

Lidar: světlo, které odhaluje skrytou tvář krajiny

Lidar je metoda laserového skenování, která umožňuje tvorbu vysoce přesných 3D modelů povrchu Země. Od 60. let se jeho využití rozšířilo od meteorologie a kartografie až po archeologii, geologii a geomorfologii. S lidarem lze identifikovat sesuvy, erozní procesy, zlomy i antropogenní tvary a slouží také k modelování stability skalních útvarů. Princip jeho fungování a některá konkrétní použití přinášíme v tomto článku. Do budoucna se očekává rozšíření jeho možností díky kombinaci s metodami umělé inteligence a strojového učení, zejména při automatizované detekci rizikových jevů a sledování dlouhodobých změn krajiny.

Historie lidarů: od laboratorních experimentů k revoluci v mapování

Když dnes slyšíme o samořídících autech, chytrých robotech nebo o podrobných mapách krajiny, málokdo si uvědomí, že za nimi často stojí stejná technologie – lidar. Název vznikl z anglického Light Detection and Ranging, což v překladu znamená zjišťování vzdálenosti pomocí světla. Ačkoli se o něm začalo více mluvit teprve v posledních letech, lidar není žádná novinka – jeho kořeny sahají až do 60. let 20. století, tedy krátce po vynálezu laseru. První lidarové přístroje byly velmi drahé a pomáhaly hlavně meteorologům ke sledování oblačnosti a dalších atmosférických jevů. O něco později, v 70. a 80. letech, si našel cestu i do kartografie a geodézie, kde umožnil přesnější měření tvarů terénu než tradiční metody. S rozvojem počítačů a miniaturizací senzorů se jeho možnosti rychle rozšířily – od leteckého snímání až po tvorbu trojrozměrných map krajiny. V posledních 20 letech začíná lidar skutečný boom. Uplatnění našel v archeologii, kde díky přesnosti a pohledu z výšky dokáže odhalit zbytky staveb, hradišť apod. Velké využití má při ochraně přírody, umožňuje např. určit stav vegetace, odhalit suché stromy v rámci po-

rostu nebo počty a velikosti korun stromů. V neposlední řadě se uplatňuje i ve vývoji autonomních vozidel.

Princip fungování: světelná ozvěna v miliardách bodů

Princip lidarů je vlastně elegantně jednoduchý. Přístroj vyšle krátký laserový záblesk o vlnové délce 1 000 až 1 500 nm (infračervené spektrum) a čeká, až se odrazí od nějakého objektu zpět k senzoru. Podobně jako když voláme v jeskyni a posloucháme ozvěnu – jen místo zvukové vlny registrujeme světelnou. Protože rychlost světla známe s naprostou přesností, stačí změřit čas, za který se laserový paprsek vrátil zpět, z čehož je možné vypočítat vzdálenost k danému objektu. Lidar to zvládne ne jednou, ale hned tisíckrát až milionkrát za sekundu. Každý odražený světelný pulz se zaznamená jako jeden bod v prostoru. Pokud se poskládá milion naměřených bodů, vznikne mračno bodů (point cloud), které dokonale zachycuje tvar a strukturu okolního prostředí. Mračno bodů se pak zpracovává speciálními programy, kterými probíhá automatická či poloautomatická filtrace bodů, jejich klasifikace apod. Právě v klasifikaci, tedy zda jde o objekt na povrchu, nebo o vlast-

