

Analýza 4.

MOŽNOSŤ VYUŽITIA MODERNÝCH METÓD PREDCHÁDZANIA NÁSLEDKOM ZOSUVOV V OBLASTI PODPORY

Obsah

METODIKA SPRACOVANIA	4
1. DENDROCHRONOLOGICKÁ METÓDA	5
a) Technický opis metódy zmierňovania zosuvov s teoretickými predpokladmi - dendrochronologická metóda.....	5
b) Opis výhod a nevýhod dendrochronologickej metódy	9
c) Posúdenie vhodnosti použitia dendrochronologickej metódy	9
2. RADAROVÁ INTERFEROMETRIA	10
a) Technický opis protišmykovej metódy s teoretickými predpokladmi - radarová interferometria.....	10
b) Opis výhod a nevýhod radarovej interferometrie	14
c) Posúdenie vhodnosti použitia radarovej interferometrie	15
3. LASEROVÉ SKENOVANIE	16
a) Technický opis metódy proti sklúznutiu s teoretickými predpokladmi - laserový skener .	16
b) Opis výhod a nevýhod laserového skenovania.....	18
c) Posúdenie vhodnosti použitia laserového skenovania	18
d) Prínosy inovatívnych metód prevencie zosuvov pre miestne orgány pôsobiace v podporovanej oblasti	19
LITERATÚRA.....	20

METODIKA SPRACOVANIA

Štúdia vychádzala z materiálov dostupných na technických univerzitách na Slovensku a v Poľsku; Vyhľadávali sa a združovali sa informácie o aplikácii moderných riešení pri analýze zosuvnej činnosti a odhade nebezpečenstva zosuvov modernými metódami. Využila sa aj webová analýza a analyzovali sa vedecké publikácie, najmä s využitím vedeckej databázy Google Scholar, kde sú dostupné publikácie na analyzovanú tému. Analyzovali sa vedecké práce z miest, ktoré sú vzhľadom na svoju geologickú stavbu, špecifické typy zrážok a aktívnu seizmicitu najviac náchylné na katastrofické zosuvy: Taiwan, Čína, Taliansko a Nový Zéland. Na správne filtrovanie informácií obsiahnutých v databáze Gogle Scholar sa vyhľadávali aj špecifické frázy: metóda rizika zosuvu, metóda nebezpečenstva zosuvu, zmiernenie zosuvu, aktivita zosuvu.

Zámerom tejto štúdie bolo podľa zadania opísať moderné metódy zmierňovania zosuvov. V štúdiu bola využitá aj dostupná literatúra, ktorej zoznam je uvedený na konci štúdie. Štúdia bola vypracovaná podľa nasledujúcej schémy vyplývajúcej z opisu predmetu zákazky:

- a) technický opis metódy prevencie zosuvov vrátane teoretických predpokladov,
- b) opis výhod a nevýhod každej metódy,
- c) posúdenie užitočnosti použitia metódy,
- d) prínosy inovačných metód prevencie zosuvov pre miestne orgány pôsobiace v podporovanej oblasti (prínosy sa opisujú spoločne pre všetky moderné metódy).

1. DENDROCHRONOLOGICKÁ METÓDA

a) Technický opis metódy zmierňovania zosuvov s teoretickými

predpokladmi - dendrochronologická metóda

Kmene stromov prerastajúcich zosuvmi sú často v dôsledku vplyvu pohybu hmoty vyklonené alebo ohnuté (obr. 1. A-B, Braam 1978; Wistuba, Malik 2011). Vonkajším poruchám zodpovedajú zmeny v anatómii dreva: napr. dekoncentrácia rastu (Butler 1987). Každý ročný prírastok vykazujúci dekoncentráciu, ako aj sprievodné reakčné drevo, poskytuje informácie o environmentálnom strese, ktorý ovplyvňuje rast stromu v príslušnom roku. Priebeh zosuvu v lesných oblastiach sa zaznamenáva rok po roku, počas celého života stromov. To je výhoda dendrochronologickej metódy oproti iným metódam analýzy dynamiky zosuvu, čo potvrdzujú príklady predchádzajúcich aplikácií (Corominas, Moya 2010; Fantucci, Sorriso-Valvo 1999; Krąpiec, Margielewski 2000). Rastová dekoncentrovanosť je tendencia stromu vytvárať širšie ročné prírastky na jednej strane kmeňa. Nastáva vtedy, keď je intenzita rastu v obvode kmeňa nerovnomerná. Dekoncentricita je spôsobená menším mechanickým namáhaním v naklonenom kmeni, kde pôsobenie gravitácie spôsobuje zvýšený rast spodnej stlačenej časti kmeňa u ihličnatých drevín (napr. smrek) a hornej stlačenej časti u listnatých drevín (Schweingruber 2007).

Aplikácia dekoncentrácie rastu stromov na analýzu zosuvnej činnosti a zosuvného nebezpečenstva sa dočkala patentovania a implementácie na Sliezskej univerzite. Vznikli tu dva patenty:

- [1] Malik I., Wistuba M., 2018. Sposób określania aktywności osuwiskowej gruntów. Patent nr 229425 udzielony przez Urząd Patentowy Rzeczypospolitej Polskiej na rzecz Uniwersytetu Śląskiego w Katowicach. Zakres terytorialny ochrony patentowej: Polska
- [2] Malik I., Wistuba M., Krąpiec M., 2023. Sposób identyfikacji ryzyka katastrofalnego osuwania. Patent nr 242514 udzielony przez Urząd Patentowy Rzeczypospolitej Polskiej na rzecz Uniwersytetu Śląskiego w Katowicach i Laboratorium Datowań Bezwzględnych Marek Krąpiec. Zakres terytorialny ochrony patentowej: Polska

Aplikácia patentov umožňuje analyzovať zosuvnú činnosť pomocou dekoncentrovaného rastu stromov a identifikovať riziko zosuvnej katastrofy. Na analýzu zosuvnej činnosti a odhad rizika zosuvnej katastrofy by sa mal použiť algoritmus vyvinutý na Sliezskej univerzite. Na začiatku by sa malo vybrať minimálne 20 stromov na svahu, na ktorom sa chce posúdiť riziko zosuvu,

na odber vzoriek. Stromy by mali byť čo najzdravšie a ich kmene by nemali byť poranené. Z každého stromu by sa mali odobrať dva vrty pomocou štandardného prírastkového vrtáka (priemer 4 mm). Dvojice vrtov sa odoberajú v prsnej výške, v jednej osi, v línii so svahom. Použitý postup odberu vzoriek by mal poskytnúť údaje o šírke ročných prírastkov na hornej a dolnej strane kmeňov stromov. Odber vzoriek by sa mal vykonávať pokiaľ možno na celej ploche zosuvu, z geomorfologicky rôznych miest (z dutinovej niky, zo svahu).

