

Gravitační data pro geoaplikace

Jaroslav Klokočník¹

Astronomický ústav AV ČR, v. v. i., Fričova 298, 251 65 Ondřejov; jaroslav.klokocnik@asu.cas.cz

Pracujeme s gravitačními aspekty (deskriptory): tíhovými anomáliemi/poruchami, Marussiho tenzorem druhých derivací poruchového potenciálu, gravitačními invarianty a jejich specifickým poměrem, úhly napětí a s virtuálními deformacemi. Testovali jsme je na známých a velmi rozmanitých geologických útvarech. Poté jsme extrapolovali do méně známých oblastí. Objevili jsme dvě kandidátky na subglaciální sopky ve východní Antarktidě, tři subglaciální jezera a jednu jezerní pánev poblíž a přispěli jsme k diskusi o možném obrovském impaktním kráteru ve Wilkesově zemi. Ověřili jsme několik paleojezer na Saharě a navrhli jedno zatím neznámé v západním Egyptě pod tlustými vrstvami písku. Pomohli jsme ověřit nově objevené subglaciální krátery v Grónsku, podpořili existenci hypotetického kráteru v Indickém oceánu, sibiřského kráteru Kotuykanskaja a dalších. Korelovali jsme učené úhly napětí s nalezišti ropy a plynů nebo podzemní vody.

Zdrojem gravitace je hmota – v případě Země především „horniny“. Atmosféra je sice také hmotná, ale v porovnání s horninami je zanedbatelná; o vodě a oceánech se to už však říci nedá. Horniny jsou z různých důvodů na různých místech různě husté. Tyto hustotní variace vyvolávají variace gravitace, resp. tíže. Těmto odchylkám říkáme gravitační (tíhové) anomálie.

Gravitační anomálie Δg vypovídají o rozdílech v hustotách pod zemským povrchem. Geofyzika, geodézie a další obory takové anomálie proměřují a snaží se odhadnout, co je hlavní příčinou jejich vzniku.

Když si člověk představí naši planetu Zemi a jak se složení hornin mění s hloubkou, může usoudit, že k maximálním hustotním rozdílům dochází blízko povrchu Země. V hloubkách desítek a stovek kilometrů jsou již horniny tak extrémně stlačené, že k velkým hustotním rozdílům nedochází, až na průběžné zvyšování hustoty materiálu s narůstající hloubkou. Jak ale z měření globálního gravitačního pole na družicích získat informaci o změnách hustoty blízko povrchu Země? K tomu je třeba zobrazit ne samotné gravitační pole, ale jeho rozdíly při posunu z jednoho místa povrchu na druhé. Těmto rozdílům se říká první derivace nebo také gradient (rozdíl) gravitačního pole (přesněji gravitačního potenciálu v radiálním směru) – to jsou ony Δg . Protože gravitační pole je velmi robustní a jeho zdrojem je celá Země, tak abychom zvýraznili opravdu jen ty rozdíly, které souvisejí se změnami hustoty u povrchu, je vhodné vynést rozdíly rozdílů – tedy druhou derivaci gravitačního potenciálu. Tyto parametry, tedy



Gravimetr (CG-5 od firmy Scintrex) pro měření tíže.

druhé derivace gravitačního pole, vytvářejí Marussiho tenzor [2].

K přímému měření druhých derivací poruchového potenciálu, tj. složek Marussiho tenzoru, se používají gravitační gradientometry (gravitační torzní váhy) [3]. Na Zemi ovšem trpěly šumem [4]. Naštěstí díky technologickému pokroku mohou dnes létat na letadlech [5] a gradientometr (gradiometr) jako diferenciální mikroakcelerometr byl také umístěn a pět let úspěšně měřil na družici ESA GOCE [6, 7]. Akronymem GOCE znamená *Gravity and Steady-State Ocean Circulation Explorer*. Mise GOCE přinesla řádové zlepšení našich dosavadních znalostí o gravitačním poli Země, pokud jde o přesnost i rozlišovací schopnost [8].

Náš zájem o využití výsledků mise GOCE k rozpoznaní zajímavostí skrytých pod zemským povrchem začal v době předletové přípravy projektu a pokračoval mj. návrhem na optimální výběr dráhy GOCE, který byl přijat a realizován v závěru mise [9, 10]. Autor se seznámil s vedoucím projektu Runem Floberghagenem (tehdy ESA ESRIN) a na výzvu ESA připravil návrh využití měření z GOCE [11]. Po udělení grantu v rámci PECS (přidružení České republiky k ESA) pracovala naše skupina deset let na tom, co dnes shrnuje nedávno publikovaná kniha [1].

¹ Ačkoli je podepsán jen jeden autor, jde o kolektivní práci, které se různou měrou a v různou dobu za posledních asi deset let zúčastnili J. Kostecký, A. Bezděk, J. Kalvoda, C. A. Wagner, R. Floberghagen, C. K. Shum, V. Cílek, G. Kleetschka, J. Sebera, L. Eppelbaum, I. Pešek, J. Mizera, Ch. Gruber, P. Novák, J. Vondrák a další. Toto populárně-vědecké sdělení je jen kompilací z našich prací níže citovaných a v podstatě sleduje obsah naší nové knihy [1], nedávno pokřtěné v MÚ AV ČR a ČAS (v tomto čísle je k tomu samostatná zpráva). Zde jde samozřejmě jen o malou ochutnávku.