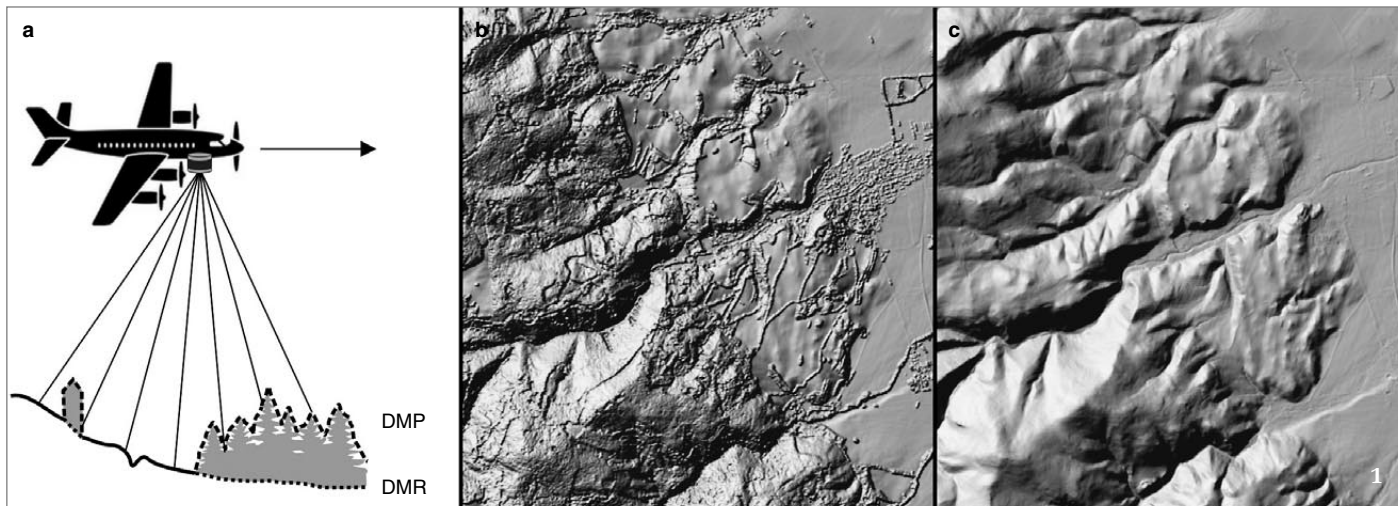
ní zemský povrch, tkví velká síla lidarů. Vzhledem k tomu, že každý bod v mračnu bodů má svou prostorovou 3D souřadnici, je možné naměřené body klasifikovat na základě vertikální souřadnice (nadmořské výšky) tak, že nejnižší hodnoty náležejí zemskému povrchu, vyšší hodnoty pak jednotlivým objektům na zemském povrchu. Ke zpřesnění se následně používají i hodnoty intenzity odrazu laserového paprsku a porovnání s leteckými snímky. Konečným výstupem zpracování dat jsou např. 3D modely budov, modely skalních stěn nebo třeba celých měst. Stejně tak se ze zpracovaných dat tvoří digitální mapy a modely zemského povrchu, které pomáhají geologům, urbanistům a inženýrům lépe chápat a plánovat prostor kolem nás.