Po prevoze vzoriek do laboratória sa zmeria šírka ročných prírastkov (najlepšie pomocou meracej stanice LinTab so softvérom TSAPWin Professional 4.65, presnosť 0,01 mm) na hornej a dolnej strane kmeňov. Údaje pre jednotlivé stromy sa porovnávajú a transformujú na index dekoncentrácie ročného prírastku a jeho ročnej variácie pomocou nasledujúcich vzorcov (obrázok 2):

$E_x = U_x - D_x$; ak:

$E_x > 0$: zo strany svahu dekoncentrácia; [1] $E_{ix} = (E_x / D_x) \times 100\% > 0$; [2a]

$E_x = 0$: žiadna dekoncentrácia; $E_{ix} = E_x \text{ [mm]} = 0$; [2b]

$E_x < 0$: od strany svahu dekoncentrácia; $E_{ix} = (E_x / U_x) \times 100\% < 0$; [2c]

$vE_{ix} = E_{ix} - E_{ix-1}$; [3]

Kde: U - šírka ročného prírastku kmeňa zo strany svahu [mm];

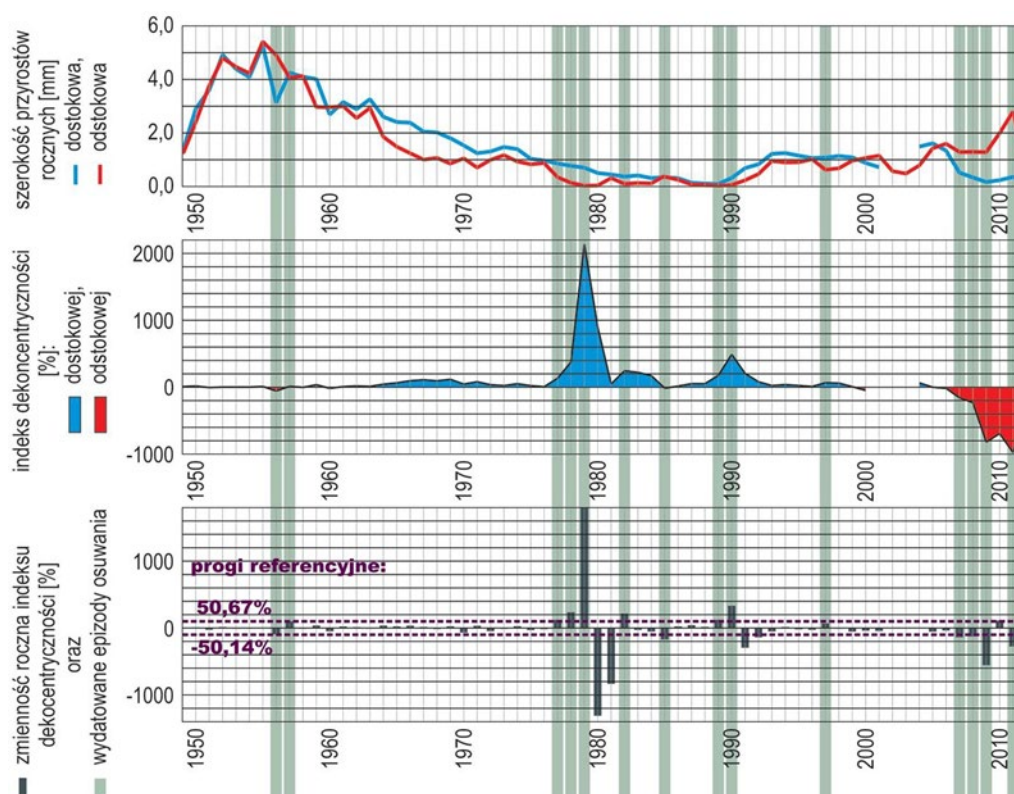
D - šírka ročného prírastku kmeňa od strany svahu [mm];

E - dekoncentrácia ročného prírastku [mm];

E_i - ročný index dekoncentrácie prírastku [%];

vE_i - ročná variabilita indexu [%];

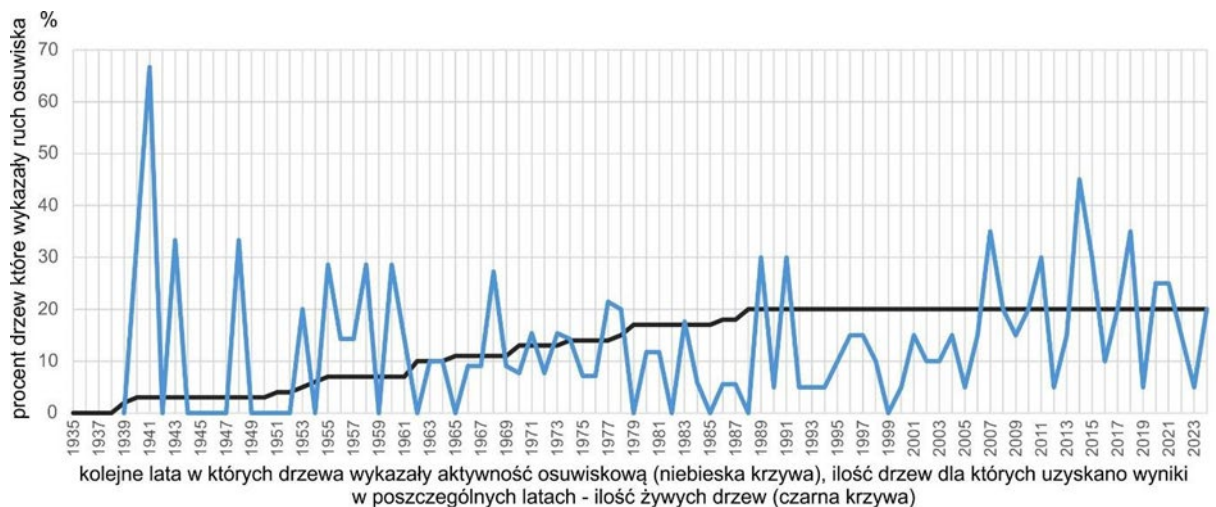
x - rok (ročný prírastok).