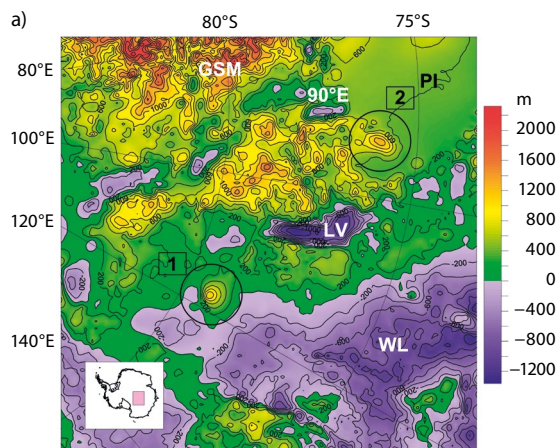
Po prostudování stávající teorie [12, 13] jsme zjistili, že je možné do gravitačních anomálií zabudovat také místa, kde gravitační rozdíly generují napětí v horninách a kde tedy u povrchu nastává pozvolná deformace. Tomuto rozšíření říkáme virtuální deformace [14]. Po zajištění numericky stabilních výpočtů [15, 16, 17] jsme se naučili, jak vypadá gravitační signál pro různé geologické fenomény, kde jsou horniny v „deformačním napětí“. Poté jsme se vydali extrapolovat tyto zkušenosti na méně prozkoumaná místa.

Domníváme se, že obří kráter Chicxulub na Yukatanu může být dvojíty a sibiřský Popigaj násobný kráter [1, 18, 19]. Ve východní Antarktídě jsme v blízkosti subglaciálního jezera Vostok díky gravitačním aspektům objevili dvě kandidátky na subglaciální sopky [20, 21], tři subglaciální jezera a jednu jezerní pánev [22]. Také jsme přispěli k diskusi [1, 23–26] o hypotetickém obřím kráteru (spíše kráterovém bazénu s centrálním maskonem, jak to bývá na Měsíci) ve Wilkesově zemi.

Prokázat existenci impaktního kráteru vůbec není snadné [27], protože příslušná kritéria nelze splnit jen geologickými doklady nebo pouze pomocí gravitačních dat, která nejsou nikdy jednoznačná [28]. Proto je dnes vedle asi 200 prokázaných kráterů různého stáří a velikostí ještě asi 400 kandidátů. Mezi ně patří i nově objevené krátery pod ledem Grónska [29, 30, 31, 32], obří Kotuykanskaja na Sibíři nedaleko Popigaje [33], impakt na dně Indického oceánu [34, 1] nebo kráter bez kráteru (dopad pravděpodobně na tlustou vrstvu ledu, která pak ustoupila) [35].

Prověřili jsme známá paleojezera z poslední doby „zelené“ Sahary [36] a objevili další možné paleojezero pod tlustou vrstvou písku v Západní poušti Egypta [37]. Za zmínku též stojí *Gravitační Atlas Antarktídy*, první svého druhu na světě [38].

Zjistili jsme, že jeden z gravitačních aspektů vykazuje specifické chování všude, kde jsou známá naleziště ropy, zemních plynů či podzemní vody. Nejprve jsme testovali naleziště Ghawar v Saúdské Arábii a Kaspické moře [39] a poté extrapolovali různé po světě [40]. Přinesli jsme tak novou doplňkovou metodu identifikace možných, zatím neznámých ložisek. Výzkum dalších



Obr. 1a, b, c Podledovcová topografie podle modelu BEDMAP 2 [m]: 1, 2 naše kandidátky na subglaciální sopky, tíhové anomálie Δg [mGal] a virtuální deformace vd [-], červeně dilatace, modře komprese, v oblasti mezi GSM a LV ve východní Antarktídě. Západ nahoře. Zkratky: GSM – Gamburtsevovo subglaciální pohoří, LV – jezero Vostok, WL – Wilkesova země (nížina), subglaciální jezero „90°E“, PI – „pole of ignorance“ (jedna z oblastí bez dat v modelu BEDMAP2).

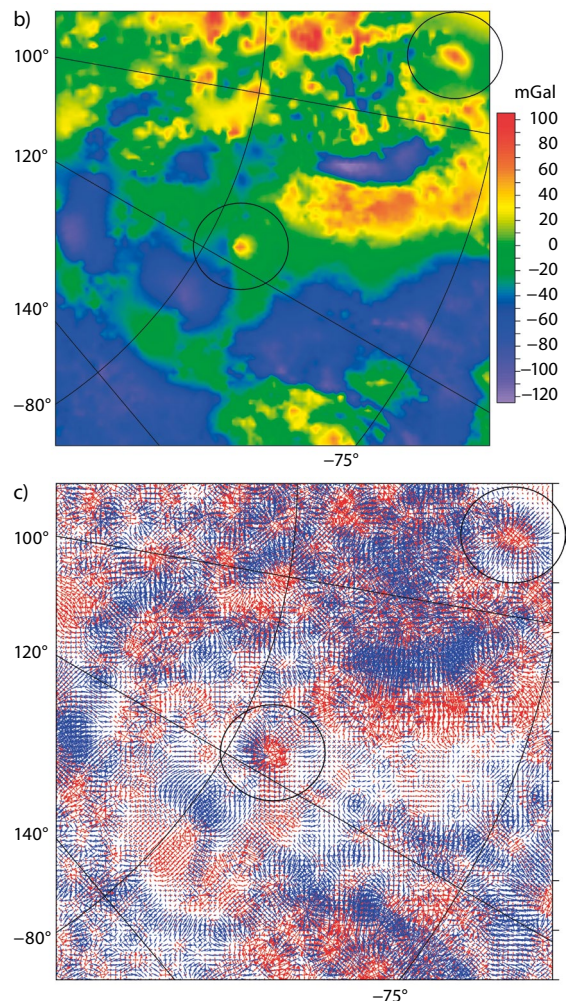
geoaplikací pokračuje. Přispěli jsme ke hledání mateřského (zdrojového) kráteru k jihoasijským tektitům (tak jako jsou spojeny vltaviny s kráterem Ries) [41]. Eppelbaum použil virtuální deformace ke studiu tektoniky Předního východu [42]. Nově jsme přešli i na krátery, moře a katény (řetězce kráterů) na Měsíci [v recenzii].