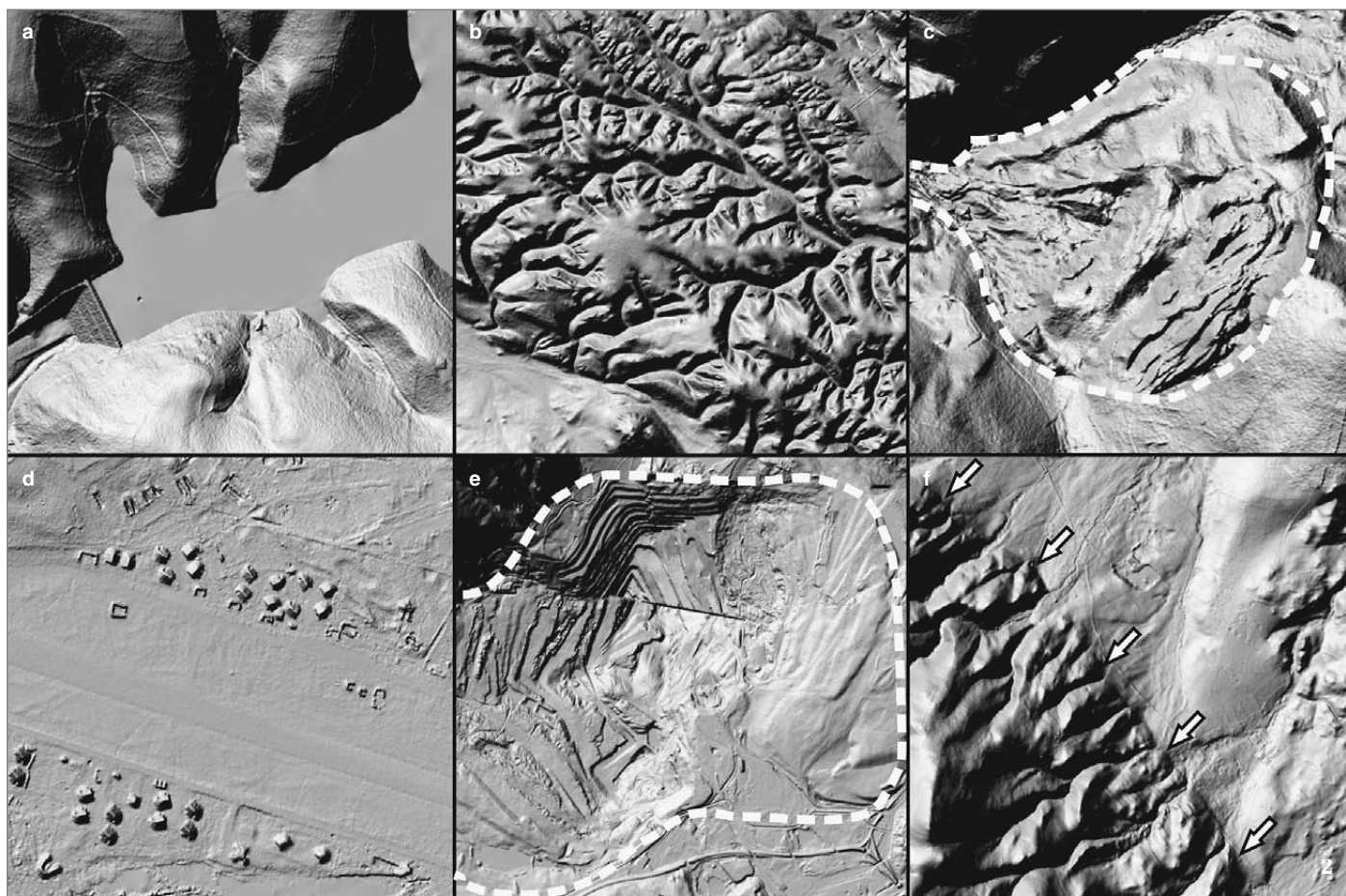
Typy lidarového měření:

ze vzduchu, ze země i za jízdy

Dnes existují tři hlavní způsoby, jak měřit pomocí lidarů. Každý z nich má své výhody a hodí se pro jiné účely. Nejrozšířenější je letecké laserové skenování (Airborne Laser Scanning – ALS). Lidarová jednotka se v tomto případě umístí na letadlo nebo – čím dál častěji – na drony. Pohybující se letadlo ale neletí během snímání konstantní rychlostí, ve stejné výšce a bez jakéhokoli náklonu. Naměřené body se proto následně musejí opravovat o údaje zaznamenané IMU (Inertial Measurement Unit), která pomocí gyroskopů a akcelerometrů zaznamenává polohu letadla, jeho rychlost a také podélný a příčný náklon. Díky tomu lze rychle zmapovat rozsáhlá území. Metoda slouží třeba při tvorbě digitálních modelů terénu, při sledování břehů řek a vymezení záplavových zón nebo při dokumentaci liniových staveb, jako jsou silnice, elektrická vedení a plynovody. Pokud je potřeba zaměřit menší a složitější objekty, používá se pozemní laserové skenování (Terrestrial Laser Scanning – TLS). Přístroj se nachází na stativu, odkud snímá okolí.

1 Princip leteckého laserového skenování (obr. a), kdy je z naměřeného mračna bodů vytvořen digitální model povrchu (DMP, b) a digitální model reliéfu (DMR, c). Výřez lidarů je situován do Rychlebských hor v okolí města Javorník. Zdroje: archiv autora (obr. a) a on-line aplikace Analýza výškopisu na webovém portálu Českého úřadu zeměměřického a katastrálního (b, c; <https://ags.cuzk.cz/av/>)





Využívá se např. k opakovanému sledování skálních stěn a sesuvů, kde je důležité zachytit i ty nejmenší změny v čase. Stejně tak se hodí v archeologii, architektuře nebo při dokumentaci složitých průmyslových provozů. Posledním typem je mobilní laserové skenování (Mobile Laser Scanning – MLS), kdy je lidar umístěn na pohyblivém vozidle. Hodí se pro mapování dopravního značení, budov, inženýrských sítí a dalších prvků městského prostředí.

