www.lpdaac.usgs.gov>.

MAIDMENT David R. et al., 2007: Elevation Data for Floodplain Mapping. THE NATIONAL ACADEMIES PRESS, Washington D.C., USA, 167 s.

MOORE, I. D., GRAYSON R. B., LADSON A. R., 1991: Digital terrain modeling: A review of hydrological, geomorphological, and ecological applications. Hydrological Processes, Vol. 5: 3–30.

MURIOZ J. et al., 2013: Synergistic Use of Remote Sensing for Snow Cover and Snow Water Equivalent Estimation. British Journal of Environment & Climate Change 3: 1-14.

NASA, 2014: National Aeronautics and Space Administration, online: <http://www.nasa.gov>.

NJOKUL Eni G., ENTEKHABI D., 1994: PASSIVE MICROWAVE REMOTE SENSING OF SOIL MOISTURE. Journal of Hydrology: 101-129.

Qiu H., 2006: Thermal Remote Sensing of Soil Moisture: Validation of Presumed Linear Relation between Surface Temperature Gradient and Soil Moisture Content. Civil and Environmental Engineering Department at The University of Melbourne, Australia: 421-477.

REEDY M. ANJI, 2008: Textbook Of Remote Sensing And Geographical Information Systems. BS Publications, Centre for Environment Institute of Science and Technology Jawaharlal Nehru Technological University, Kukatpally, India, 476 s.

ŘEZÁČOVÁ D. et al., 2007: Fyzika oblaků a srážek. Academia, Praha, 574 s. Satellite Imaging Corporation 2013, online: [www.satimagingcorp.com/satellite-sensors/spot-6.html](http://www.satimagingcorp.com/satellite-sensors/spot-6.html), cit. 2.3.2014.

SIC, 2014: Satellite Imaging Corp: online: <http://www.satimagingcorp.com/>

SCHEIDT S., RAMSEY M., LANCASTER N., 2010: Determining soil moisture and sediment availability at White Sands Dune Field, New Mexico, from apparent thermal inertia data. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 155 s, číslo F2.

SVATOŇOVÁ H., LAUERMANN L., 2010: Dálkový průzkum Země – aktuální zdroj geografických informací. Masarykova univerzita, Brno, 96 s.

USGS, 2012: Landsat: A Global Land-Imaging Mission, Solux Falls, online: <http://pubs.usgs.gov/fs/2012/3072/fs2012-3072.pdf>, cit. 27.12.2013.

VOŽENÍLEK V. et al., 2001: Integrace GPS/GIS v geomorfologickém výzkumu. Univerzita Palackého v Olomouci, Olomouc.

WANG L., QU John J., 2009: Satellite remote sensing applications for surface soil moisture monitoring: A review. EastFIRE Laboratory, Environmental Science and Technology Center, College of Science, George Mason University, Fairfax, USA: 237-247.

WMO, 2014: Review on remote sensing of the snow cover and methods of mapping snow, online: <http://www.wmo.int/>, cit. 24.3.2014.

YICHUN X., ZONGYAO S., MEI Y., 2008: Remote sensing imagery in vegetation mapping: a review. *Journal of Plant Ecology*: 9–23.

ZHANGSHI Y., LEE WILLIAMS T. H., 1997: Obtaining Spatial and Temporal Vegetation Data from Landsat MSS and AVHRR/NOAA Satellite Images for a Hydrologic Model. *Photogrammetric engineering & remote sensing journal of the American society for photogrammetry and remote sensing*: 59-67.