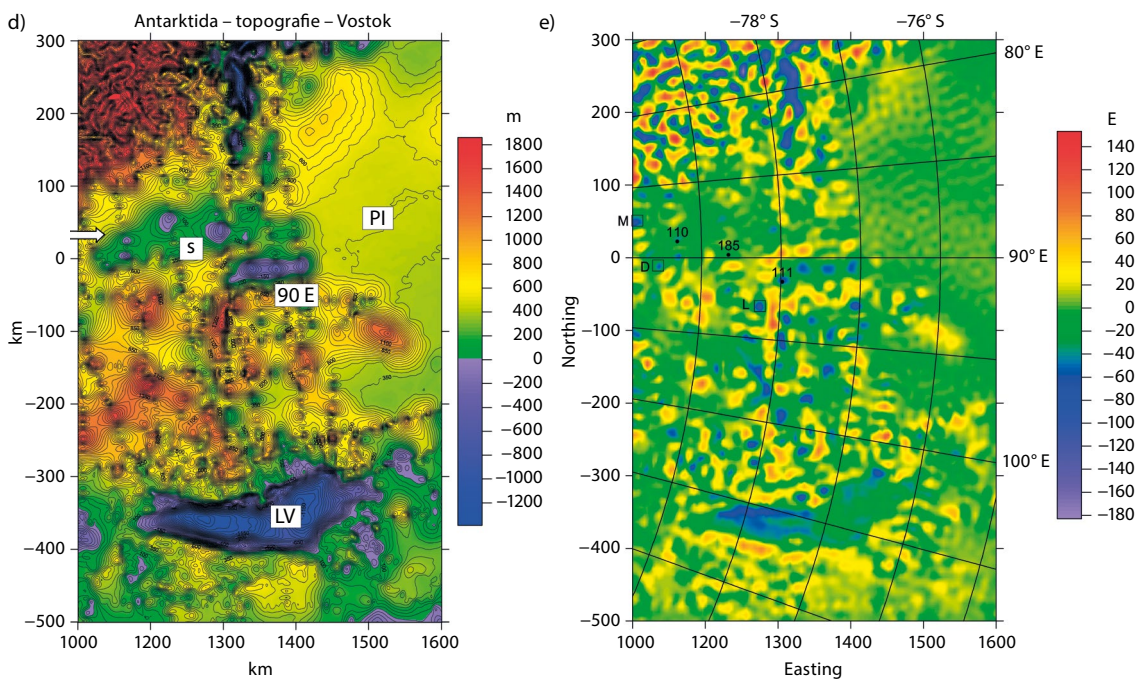
Zatím byla řeč o statickém gravitačním poli. Variabilní složka se určuje z kratších datových sérií, například měsíc po měsíci, s menším rozlišením a nižší přesností než neproměnná, přináší však pozoruhodné výsledky o sekulárních změnách překládajících se přes variace sezonní, které svědčí o vysychání rozsáhlých oblastí na světě (viz [1] a citace tam uvedené). Používají se měření z párů družic GRACE a GRACE-FO. Akronym GRACE znamená *Gravity Recovery and Climate Experiment a FO Follow-On*.

Poznámky k teorii a datům

Teorie pochází jak z klasické geofyziky, tak z prací Pedersena, Rasmussena a Beikiho [12, 13, 1] a je doplněna Kosteckým o virtuální deformace [14, 1, 38]. Pracujeme se souborem funkcí poruchového gravitačního potenciálu, které nazýváme „gravity aspects“ (descriptors). Jsou různým způsobem „citlivé“ na podpovrchové variace hustoty. Poskytují mnohem úplnější, pečlivější a důkladnější (ale přirozeně komplikovanější získatelnou) informaci o hustotních anomáliích než jen samotné Δg .

Pracujeme s tíhovou poruchou Δg , Marussiho tenzorem (Γ) druhých derivací poruchového potenciálu (T_{ij}), gravitačními invarianty (I_j), jejich specifickým po-





Obr. 1d, e BEDMAP 2 [m nad mořem] mezi GSM a LV. Modrá barva neznamená vodu, ale místa pod hladinou dnešního moře. Komponenta T_{zz} [E] pro oblast mezi GSM a LV s prvními písmeny M, D, L pro nově objevené kandidátky na subglaciální jezera [22]. Západ nahoře.

měrem (I), s úhly napětí (strike angles θ) a s virtuálními deformacemi (vd). Všechny dohromady nás informují o poloze, tvaru, orientaci podzemní anomálie, o její případné tendenci k „placatosti“, o směrech stresů a simulují dynamickou informaci o existujících podpo-
vrchových napětích.