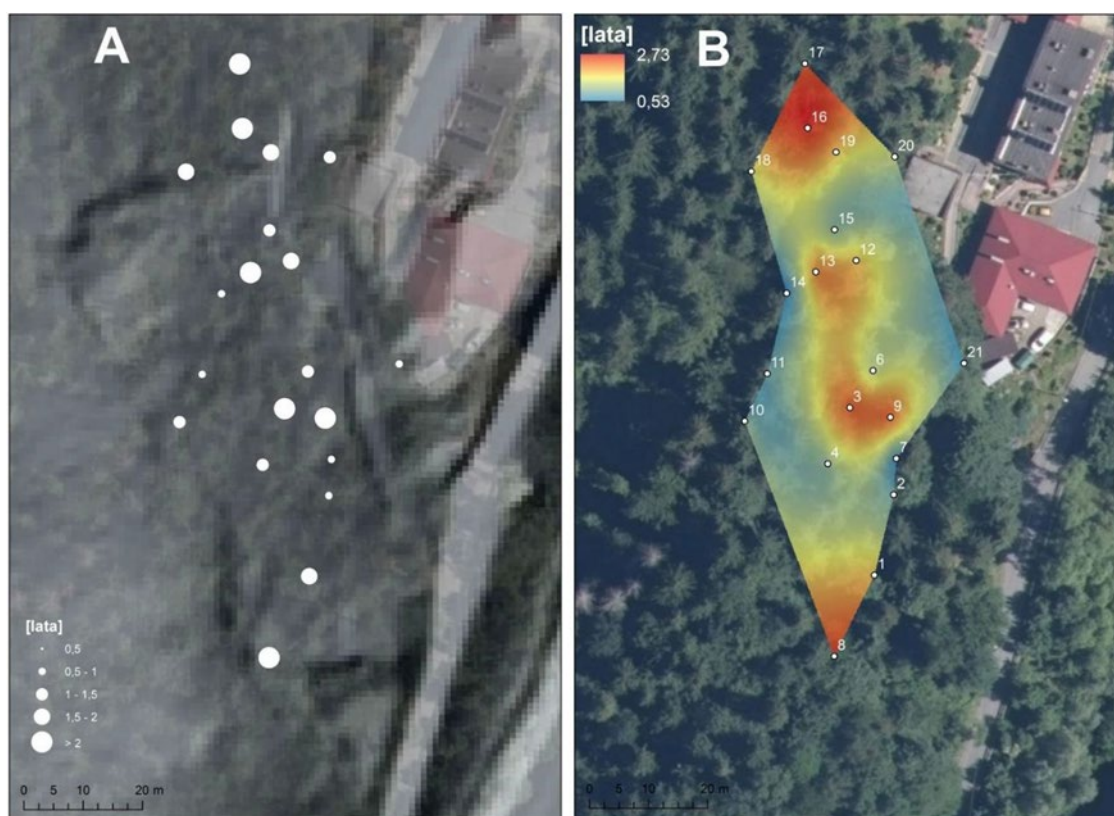
Obrázok 1. Príklad datovania zosuvu zaznamenaného v jednom kmeni smreka obyčajného: šírka prírastku [mm] transformovaná na index dekoncentrickosti [%], jeho ročná variácia [%] a datovanie na základe referenčných prahov.

Datovanie zosuvných epizód na svahu sa vykonáva na základe indexu ročnej variability indexu dekoncentrickosti a prahových hodnôt variability indexu dekoncentrickosti vypočítaných pre referenčnú lokalitu. Na tento účel sa musia odobrať aj vzorky stromov rastúcich na referenčnom svahu alebo nachádzajúcich sa mimo zosuvu. Tieto stromy by mali rásť v podobnej nadmorskej výške ako stromy odobraté na zosuve a mali by tiež predstavovať rovnaké druhy. Referenčných stromov by malo byť najmenej 10. Celý postup odberu vzoriek, merania ročných prírastkov a výpočtu indexu dekoncentrickosti sa vzťahuje aj na referenčné stromy. Referenčné prahové hodnoty sa vypočítajú ako súčty aritmetických priemerov a štandardných odchýlok pre celkové výsledky 10 stromov. Môžu byť napríklad -50,14 % (pre odľahlé epizódy) a 50,67 % (pre prívodné epizódy). Postup datovania zosuvov na základe miery dekoncentrickosti rastu a referenčných prahov je podrobne opísaný v publikácii Pub: Wistuba, M., Malik, I. 2011. deconcentricity index of annual tree increments-a tool for identifying modern landslide movements. Po aplikácii algoritmu sa získa graf znázorňujúci zmeny zosuvnej aktivity na skúmanom svahu v po sebe nasledujúcich rokoch identifikované

dendrochronologickou metódou (obr. 1). Potom nasleduje príprava mapy aktivity zosuvov a z takto získaných výsledkov sa vytvorí interpolácia, t. j. mapa ohrozenia zosuvmi (obrázok 2).



Obrázok 2. Graf zobrazujúci zmeny zosuvnej aktivity na skúmanom svahu v nasledujúcich rokoch zistené dendrochronologickou metódou.



Obrázok 3. Počet zosuvov identifikovaných na skúmanom svahu za 10 rokov. (A - počet zosuvných epizód za 10 rokov, B - interpolácia počtu zosuvných epizód identifikovaných za 10 rokov.

b) Opis výhod a nevýhod dendrochronologickej metódy

Hlavnou výhodou dendrochronologickej metódy je, že je možné získať informácie o činnosti svahu na základe údajov o ročnom obrastaní za desiatky alebo dokonca stovky rokov dozadu. Žiadna iná tradičná metóda proti zosuvom neposkytuje možnosť odvodiť zosuvy na základe záznamov za niekoľko desiatok alebo stoviek rokov dozadu. Treba poznamenať, že dlhé sekvencie environmentálnych údajov umožňujú presnejšie rekonštrukcie minulého zosuvu a predovšetkým umožňujú jeho správnu predikciu. Všetky tradičné metódy zmiernovania zosuvov využívajú reťazce údajov, ktoré sa získavajú až po inštalácii zariadenia v oblasti zosuvu. To výrazne spomaľuje proces získavania výsledkov o činnosti zosuvu a tiež ho robí menej presným. Použitie dendrochronologickej metódy je jedinečné z hľadiska dĺžky získaných reťazcov. Ďalšou výhodou dendrochronologickej metódy je, že dokáže identifikovať riziko katastrofického odstránenia. Analýzou rastu stromov pred katastrofou zosuvu sa vytvoril model tvorby ročných prírastkov stromov pred katastrofou zosuvu. Ak sa podobný vzor objaví u stromov rastúcich na svahu, znamená to, že v budúcnosti hrozí rýchle odstránenie svahu, čo je obzvlášť nebezpečné pre infraštruktúru nachádzajúcu sa v ňom a pod ním. Ďalšou výhodou dendrochronologickej metódy je jej nízka cena v porovnaní s tradičnými metódami. Stanovenie sa dá vykonať za niekoľko tisíc zlotých, zatiaľ čo napríklad použitie inklinometrov stojí minimálne niekoľko tisíc zlotých. Medzi nevýhody dendrochronologickej metódy patrí jej pomerne nízke rozlíšenie. Výsledky o zosuvnej činnosti sa získavajú s ročným rozlíšením, ktoré sa získava pri vývoji stromu postupnými ročnými prírastkami. Zjavnou nevýhodou metódy je aj jej nepoužiteľnosť v odlesnených oblastiach. Metóda patrí medzi povrchové metódy monitorovania odlesňovania, čo ju v porovnaní s hĺbkovými metódami robí menej presnou.

c) Posúdenie vhodnosti použitia dendrochronologickej metódy

Dendrochronologická metóda môže pomôcť presnejšie odhadnúť riziko zosuvov. Spolu s ďalšími metódami používanými v rámci integrovanej aplikácie geoportálu môže poskytnúť lepšie výsledky nielen o aktivite zosuvov, ale aj o riziku spustenia zosuvov. Vzhľadom na to, že mnohé oblasti Poľska a Slovenska sú zalesnené, dendrochronologická metóda môže byť široko využívaná a aplikovaná na poľské a slovenské zosuvy. Osobitný význam má cena za vykonanie určenia nebezpečenstva zosuvov. V prípade dendrochronologickej metódy je cena za určenie obzvlášť priaznivá a vzhľadom na vysokú presnosť metódy by ju mali využívať miestne orgány nachádzajúce sa v oblasti podpory projektu, ale aj v iných oblastiach ohrozenia zosuvmi.