Databáze pro vědu a praxi

Dnes už existuje řada databází s lidarovými daty – některé jsou volně dostupné, jiné placené – a každá slouží trochu jiným účelům. Nejčastěji se z těchto dat vytvářejí digitální modely reliéfu (DMR) nebo povrchu (DMP, obr. 1a), které vědcům i odborníkům poskytují cenné podklady pro výzkum různých území v různých měřítkách. V České republice spravuje základní databázi lidarových dat Český úřad zeměměřický a katastrální (ČÚZK). V letech 2009–13 bylo postupně celé naše území nasnímáno pomocí leteckého laserového skenování. Ze získaných dat vznikly, po jejich vyčištění a zpracování, hned tři modely: dva digitální modely reliéfu (DMR 4g a DMR 5g) a jeden digitální model povrchu (DMP 1g). Pro vědeckou práci to znamenalo obrovský krok kupředu. Do té doby se totiž analýzy prováděly především na základě vrstevnic z topografických map, které neposkytovaly takovou přesnost a nedokázaly věrně zachytit jemné detaily terénu. DMR 4g byl vytvořen na základě mračna bodů „zředěného“ do pravidelné sítě 5 × 5 m. V odkrytém terénu dosahuje výškové přesnosti 0,3 m a v lesnatém terénu 1 m. Naproti tomu přesnější DMR 5g byl vytvořen na základě nepravidelné troj-

úhelníkové sítě s proměnným množstvím bodů na 1 m² a výškovou přesností 0,18 m v odkrytém terénu a 0,3 m v lesnatém.

Konkrétní příklad uvádějí obr. 1b a 1c, kde je dobře patrný rozdíl mezi DMP 1g a DMR 4g. Digitální model povrchu zachycuje vše, co se na zemském povrchu nachází – domy, stromy, silnice i lesy. Naproti tomu digitální model reliéfu ukazuje skutečný tvar terénu „očistěný“ od těchto objektů. Díky tomu jsou na modelu dobře patrné jednotlivé vrcholy kopců, svahy, terénní hrany i síť jednotlivých údolí.