Všechny jsou odvozeny výhradně ze souboru harmonických geopotenciálních koeficientů (Stokesových parametrů) *statického* modelu gravitačního pole. (Teorie je nastavena tak, že jako vstupní data přijímá jen toto.) Model gravitačního pole je soubor čísel charakterizujících vnější gravitační pole tělesa v rozvoji gravitačního potenciálu v řadu kulových funkcí. Tyto modely jsou vypočteny inverzí družicových a nedružicových měření rozmanitých typů. Jsou běžně dávány k dispozici vědecké komunitě.

V současné době používáme model gravitačního pole Země EIGEN6C4 (*European Improved Gravity model of the Earth by New techniques*, EIGEN6C4). [43] Gravitační potenciál je rozvinut vysoko do stupně a řádu 2190, což odpovídá rozlišovací schopnosti $5 \times 5'$ v šířce a délce nebo rozlišení ~ 10 km na zemském povrchu. Žádný z nových modelů gravitačního pole Země, který by byl kombinací družicových a nedružicových dat jako EIGEN 6C4, zatím tento model nepřekonal. Pouze družicové modely (bez terestrických dat) pro náš účel použít nemůžeme, protože jdou nejvýše do stupně a řádu 300. Tu „vysokofrekvenční“ komponentu v kombinovaném modelu Země totiž zajišťují tíhové anomálie terestrické a odvozené z družicové altimetrie.

Magnetické anomálie čerpáme z celosvětového modelu EMAG 2 [44] s rozlišením 5–10 km na zemském povrchu podle místa. Topografii zemského povrchu doplňujeme z ETOPO 1 [45]. Přesnost ve výšce je mezi 10 a 20 metry. Pro Antarktidu máme výsledky z radarů pronikajících ledem BEDMAP 2 [46] (místa měření stále chybějí) a gravitačně-topografický model směřující – zhruba řečeno – EIGEN 6C4 a BEDMAP 2, známý jako SatGravRET 14 [47] v rozvoji do 2190.

Ukázky výsledků

Následují příklady vybrané z našich prací pro Antarktidu, Saharu, Chicxulub a některé další impaktní krátery. Více lze, samozřejmě, nalézt v citovaných pracích a v knize [1].

Antarktida

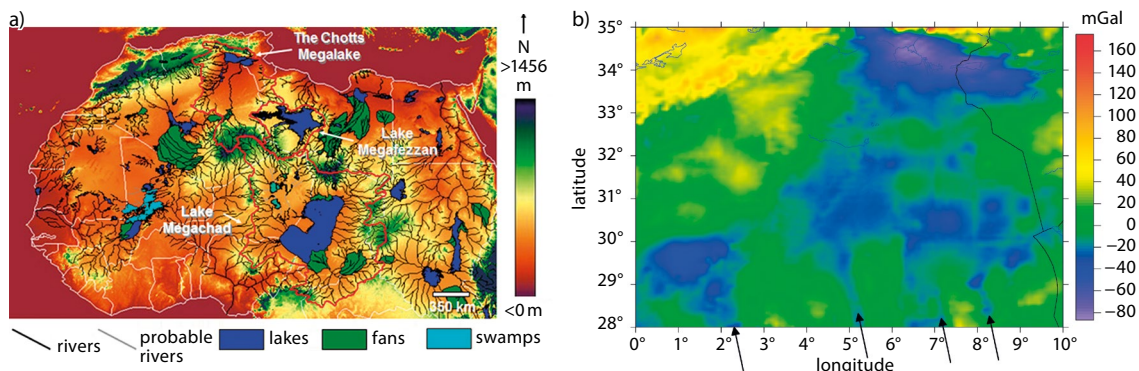
Kandidátky na subglaciální sopky poblíž jezera Vostok jsme našli podle BEDMAP 2 a SatGravRET 14. Zatím je známo přes dvacet sopek, ale většinou nejsou pod ledem a jsou v západní Antarktidě. Těžko odlišíme sopku a běžnou horu v rámci pohorí, ale v rovinném terénu, kde se vyskytuje izolovaný kopec, šance je. V dané oblasti však musejí být kvalitní a dostatečně hustá data pro BEDMAP 2 – což je zde splněno. Sopky by byly havajského typu, s převýšením vůči okolí 1–1,5 km a se základnou ~ 70 km. Z prací [20, 21] vybíráme topografii podloží (obr. 1a, kandidátky na sopky jako kopce), Δg (obr. 1b, lokální maxima) a vd (obr. 1c, dilatace v centru obklopené kompresi).

Subglaciální jezera v Antarktidě jsou dnes intenzivně zkoumána [48]. Máme tři kandidáty na subglaciální jezera v téže oblasti, v tzv. oblasti jezer mezi GSM a LV [22]. V žádném seznamu jezer nebyla uvedena [49, 50].