2. RADAROVÁ INTERFEROMETRIA

a) Technický opis protišmykovej metódy s teoretickými predpokladmi - radarová interferometria

Radarové snímky nadobudli význam v satelitnom diaľkovom prieskume Zeme koncom 70. rokov 20. storočia. Snímky získané pomocou radaru so syntetickou apertúrou (SAR) sú vynikajúcim nástrojom na mapovanie zemského povrchu a poskytujú cenné informácie o jeho fyzikálnych vlastnostiach, ako je topografia alebo morfológia. SAR je systém, ktorý využíva mikrovlnné žiarenie a v súčasnosti satelity vybavené anténami SAR pracujú na rôznych mikrovlnných vlnových dĺžkach, ako napr.:

- C - 5,3 GHz, 5 cm (napr. ERS, Envisat, Radarsat)
- L - 1,2 GHz, 25 cm (napr. J-ERS, ALOS)
- X - 10 GHz, 3 cm (napr. X-SAR)

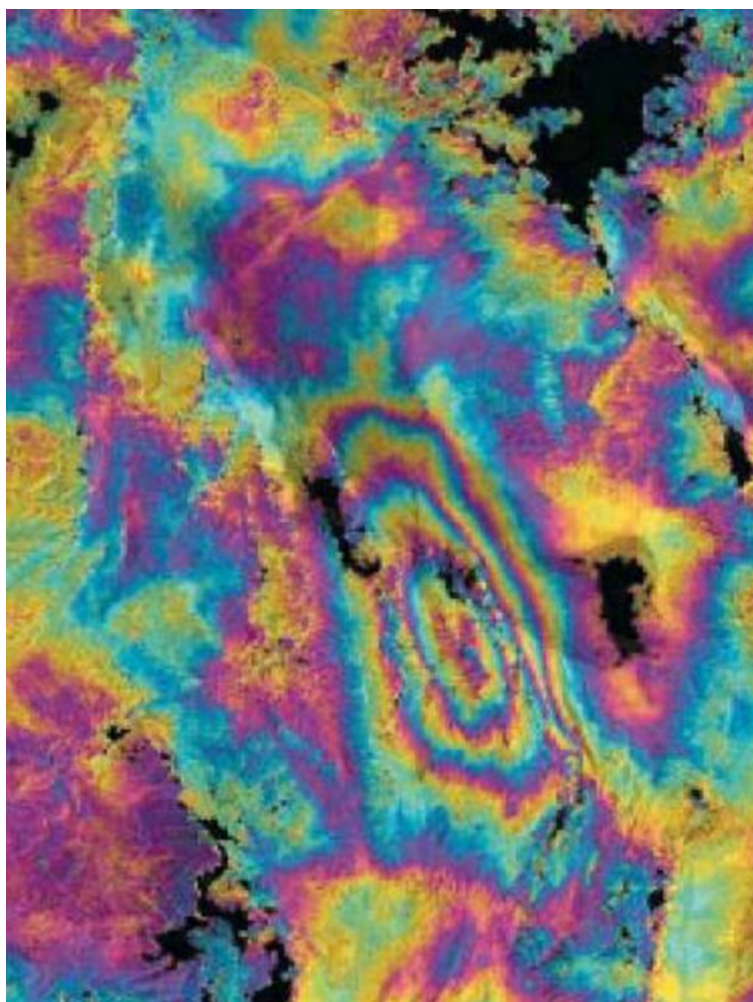
Mikrovlnné frekvencie umožňujú monitorovať vlastnosti zemského povrchu prakticky za všetkých poveternostných podmienok. Systém SAR je aktívny systém, ktorý umožňuje snímať počas dňa aj v noci. Družicová radarová interferometria (InSAR - Interferometric Synthetic Aperture Radar) si získala popularitu v 80. rokoch 20. storočia. Po vypustení družice ERS-1 Európskou vesmírnou agentúrou v roku 1991 sa radarová interferometria začala vďaka práci mnohých výskumníkov rýchlo rozvíjať. InSAR sa ukázal ako mimoriadne účinný nástroj na mapovanie zemského povrchu, ľadovcov a dokonca aj topografickej štruktúry morí (Mirek, 2013).

Digitálny obraz získaný zo zariadenia SAR obsahuje informácie o amplitúde a fáze odrazových bodov, ako sú skaly, budovy alebo vegetácia. Urbanizované oblasti a odkryté skaly sa vyznačujú vysokými hodnotami amplitúdy, zatiaľ čo rovné, hladké povrchy, ako napríklad pokojná voda, majú nízku amplitúdu. Fáza zase úzko súvisí so vzdialenosťou medzi pozorovanou oblasťou a družicou. Družicová radarová interferometria, známa ako InSAR (Synthetic Aperture Radar Interferometry), je technika, ktorá využíva rozdiely vo fázovom posune radarových signálov z dvoch snímok SAR (Perski, 2010). Spracovaním fázových rozdielov medzi snímkami získanými v rôznom čase z tej istej družice sa vytvorí jedno interferometrické mapovanie. Pri zaznamenávaní vln odrazených od zemského povrchu sa zbierajú údaje o intenzite odrazených vln (t. j. o miere ich pohltienia povrchom) a o fáze signálov, keď dosiahnu prijímač. Zmena fázy signálu na radarograme o celých 360° cyklu zodpovedá polovici vlnovej dĺžky signálu. V prípade satelitov, ako je ERS-1/2 alebo

ENVISAT, je vlnová dĺžka používaná prístrojom SAR 5,6 cm. Analýzou dvoch radarogramov zhotovených v rôznych časoch je možné určiť rozdiely vo fáze jednotlivých signálov.

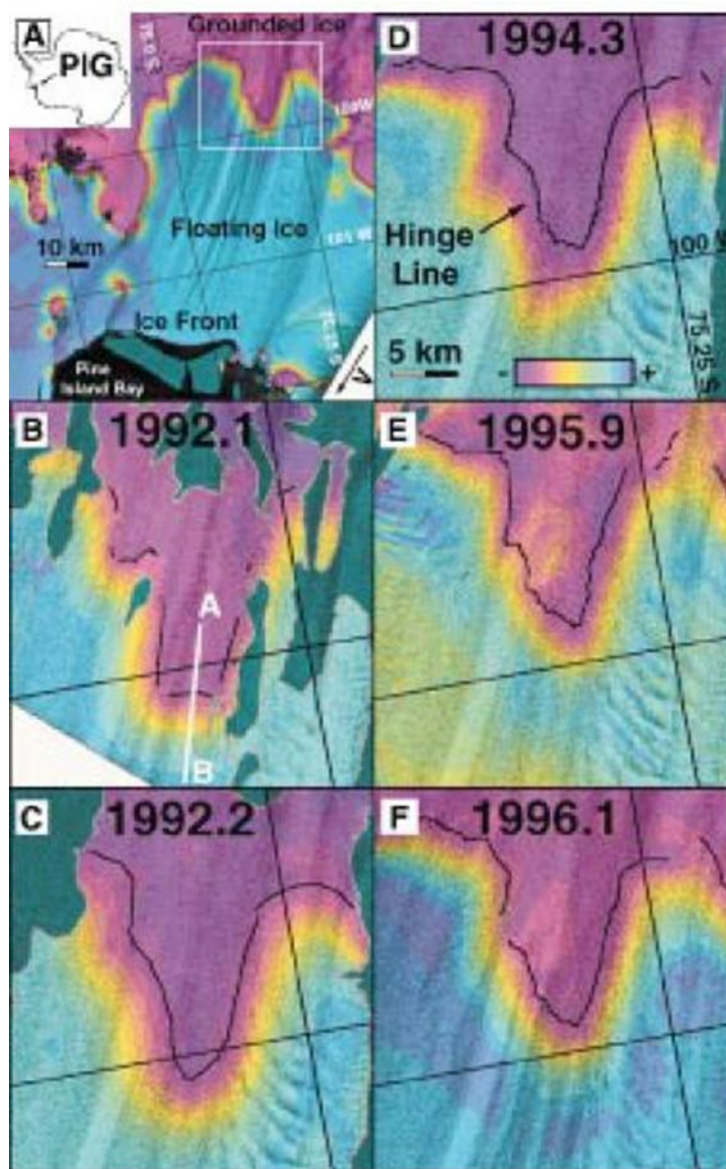
Výsledný interferenčný obraz z týchto dvoch radarogramov ukazuje zmeny vo výške terénu, pričom zmena fázy o celých 360° zodpovedá výškovému rozdielu 2,8 cm, čo odráža zmeny terénu v čase medzi jednotlivými záznamami.