Využití v geologii a geomorfologii: nový rozměr poznání Země

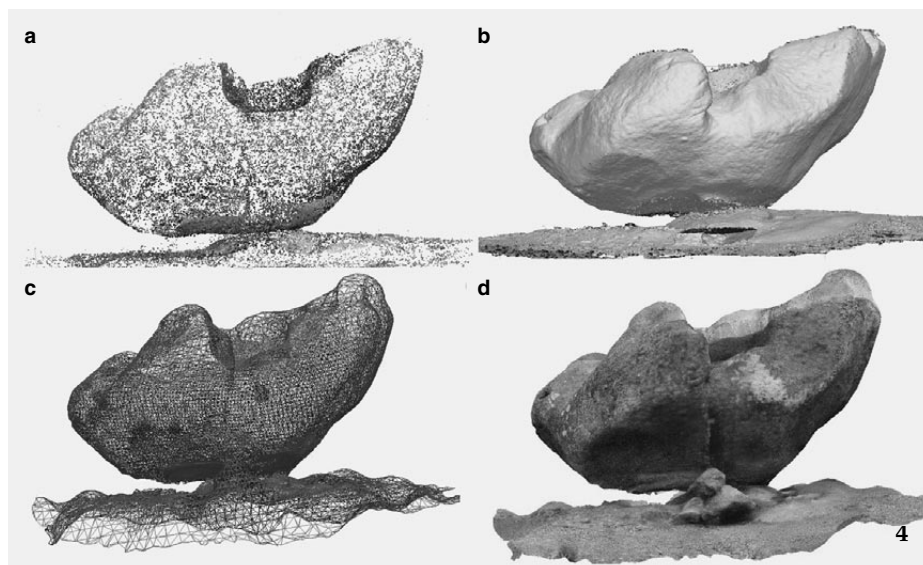
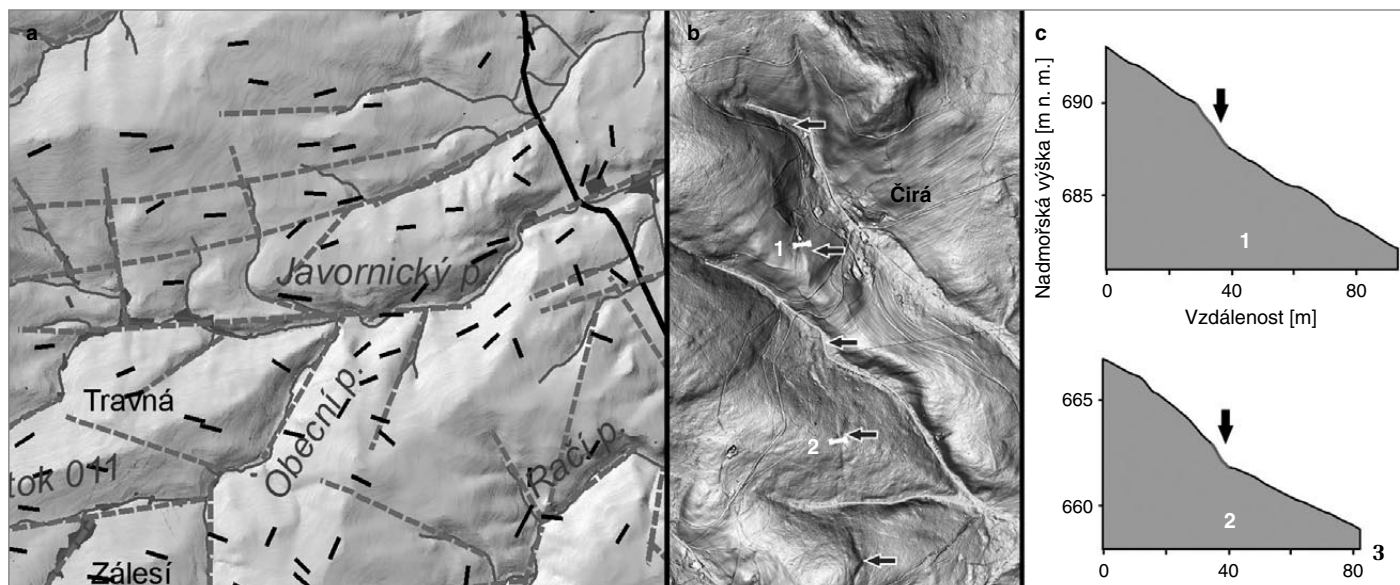
Jak jsme již zmínili, lidar dnes nachází uplatnění v řadě oborů. Díky schopnosti rychle a velmi podrobně zmapovat povrch Země, a to i v místech, kam se geologové a geomorfologové jinak dostávají jen obtížně, nabízí zcela nový pohled na tvar krajiny i na procesy, které ji formují. Dokáže odhalit i skryté struktury, které by jinak unikly pozornosti. Na rozdíl od tradičních metod vyžadujících často zdoluhavý terénní průzkum umožňuje lidar získat rozsáhlé soubory dat rychle, relativně levně a s vysokou přesností. Tyto informace pomáhají při studiu jevů, jako jsou sesuvy půdy, intenzita eroze, sopečná činnost, nebo umožňují v krajině nalézat stopy po dávných zemětřeseních. Dále se podíváme na některé příklady z geologie a geomorfologie, kde se z lidarů stal v posledních desetiletích nepostradatelný pomocník.