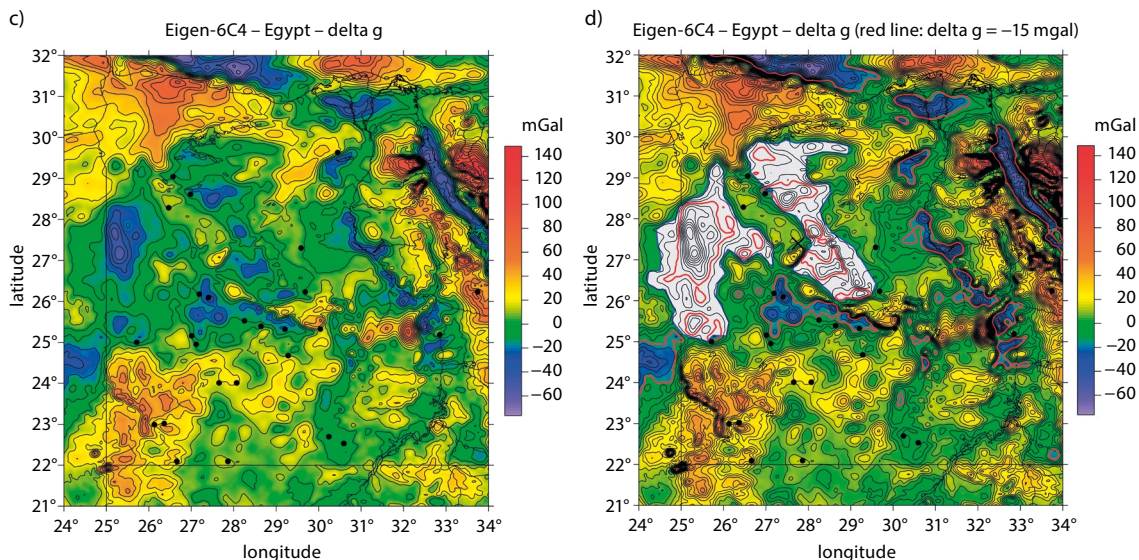
Obr. 1d ukazuje BEDMAP 2 topografii oblasti. Největší depresi vytvářejí subglaciální jezera LV a 90°E. Oblast kolem chápeme jako jezerní bazén velikostí srovnatelný s LV a stejně orientovaný (dlouhá osa J–S). Obr. 1e obsahuje radiální složku Marussiho tenzoru T_{zz} , čísla nejbližších jezer podle katalogu [49] a první písmena jmen nových kandidátů [22]. Také je zjevné geologům známé podledovcové „říční“ propojení oblasti od Z na V [22, 48] a nově i vtok do LV.

Sahara

Zelená Sahara byla plná velkých jezer či vnitřních moří. Prověřili jsme geologům známá paleojezera na Sahaře [36] a přidali další [37]. I když se bývalé jezero zane-
se pískem, hustotní kontrast vůči okolí se sice zmenší, než byl u vody, ale nějaký zůstává. Místo pak vykazuje



Obr. 2a, b Saharská paleojezera. Příklad paleojezera MegaChotts v současném Tunisku. Na obrázku Δg [mGal] je rozsáhlá prohlubeň (v severní partii i topograficky) a náznaky přítoků bývalými řečišti z kopců na jihu (i ve vd). Sever nahoře.



Obr. 2c, d Možná paleojezera v Západní poušti v Egyptě. Nejprve samotné Δg [mGal], ukazující výrazné a rozsáhlé negativní anomálie, pak totéž znova s vrstevnicemi a s obrysy paleojezer s uvážením archeologických lokalit z období cca 8–5 tisíc let před. n. l. [51].

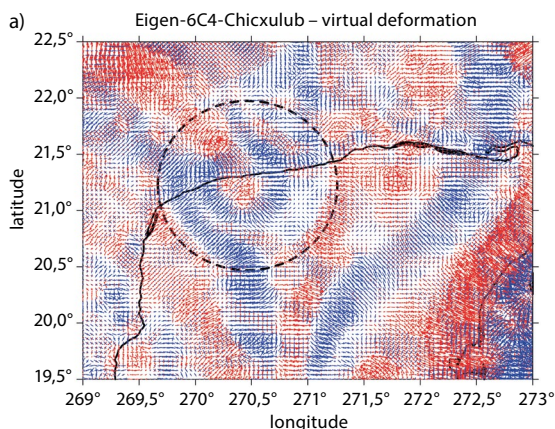
negativní Δg i T_{zz} a specifické hodnoty ostatních gravitačních aspektů.

To je vidět na obr. 2b pro paleojezero MegaChotts i na obr. 2c, d pro Západní poušť v Egyptě. Za zmínku v ní stojí Velká písečná poušť podél hranice s Libyí, svažující se jako velká nakloněná deska z hor Gifl Kebir na jihu Egypta na sever až skoro k dnešní oáze a depresi Siwě. Topograficky placaté, gravitačně nikoli, jak dokumentují oba obrázky. Tam jsme průběh (maximální hloubku) možného paleojezera nejprve odhadli pomocí vztahu mezi tíhovou anomálií a výškou a poté upřesnili s uvážením známých pozic archeolo-

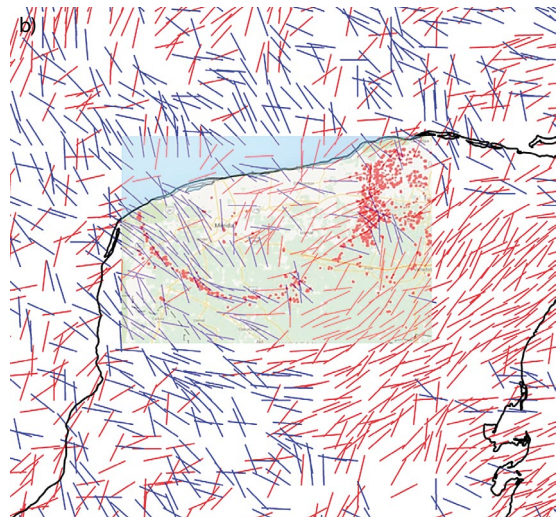
gických lokalit podle [51] v určitém časovém intervalu tak, aby byly na pobřeží. Výsledek ukazuje obr. 2d pro dvě úrovně výšek – pro mělčí se paleojezero rozpadá na menší jezera. Posledních 5 tisíc let je jednoznačný trend vysychání vedoucí k neobyvatelnosti řady míst, k oázám se zbytkovou vodou a k možnosti dostat vodu jen z podzemí.