Družicová radarová interferometria je technológia, ktorá našla široké uplatnenie v rôznych vedeckých oblastiach. Umožňuje vytvárať numerické modely terénu (NMT, v angličtine DEM) a monitorovať javy, ako sú zosuvy pôdy, ľadovce, záplavy a poklesy pôdy (Perski, 1999; Popiołek et al, 2007; Wojciechowski et al 2008; Graniczny et al, 2011; Szafarczyk, 2012; Przyłucka, Graniczny, 2015; Hejmanowski et al 2018). Využíva sa aj na štúdium prírodných javov a rastlinnej vegetácie (Kampes, 2006); (obr. 4,5,6).



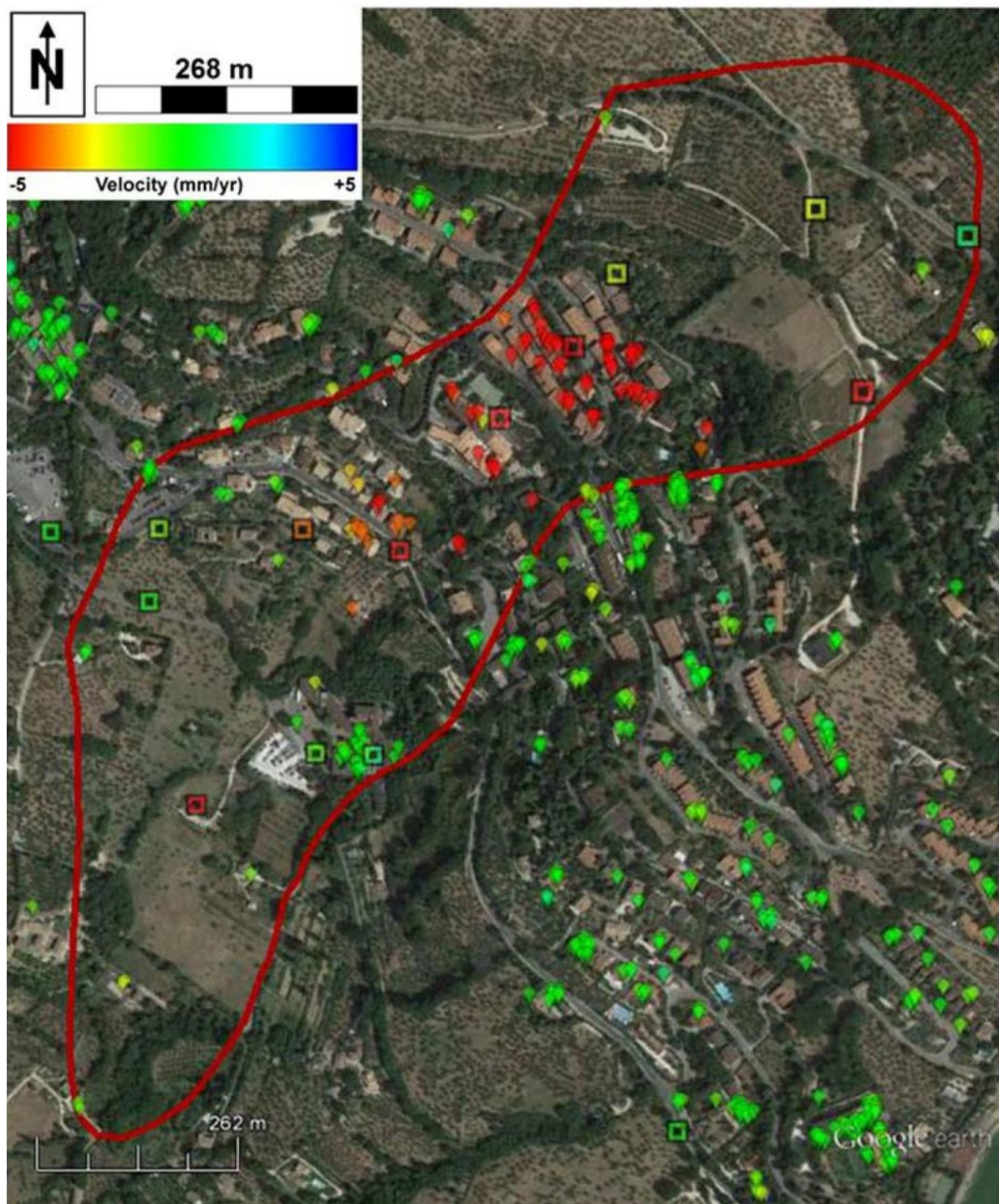
Obrázok 4: Poklesy pôdy spôsobené zemetrasením s magnitúdou $M = 6,3$ pozdĺž zlomu Eureka Valley v Kalifornii, interferometricky zobrazené pomocou ERS-1.

Zdroj: Kampes, B. M. (2006). Radar interferometry (Vol. 12). Dordrecht, Holandsko: Springer.



Obrázok 5. Časový rad znázorňujúci ústup ľadovca Pine Island, ako je vidieť na radarových snímkach.

Zdroj: Rosen, P. A., Hensley, S., Joughin, I. R., Li, F. K., Madsen, S. N., Rodriguez, E., & Goldstein, R. M. (2000). Synthetic aperture radar interferometry. *Proceedings of the IEEE*, 88(3), 333-382.



Obrázok 6: Rozdelenie priemerných rýchlostí získaných spracovaním údajov ENVISAT (bodky) a záznamov GNSS (štvrce). Farby symbolov reprezentujú rýchlosti (horná časť obrázku). Hranice zosuvov sú znázornené červenou farbou.

Zdroj: Wasowski, J., & Bovenga, F. (2014). Skúmanie zosuvov a nestabilných svahov pomocou satelitnej viacčasovej interferometrie: Súčasné problémy a perspektívy do budúcnosti. *Engineering Geology*, 174, 103-138.