Příklady tvarů reliéfu, které lze na DMR 4g a DMR 5g vidět, přináší obr. 2. Na modelu hráze vodní nádrže Horka na Chebsku je dobře rozeznatelná hladina přehradní nádrže, strmé svahy spadající do přehra-

dy i drobné boční přítoky do přehradny (obr. 2a). Model reliéfu ukazuje i erozní rýhy a svahovou erozi na březích přehradní nádrže. Díky detailním modelům reliéfu vytvořeným z dat lidarů se dají simulovat např. povodňové scénáře či v kombinaci s hydrologickými modely předvídat, kde by při extrémních srážkách mohlo dojít k zaplavení. Na DMR 4g je zachycen velmi rozčleněný reliéf pískovcového skalního města Hradčanských stěn na Českolipsku (obr. 2b). Postupná eroze tu rozčleňuje původně plochou pískovcovou plošinu do systému drobných údolí a roklí. Následuje příklad aktivního sesuvného území – jedna z největších a nejkompexnějších svahových deformací v ČR, známá jako sesuv Čeřeníště (obr. 2c). Nalezneme ji asi 7 km severně od Litoměřic v Českém středohoří. Opakovaná lidarová měření zde umožňují sledovat rychlost a rozsah pohybů svahu. Získaná data se kombinují s geotechnickým průzkumem a poskytují spolehlivý podklad pro varovné systémy (např. Klímeš a kol. 2009 v oblasti Beskyd). Na digitálních mode-

2 Výběr některých tvarů zemského povrchu identifikovatelných na DMR 4g a DMR 5g. Detailně popsáno v textu
3 Vyhledávání nových zlomů na základě analýzy DMR. Blíže v textu
4 Model viklanu Husovy kazatelny. Prvotní bodové mračno (a), některé naměřené body patří vegetaci, která viklan obklopuje, klasifikované upravené zahuštěné bodové mračno (b), konstrukce vytvořená triangulací, „drátěný model“, který odráží skutečný tvar viklanu (c), a výsledný 3D model včetně originální textury – mech, skvrny na žulovém kameni (d). Z archivu J. Stemberka (obr. 2–4)

dy i drobné boční přítoky do přehradny (obr. 2a). Model reliéfu ukazuje i erozní rýhy a svahovou erozi na březích přehradní nádrže. Díky detailním modelům reliéfu vytvořeným z dat lidarů se dají simulovat např. povodňové scénáře či v kombinaci s hydrologickými modely předvídat, kde by při extrémních srážkách mohlo dojít k zaplavení. Na DMR 4g je zachycen velmi rozčleněný reliéf pískovcového skalního města Hradčanských stěn na Českolipsku (obr. 2b). Postupná eroze tu rozčleňuje původně plochou pískovcovou plošinu do systému drobných údolí a roklí. Následuje příklad aktivního sesuvného území – jedna z největších a nejkompexnějších svahových deformací v ČR, známá jako sesuv Čeřeníště (obr. 2c). Nalezneme ji asi 7 km severně od Litoměřic v Českém středohoří. Opakovaná lidarová měření zde umožňují sledovat rychlost a rozsah pohybů svahu. Získaná data se kombinují s geotechnickým průzkumem a poskytují spolehlivý podklad pro varovné systémy (např. Klímeš a kol. 2009 v oblasti Beskyd). Na digitálních mode-



lech reliéfu jsou také velmi dobře patrné antropogenní zemní tvary – třeba hangáry, tzv. úly, pro vojenská letadla na starém vojenském letišti Hradčany, Ralsko (obr. 2d). Stejně tak jsou vidět náspy letištní plochy a pojezdových letištních komunikací. DMR dále přibližuje reliéf povrchového dolu ČSA u Mostu v Podkrušnohoří (obr. 2e). Zřetelné jsou jednotlivé etáže lomu i navazující železniční náspy. A poslední část ukazuje, jak na lidarů vypadá geologický zlom (viz šipky), zde okrajový sudetský zlom v oblasti Rychlebských hor (obr. 2f). Ten odděluje rozčleněný horský reliéf na jihozápadě (vlevo dole) od plochého reliéfu Vidnavské nížiny a Žulovské pahorkatiny na severovýchodě (vpravo nahoře).