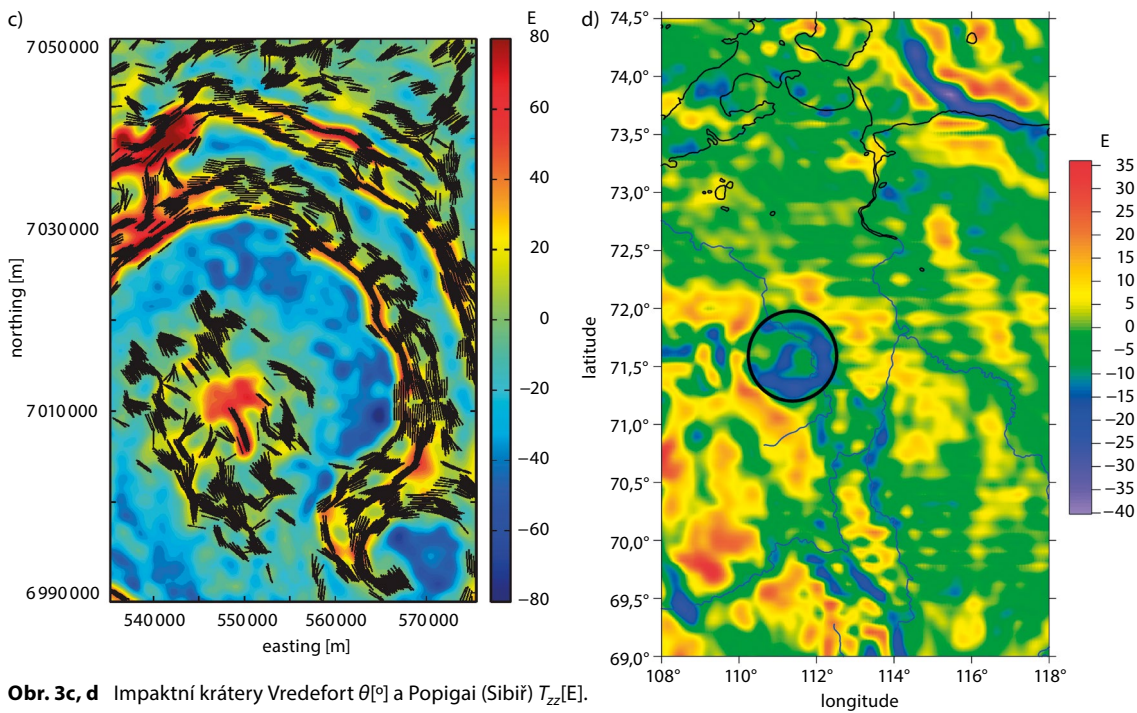
Ukázky pro impaktní meteoritické krátery

Z mnoha ukázek v [1, 13, 18, 26, 29, 32, 33–35] vybíráme známý kráter Chicxulub na Yukatánu (obr. 3a, b; vd a θ)



Obr. 3a, b Impaktní kráter Chicxulub na severu Yukatánu, Mexiko (vd[-] a θ °).





Obr. 3c, d Impaktní krátery Vredefort θ [°] a Popigai (Sibiř) T_{zz} [E].

s průměrem 170–250 km, obří Vredefort v jižní Africe (obr. 3c; θ) s průměrem asi 250 km, sibiřský Popigai (obr. 3d; T_{zz}) s průměrem kolem 100 km a Hiawatha Glacier pod ledem Grónska (obr. 3e; podledovcová topografie z [29] podle NASA a naše T_{zz}) s průměrem cca 30 km.

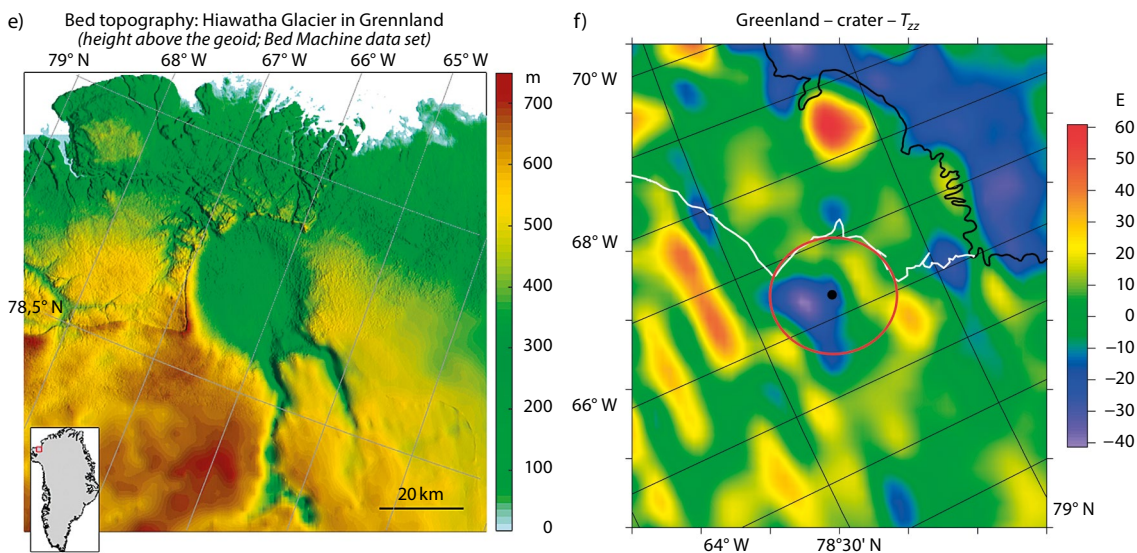
Chicxulub ukazuje kruhovou strukturu s lemy se střídající se dilatací (červeně) a kompresí (modře), obr. 3a, a vedle toho úhly napětí θ učesané podél lemů s místy, kde se nacházejí *cenotes* (něco jako Macochy ve vápenci, vyplněné vodou), kdysi hojně využívané Mayi jako zdroj vody a ceremoniální objekty (na obr. 3b jako červené tečky). To jsou postimpaktní jevy.