Technika satelitnej radarovej interferometrie sa neustále vyvíja, pričom mimoriadne populárna je metóda PSInSAR (Permanent Scatterer Interferometry). Cieľom vývojárov tejto techniky bolo vyriešiť problémy s geometrickou a časovou dekoreláciou, ktoré viedli k izolovaným oblastiam koherentnej fázy obklopeným oblasťami úplne bez koherencie. PSInSAR využíva veľký počet snímok, čím znižuje negatívny vplyv atmosférických podmienok na kvalitu zaznamenaných snímok. Jednou z nesporných výhod techniky PSInSAR je jej schopnosť merať posuny s presnosťou na milimetre. Kľúčovú úlohu v tejto metóde zohrávajú koherentné odrazové body (Permanent Scatterers, PS), ktoré sú viditeľné na všetkých zaznamenaných snímkach. Zvyčajne zodpovedajú objektom, ako sú budovy, komunikačná a priemyselná infraštruktúra a prírodné prvky zemského povrchu, napríklad geologické odkryvy. Použitie koherentných odrazových bodov v PSInSAR umožňuje vykonávať merania na konkrétnych miestach, čím sa líši od klasickej interferometrie. Hustota bodov PS závisí od vlastností skúmanej oblasti. V oblastiach s intenzívnou urbanizáciou môže byť hustota bodov PS veľmi vysoká (aj viac ako 100 PS/km²), zatiaľ čo v poľnohospodárskych oblastiach sa vyskytujú oveľa menej (Mirek, 2013).

b) Opis výhod a nevýhod radarovej interferometrie

Radarová interferometria je najmodernejšia metóda analýzy nebezpečenstva zosuvov s veľmi vysokým potenciálom. Umožňuje detekciu aj tých najmenších zosuvných pohybov, ktoré spôsobujú milimetrové posuny objektov. Rozlišovacia schopnosť metódy, ktorá závisí od frekvencie snímok získaných zo satelitov, je tiež vysoká. Pomocou radarovej interferometrie možno získať pomerne dlhé sekvencie údajov, ktoré sa datujú od začiatku roku 2000. Výsledky získané pre zosuv umožňujú odhadnúť rýchlosť jeho pohybu, čo má zase veľký potenciál na odhad rizika zosuvnej katastrofy. Medzi nevýhody metódy patrí, samozrejme, vysoká miera komplikovanosti a ťažkosti s interpretáciou po získaní výsledkov. Jej aplikácia si vyžaduje špecializované znalosti, jej výhodou však je, že si nevyžaduje inštaláciu drahého zariadenia v teréne. Celú analýzu možno vykonať bez návštevy zosuvného územia v teréne. Odporúča sa však oboznámiť sa s terénnymi podmienkami, potom je interpretácia výsledkov získaných pomocou radarovej interferometrie úplnejšia. Táto metóda ako jedna z mála poskytuje údaje o zosuvnej činnosti v minulosti, čím sa spresňuje odhad nebezpečenstva zosuvov. Nevýhodou metódy je, že ide o povrchovú metódu a zobrazuje pohyb bodov na povrchu zosuvu, ktorý nie vždy súvisí so zosuvmi, niekedy sa môže zobrazovať napríklad plazivosť alebo pokles pôdy. Na druhej strane metóda umožňuje sledovať pohyb v rôznych smeroch, ako aj analýzu

vertikálnej zložky, čo ju robí užitočnou na monitorovanie veľkých rozsiahlych zosuvov, najmä rotačných zosuvov, ktoré sa pohybujú v rôznych smeroch a terén v nich sa na niektorých miestach dvíha a na iných znižuje. Radarová interferometria sa nedá použiť všade; v úzkych údoliach alebo v zalesnených oblastiach je ťažké nájsť miesta, ktoré môžu slúžiť ako referenčné body pri porovnávaní po sebe idúcich radarových snímok.

c) Posúdenie vhodnosti použitia radarovej interferometrie

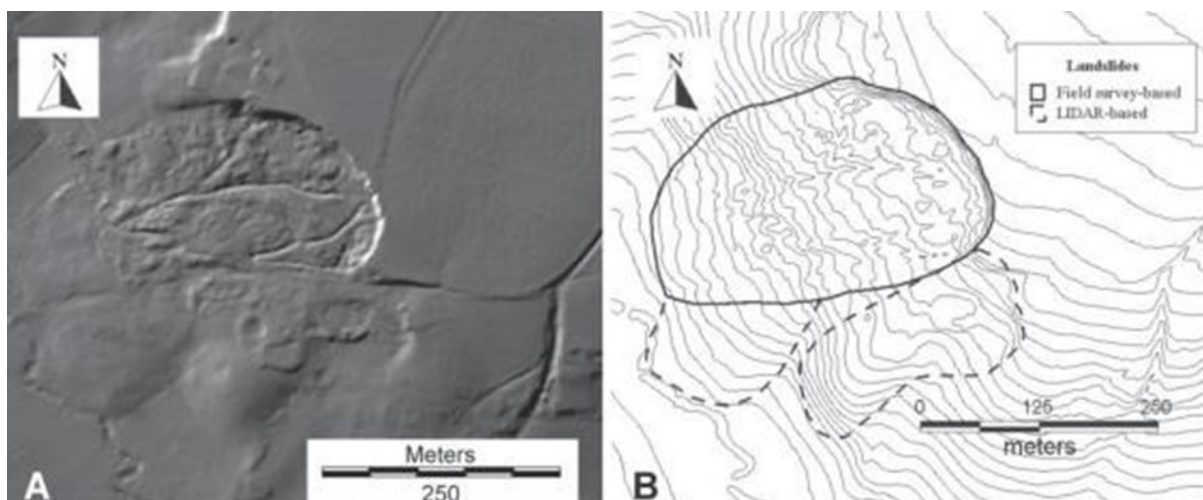
Radarovú interferometriu možno úspešne použiť v oblasti poľských a slovenských hôr, v skutočnosti sú príklady takýchto aplikácií čoraz častejšie. Stále však ide o metódu, ktorá je náročná na interpretáciu a pomerne neznáma. Je potrebné sa pokúsiť o jej popularizáciu v rámci činnosti jednotiek zodpovedných za analýzu nebezpečenstva zosuvov. Treba poznamenať, že výsledky, ktoré možno získať pomocou interferometrie, sú veľmi presné a čas na vypracovanie výsledkov je relatívne krátky, čo ponúka možnosť rýchlo reagovať na možné zosuvné nebezpečenstvo. Je ťažké určiť cenu štúdie zahŕňajúcej použitie radarovej interferometrie na posúdenie nebezpečenstva zosuvov. Na trhu nie je vzhľadom na novosť metódy cena stabilizovaná. Miestne orgány sú ochotné používať skôr tradičné technické metódy na stabilizáciu a ochranu zosuvov, preto je dopyt po analýze s využitím radarovej interferometrie veľmi malý.