Geologické mapy dodnes neobsahují všechny zlomy, které se v krajině nacházejí. Proto byly vyvinuty metody schopné odhalit další dosud neznámé či předpokládané zlomy na základě analýzy DMR. Předpokládané zlomy se na lidarů často projevují jako lineární terénní hrany, nebo jako lineární úseky říčních údolí. Pomocí analýzy DMR 4g můžeme vyhledávat manuálně nebo poloautomaticky přírodní lineární tvary reliéfu, morfolineamenty (čárkované čáry, obr. 3a). Ty mohou být dosud neznámými a neprobádanými zlomy. Takto vymezené morfolineamenty nelze automaticky pokládat za zlomy pouze na základě vymezení

v DMR. Pro ověření je nutné je podrobit dalšímu, např. geofyzikálnímu výzkumu. Na obr. 3b ukazují šipky na drobný lineární tvar reliéfu, který byl vyhledán analýzou DMR 5g. Další průzkumy odhalily, že pravděpodobně jde o povrchový projev seismoaktivního zlomu Čirá-Kopanina, na němž se na Chebsku poblíž Lubů vyskytují zemětřesení. Na základě DMR z lidarů je možné velmi jednoduše provádět kolmé řezy reliéfem, jak ukazují drobné řezy přes linii zlomu Čirá-Kopanina (obr. 3c), kde vidíme zlomový svah (fault scarp, více viz Štěpančíková a kol. 2025). Identifikace povrchových projevů zlomů je pro geology a geomorfology, kteří se zabývají aktivní tektonikou, klíčová. Lidar dokáže odhalit i drobné posuny o velikosti několika centimetrů, ukazující na nedávnou seismickou aktivitu na zlomu nebo jeho pomalé pohyby (creep).

Lidar se v posledních letech osvědčil i při vyhledávání kruhových depresních struktur, které mohou být krátery maarových sopek a v krajině zakryté vegetací nejsou snadno viditelné. Maarové krátery vznikají při podzemní vulkanické explozi, když se migrující magma potká s podzemní vodou. Díky lidarovým datům se podařilo objevit např. kráter Bažina (Hošek a kol. 2019), jehož vulkanický původ byl následně potvrzen geofyzikálním průzkumem (Hrubcová a kol. 2023).

Jedním z dalších, i když méně obvyklých, využití moderního laserového skenování je výzkum skalních útvarů, které mohou být potenciálně nestabilní. Jde především o viklany, skalní brány, skalní věže a skalní hříby. Díky přesnému 3D modelu povrchu skalních útvarů, vytvořenému kombinací pozemního lidarů a fotogrammetrie, můžeme detailně zkoumat jejich stabilitu. To je důležité zejména při výpočtech odhadu seismického ohrožení – při zjišťování, jak silné zemětřesení by dané území mohlo postihnout (více např. www.seismickamapa.cz). V počítačových modelech je potenciálně nestabilní skalní útvar postupně vystavován simulovaným otřesům různé intenzity, frekvence a směru, dokud nedojde k jeho „pádu“. Je určeno mezní magnitudo zemětřesení, při němž útvar ještě zůstane stát, nebo už spadne. Pokud takový skalní útvar v krajině stále stojí, můžeme s jistotou říct, že v okolí po dobu jeho existence nedošlo k tak silnému zemětřesení. Ukázkovým příkladem je viklan Husova kazatelna (obr. 4) jižně od středočeských Sedlčan (blíže Zábranová a kol. 2020).

Perspektivy a budoucnost lidarů v geologii a geomorfologii

Budoucnost lidarů v těchto oborech slibuje širší možnosti uplatnění než dnes. Uvedené příklady odrážejí pouze některá využití v rámci ČR, která autor článku s kolegy během poslední dekády publikoval. Díky stále přesnějším a dostupnějším přístrojům a hustším mračnům bodů budou geologové moci v budoucnu odhalovat i velmi jemné tvary reliéfu, které nyní ještě unikají pozornosti. V kombinaci s metodami umělé inteligence a strojového učení bude možné automaticky vyhledávat riziková území, kde hrozí sesuvy, eroze a povodně. Velký potenciál má i monitorování dlouhodobých změn krajiny – pravidelným lidarovým měřením lze sledovat, jak se mění povrch vlivem těžby, stavby přehrad i změn klimatu.

V článku byla použita data zpracovaná při řešení projektu Grantové agentury ČR (21-29826S), Strategie AV21 – Dynamická planeta Země a RVO:67985891 dlouhodobý koncepční rozvoj výzkumné organizace.

Doporučená literatura je na webu Živý.