Pro Vredefort ukazujeme na obr. 3c θ překrývající kresbu s T_{zz} . Úhly napětí jsou učesané kolem lemu a vytvářejí jakési halo či svatozář kolem kráteru. Kolmo k tomuto směru se vyrovnávají napětí způsobená dopadem. Druhá radiální derivace T_{zz} střídá minima a maxima mezi lemy a podél nich. Protože je kráter veliký, má již výrazný středový pík s pozitivní T_{zz} . V blízkosti Vredefortu i řady dalších impaktů se těží ekonomické nerosty a někde také uhlovodíky. Je tomu tak u polo-

viny kráterů v severní Americe [52–54], takže to určitě není náhoda (více viz kap. 6 v [1]). Krátery jsou také zdrojem druhotně vytvořených tektitů (ejecta), v případě bavorského kráteru Ries známých moldavitů či vltavínů.

Pro Popigai (Sibiř) vidíme na obr. 3d T_{zz} [E]. Opět je tu centrální pík. Kráter je možná násobný, objekty seřazeny směrem SZ–JV, naznačující směr dopadu. Pozitivní lem je fragmentovaný, místem protéká řeka a odnáší materiál z místa dopadu. V kráteru byl sovětský gulag a těžily se průmyslové diamanty. Ty jsou dílem „alchymistické“ proměny původního materiálu v místě dopadu bohatého na uhlík mohutným okamžitým tlakem při výbuchu. To je vlastní impaktní efekt.

Obr. 3e, f přinášejí podledovcovou topografii SZ části Grónska s kráterem Hiawatha Glacier (převzato z [29]) a náš obrázek s T_{zz} . Tam vidíme dno kráteru jako negativní anomálii, podle očekávání, a pouze náznak lemu. Kráter má také malý centrální pík, jak zjistili geologové ze svých dat, ale ten my nedokážeme zaznamenat. Připomínáme, že průměr kráteru je asi



Obr. 3e, f Podledovcová topografie z [29] podle NASA a naše T_{zz} .

» Prokázat existenci impaktního kráteru vůbec není snadné ... dnes máme vedle asi 200 prokázaných kráterů ještě asi 400 kandidátů. «

30 km a rozlišovací mez modelu EIGEN 6C4 je 10 km. Centrální pík je pod touto mezí. Nicméně náš výsledek nezávisle na [29] podporuje nález subglaciálního impaktního kráteru v Grónsku.

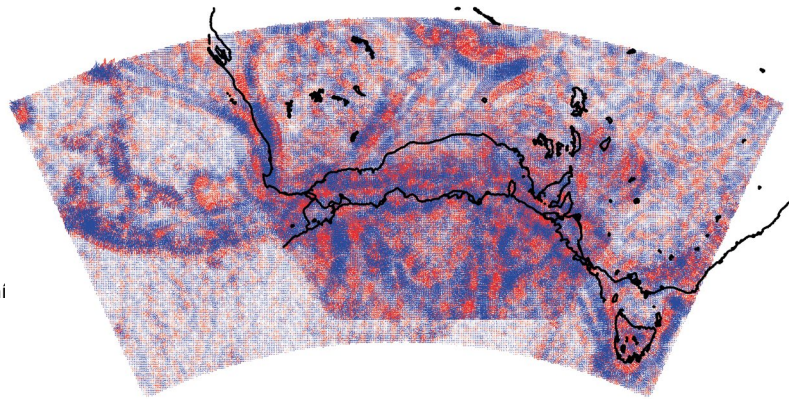
Místo závěru

Pár ukázek různých objektů, kterým je věnována naše nová knížka [1], by mělo názorně doložit užitečnost použití gravitačních dat, jmenovitě komplexu gravitačních aspektů. Co dříve nebylo možné nebo bylo sci-fi, je dnes reálné.