3. LASEROVÉ SKENOVANIE

a) Technický opis metódy proti sklznutiu s teoretickými predpokladmi - laserový skener

Činnosť laserového skenera, známeho aj ako LiDAR (Light Detection And Ranging - detekcia a meranie svetla), je založená na presnom meraní vzdialenosti medzi zariadením a skúmaným objektom. Tento proces zahŕňa meranie času, ktorý uplynie medzi vyslaním laserového lúča a jeho návratom do skenera po odraze od povrchu. Na základe znalosti rýchlosti šírenia elektromagnetických vĺn a nameraného času možno presne vypočítať vzdialenosť objektu od zariadenia. Skener zaznamenáva aj uhol, pod ktorým je laserový lúč vyslaný. Tieto získané údaje - vzdialenosť a uhol vychýlenia každého impulzu - umožňujú určiť priestorové súradnice XYZ bodov, ktoré tvoria tzv. mračno bodov v lokálnom systéme skenera (Graniczny et al, 2012; Wojciechowski, et al 2012; Cebulski, 2015; Przyłucka, Klimkowska, 2016). Napríklad skener Riegl VZ 4000 generuje impozantných 220 000 bodov za sekundu. V kombinácii s GPS Trimble R4 RTK sú každému z týchto bodov priradené presné zemepisné súradnice. Z výsledného mračna bodov sa generujú modely terénu zobrazujúce modely zosuvov s vysokou presnosťou (obr. 7, 8).

Veľmi často používaným algoritmom je metóda analýzy dvojíc bodov z po sebe idúcich "mračien bodov" na výpočet vektora posunutia vybraných charakteristických prvkov, ako je napríklad kmeň stromu alebo balvan, v ktorejkoľvek časti zosuvu. Táto technika je pomerne jednoduchá na použitie, ale má svoje významné obmedzenia. Oblasti bez takzvaných "charakteristických prvkov" nemožno monitorovať a ich nadbytok môže viesť k ťažkostiam pri identifikácii správnych prvkov, ktoré sa majú porovnávať. Vedecký výskum zosuvov, ktorý vykonávajú popredné pracoviská na celom svete, sa zameriava na kvantitatívne, numerické znázornenie zosuvných procesov. Čoraz viac sa upúšťa od tradičných deskriptívnych metód v prospech štatistického prístupu. V tomto kontexte predložená metóda dokonale zapadá do súčasných trendov (Cebulski, 2015).



Obrázok 7. (A) - Výrez z mapy získaný pomocou údajov LIDAR, na ktorom je zobrazený aktívny rotačný zosuv so zakriveným hlavným svahom (B) - Výrez z vrstevnicovej mapy získaný pomocou LIDAR.

Zdroj: Eeckhaut, M. V. D., Poesen, J., Verstraeten, G., Vanacker, V., Nyssen, J., Moeyersons, J., ... & Vandekerckhove, L. (2007). Use of LIDAR-derived images for mapping old landslides under forest. *Earth Surface Processes and Landforms*, 32(5), 754-769.



Rycina 8. Model terenu osuwiska oparty na danych LIDAR.

Žródło: Jaboyedoff, M., Abellán, A., Carrea, D., Derron, M. H., Matasci, B., & Michoud, C. (2018). Mapping and monitoring of landslides using LiDAR. In *Natural Hazards* (pp. 397-420). CRC Press.

b) Opis výhod a nevýhod laserového skenovania

Medzi najdôležitejšie výhody laserového skenovania patrí mimoriadne vysoká presnosť metódy s využitím moderného GPS, ktorá dosahuje presnosť 2 cm, a rýchlosť pri zhromažďovaní obrovského množstva priestorových údajov, až niekoľko stoviek miliónov bodov. Ďalšou výhodou je vysoká rýchlosť získavania výsledkov z terénnych meraní. Ďalšou výhodou je, že skenovanie sa môže kedykoľvek opakovať a metóda nie je závislá od externých zdrojov, ako napríklad radarová interferometria, ktorá je založená na radarových snímkach. Napriek mnohým výhodám má táto metóda aj nevýhody. Oblasti bez charakteristických prvkov, ako sú kmene stromov alebo balvany, a oblasti s ich nadbytkom sú nevhodné na monitorovanie zosuvnej činnosti pomocou tejto techniky. Najväčšou nevýhodou metódy je však nutnosť čakať na výsledky prvého použitia metódy. Až následné naskenované snímky povrchu zosuvu môžu odhaliť posuny. To znamená, že k odhadu dynamiky zosuvu dochádza až po relatívne dlhom čase. Ak sa použije laserové skenovanie, napríklad štyrikrát v jednom roku, záver o pohybe zosuvu sa vzťahuje len na daný rok, zatiaľ čo použitie radarovej interferometrie alebo dendochronologickej metódy umožňuje použiť sekvencie údajov pokrývajúce desiatky alebo dokonca stovky rokov ako v prípade dendochronologickej metódy. Obraz aktivity zosuvu získaný laserovým skenovaním za jeden rok môže byť skreslený, môže sa vyskytnúť rok, v ktorom je zosuv neaktívny, napr. v dôsledku menšieho množstva zrážok, zatiaľ čo zosuv je aktívny už desiatky rokov.

c) Posúdenie vhodnosti použitia laserového skenovania

Laserové skenovanie je užitočná metóda, keď je potrebné získať presnú mapu tvaru terénu v zosuve. Takýto model terénu sa môže použiť rôznymi spôsobmi v následných štúdiách. Na posúdenie aktivity zosuvov a nebezpečenstva zosuvov však metóda laserového skenovania nie je najlepším riešením. Je totiž potrebné počkať určitý čas po prvom meraní a potom vykonať ďalšie meranie, aby sa získali informácie o zmenách v rezaní zosuvného územia, t. j. o jeho aktivite. Takýto prístup neumožňuje reálne a predovšetkým rýchle posúdenie nebezpečenstva zosuvu. Laserové skenovanie splnilo svoju veľmi dôležitú úlohu pri mapovaní zemského povrchu v Poľsku a na Slovensku počas skenovacích náletov. Tieto nálety umožnili vytvoriť numerické modely terénu s veľmi vysokou presnosťou. Vďaka nim je možné bezchybne zakresliť hranice zosuvov, ktoré sa vyskytujú v Poľsku a na Slovensku.

d) Prínosy inovatívnych metód prevencie zosuvov pre miestne orgány pôsobiace v podporovanej oblasti

Moderné metódy v oblasti prevencie zosuvov sa určite nevyužívajú v takej miere ako tradičné metódy. Spomedzi moderných metód stojí za zmienku najmä radarová interferometria a dendrochronologická metóda. Aplikácia týchto metód umožňuje nielen monitorovanie zosuvov, ale mala by umožniť aj identifikáciu zón, v ktorých môže dôjsť k zosuvom počas intenzívnych zrážok. Často oblasti susediace so zosuvmi, ktoré susedia so zosuvmi, sú náchylné na zosuvy, napriek tomu, že nie sú postihnuté zosuvmi. Hlavnou výhodou radarovej interferometrie aj dendrochronologickej metódy je, že nebezpečenstvo zosuvov možno odvodiť zo sekvencií údajov z minulosti. Pri všetkých ostatných metódach sa na výsledky odhadu nebezpečenstva zosuvov musí čakať a získavajú sa až po analýze založenej väčšinou na inštalácii zariadení v teréne. Výhodou interferometrickej metódy je okrem toho jej vysoké rozlíšenie, ktoré poskytuje dobrý základ na odvodenie zosuvnej činnosti v budúcnosti. Na druhej strane dendrochronologická metóda umožňuje vytvoriť veľmi dlhé sekvencie údajov siahajúce do minulosti, ale s relatívne nízkym rozlíšením, a je to tiež relatívne lacná metóda. V súčasnosti sa zdá, že použitie týchto dvoch metód, radarovej interferometrie a dendrochronológie, poskytuje najlepší základ pre odhad nebezpečenstva zosuvov. Všetky ostatné metódy sú veľmi "statické" a pri ich použití treba čakať na výsledky, ktoré si vyžadujú časovo náročné pozorovania. Ani po niekoľkých rokoch pozorovaní nemusia získané výsledky poskytnúť úplný obraz o nebezpečenstve zosuvov.

LITERATÚRA

Butler D. R., 1987, Teaching general principles and applications of dendrogeomorphology, J. Geol. Ed., 35, s. 64–70.

Braam R. R., Weiss E. E. J., Burrough, P. A., 1987 a, Dendrogeomorphological analysis of mass movement a technical note on the research method, Catena Supplement, 9, s. 585–589.

Cebulski, J. (2015). Naziemny skaning laserowy jako narzędzie do określenia aktywności osuwiska. Prace Studenckiego Koła Naukowego Geografów Uniwersytetu Pedagogicznego w Krakowie (2012-2018), (4).

Corominas J., Moya J., 2010, Contribution of dendrochronology to the determination of magnitude-frequency relationships for landslides, Geomorphology, 124, s. 137–149.

Eeckhaut, M. V. D., Poesen, J., Verstraeten, G., Vanacker, V., Nyssen, J., Moeyersons, J., ... & Vandekerckhove, L. (2007). Use of LIDAR-derived images for mapping old landslides under forest. Earth Surface Processes and Landforms, 32(5), 754-769.

Fantucci R., Sorriso-Valvo M., 1999, Dendrogeomorphological analysis of a slope near Lago Calabria (Italy), Geomorphology, 30, s. 165–174.

Graniczny, M., Bovenga, F., Kowalski, Z., Perski, Z., Piątkowska, A., Surała, M., ... & Zdanowski, A. (2011). Problematyka wykorzystania interferometrii satelitarnej w badaniach geologicznych. Biuletyn Państwowego Instytutu Geologicznego.

Graniczny, M., Kamiński, M., Piątkowska, A., & Surała, M. (2012). ARTYKUŁY NAUKOWE Wykorzystanie lotniczego skaningu laserowego do inwentaryzacji i monitoringu osuwiska w rejonie Łańcicy (gmina Lanckorona), Pogórze Wielickie, Karpaty zewnętrzne. Przegląd Geologiczny, 60(2), 89-94.

Hejmanowski, R., Malinowska, A., Witkowski, W., & Guzy, A. (2018). Pomiar przemieszczeń wywołanych wstrząsem górniczym przy zastosowaniu satelitarnej interferometrii radarowej InSAR. Przegląd Górniczy, 74.

Jaboyedoff, M., Abellán, A., Carrea, D., Derron, M. H., Matasci, B., & Michoud, C. (2018). Mapping and monitoring of landslides using LiDAR. In *Natural Hazards* (pp. 397-420). CRC Press.

Kampes, B. M. (2006). *Radar interferometry* (Vol. 12). Dordrecht, The Netherlands: Springer.

Krąpiec M., Margielewski W., 2000, Analiza dendrogeomorfologiczna ruchów masowych na obszarze polskich Karpat fliszowych, *Kwart. AGH, Geologia*, 26, 2, s. 141–171.

Mirek, K. (2013). Związek występowania sejsmiczności indukowanej z osiadaniem powierzchni terenu określonym techniką PSInSAR. *Przegląd Górniczy*, 69(6), 44-50.

Perski, Z. (1999). Osiadania terenu GZW pod wpływem eksploatacji podziemnej określane za pomocą satelitarnej interferometrii radarowej (InSAR). *Przegląd Geologiczny*, 47(2), 171-174.

Perski, Z. (2010). Satelitarna interferometria radarowa InSAR i PSInSAR.

Popiołek, E., Krawczyk, A., & Sopata, P. (2007). Wykorzystanie metody InSAR w monitoringu i prognozowaniu deformacji powierzchni terenu. *Zeszyty Naukowe. Górnictwo/Politechnika Śląska*, (278), 395-404.

Perski, Z., Krawczyk, A., & Marinković, P. (2008). Satelitarna interferometria radarowa (InSAR) wysokiej rozdzielczości z wykorzystaniem danych TerraSAR-X. *Archiwum Fotogrametrii, Kartografii i Teledetekcji*, 18, 499-507.

Przyłucka, M., & Graniczny, M. (2015). Kompleksowe wykorzystanie przetworzeń DInSAR i PSInSAR w badaniu pionowych przemieszczeń terenu w wybranych rejonach GOP. *Przegląd Górniczy*, 71(3), 80-88.

Przyłucka, M., & Klimkowska, A. (2016). Fotogrametria bliskiego zasięgu i skaning laserowy jako metody monitoringu zmian geodynamicznych na przykładzie skarpy w Płocku. *Przegląd Geologiczny*, 64(7), 504-512.

Rosen, P. A., Hensley, S., Joughin, I. R., Li, F. K., Madsen, S. N., Rodriguez, E., & Goldstein, R. M. (2000). Synthetic aperture radar interferometry. *Proceedings of the IEEE*, 88(3), 333-382.

Schweingruber F. H., 1996, Tree rings and Environment. Dendroecology, Swiss Federal Institute for Forests, Snow and Landscape Research, WSL/FNP Birmensdorf, Paul Haupt Publishers Berne, Stuttgart, Vienna.

Szafarczyk, A. (2012). Możliwości wykorzystania naziemnej interferometrii radarowej w monitoringu osuwisk. Infrastruktura i Ekologia Terenów Wiejskich, (2/II).

Wasowski, J., & Bovenga, F. (2014). Investigating landslides and unstable slopes with satellite Multi Temporal Interferometry: Current issues and future perspectives. Engineering Geology, 174, 103-138.

Wistuba, M., & Malik, I. (2011). Indeks dekoncentryczności przyrostów rocznych drzew- narzędzie do identyfikacji współczesnych ruchów osuwiskowych.

Wojciechowski, T., Perski, Z., & Wójcik, A. (2008). Wykorzystanie satelitarnej interferometrii radarowej do badań osuwisk w polskiej części Karpat. Przegląd Geologiczny, 56(12), 1087-1091.

Wojciechowski, T., Borkowski, A., Perski, Z., & Wójcik, A. (2012). Dane lotniczego skaningu laserowego w badaniu osuwisk–przykład osuwiska w Zbyszycach (Karpaty zewnętrzne). Przegląd Geologiczny, 60(2), 95-102

Tento dokument vznikol pre účely projektu „Testovanie a zavádzanie moderných metód prevencie a boja proti následkom prírodných katastrof v čase klimatických zmien“ z programu „Interreg V-A PL-SK“ číslo PLSK.01.01-IP.01-0007/23,

v rámci: Úlohy 3 „Analýza štandardných a moderných metód prevencie prírodných katastrof v oblasti podpory“.

Všetky práva vyhradené. Úpravy tohto dokumentu sú dovoľené po dohode s autorom.