Literatura

- [1] J. Klokočník, J. Kostecký, V. Čílek, A. Bezděk: *Subglacial and underground structures detected from recent gravito-topography data*. Cambridge Scholars Publishing, Newcastle 2020.
- [2] A. Marussi: *Intrinsic Geodesy*. Springer Verlag, Berlin 1985.
- [3] T. A. Elkins: „The second derivative method of gravity interpretation“, *Geophysics* **16**, 29–50 (1951).
- [4] M. Pick, J. Pícha, V. Vyskočil: *Úvod ke studiu tíhového pole Země*. Academia, Praha 1973.
- [5] Bell Company: *Air-FTG Applications, Airborne 3D Full tensor Gravity Gradiometry*. Aberdeen 2010.
- [6] ESA: *Gravity field and steady-state ocean circulation missions. Reports for mission selection. The four candidate Earth explorer core missions, SP-1233 (1)*. European Space Agency, Noordwijk 1999.
- [7] ESA: *GOCE High Level Processing Facility, GOCE Level 2 Product Data Handbook*. Doc. GO- MA-HPF-GS-0110, 21-23; 2014. Dostupné z: <https://earth.esa.int/web/guest/missions/esa-operational-eo-missions/goce>.
- [8] R. Floberghagen, M. Fehringer, D. Lamarre, D. Muzi, B. Frommknecht, C. Steiger, J. Pineiro, A. da Costa: „Mission design, operation and exploitation of the gravity field and steady-state ocean circulation explorer mission“, *J. Geod.* **85**, 749–758 (2011).
- [9] A. Bezděk, J. Klokočník, J. Kostecký, R. Floberghagen, J. Sebera: „Some aspects of the orbit selection for the measurement phases of GOCE“, in: *Proceedings of the ESA Living Planet Symposium*, Bergen, Norway, 28 June – 2 July, 2010. ESA SP-686.
- [10] J. Klokočník, C. A. Wagner, J. Kostecký, A. Bezděk: „Ground track density considerations on the resolvability of gravity field harmonics in a repeat orbit“, *Adv. Space Res.* **56**, 1146–1160 (2015). Dostupné z: <http://dx.doi.org/10.1016/j.asr.2015.06.020>.
- [11] J. Klokočník (ed.), A. Bezděk, Ch. Gruber, J. Kostecký, P. Novák, I. Pešek, J. Vondrák: „GOCE – specific tasks on fine gravity field structure of the Earth, Detection of hidden impact (meteoritic) structures; Introduct. study and simul. before the GOCE launch“, in: *Report for ESA, PECS C 98056*, 109 stran. Ondřejov 2008.
- [12] B. D. Pedersen, T. M. Rasmussen: „The gradient tensor of potential field anomalies: Some implications on data collection and data processing of maps“, *Geophysics* **55**, 1558–1566 (1990).
- [13] M. Beiki, L. B. Pedersen: „Eigenvector analysis of gravity gradient tensor to locate geologic bodies“, *Geophysics* **75**, 137–149 (2010). DOI: 10.1190/1.3484098.
- [14] J. Kalvoda, J. Klokočník, J. Kostecký, A. Bezděk: „Mass distribution of Earth landforms determined by aspects of the geopotential as computed from the global gravity field model EGM 2008“, *Acta Univ. Carolinae, Geographica XLVIII*, 2 (2013).
- [15] S. A. Holmes, N. K. Pavlis, P. Novák: *A Fortran program for very-high degree harmonic synthesis, version 05/01/2006*. University of New Brunswick, 2006.
- [16] J. Sebera, C. A. Wagner, A. Bezděk, J. Klokočník: „Short guide to direct gravitational field modelling with Hotine's equations“, *Journal of Geodesy* **87**, 223–238 (2013). Dostupné z: <http://dx.doi.org/10.1007/s00190-012-0591-2>.
- [17] B. Bucha, J. Janák: „A MATLAB-based graphical user interface program for computing yfunctionals of the geopotential up to ultra-high degrees and orders“, *Computers and Geosciences* **56**, 186–196 (2013). DOI: 10.1016/j.cageo.2013.03.012.
- [18] J. Klokočník, J. Kostecký, I. Pešek, P. Novák, C. A. Wagner, J. Sebera: „Candidates for multiple impact craters?: Popigai and Chicxulub as seen by the global high resolution gravitational field model EGM2008“, *EGU Solid Earth* **1**, 71–83 (2010). DOI: 10.5194/se-1-71-2010.
- [19] K. M. Khazanovitch-Wulff Mikheeva, V. F. Kuznetsov: „Structural elements of some astroblemes indicating direction of cosmic body trajectories“, *New Concepts in Global Tectonics* **1**, 11–18 (2013).
- [20] J. Klokočník, J. Kostecký, A. Bezděk: „On Feasibility to Detect Volcanoes Hidden under Ice of Antarctica via their Gravitational Signal“, *Annals of Geophys.* **59**, S0539 (2016). DOI: 10.4401/ag-7102.
- [21] J. Klokočník, J. Kostecký, A. Bezděk, I. Pešek: „Candidates for volcanoes under the ice of Antarctica detected by their gravito-topographic signal“, *Annals of Geophys.* **60**, S0661 (2017). DOI: 10.441/ag-7427.
- [22] J. Klokočník, J. Kostecký, V. Čílek, A. Bezděk, I. Pešek: „Gravito-topographic signal of the Lake Vostok area, Antarctica, with the most recent data“, *Polar Science* **17**, 59–74 (2018). Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.polar.2018.05.002>.
- [23] R. R. von Frese, L. Potts, S. Wells, T. Leftwich, H. Kim et al.: „GRACE gravity evidence for an impact basin in Wilkes Land, Antarctica“, *Geochemistry, Geophysics, and Geosystems* **10**, Q02014 (2009). DOI: 10.1029/2008GC002149.
- [24] R. R. von Frese, H. R. Kim, T. E. Leftwich, J. W. Kim, A. V. Golynsky: „Satellite magnetic anomalies of the Antarctic Wilkes Land impact basin inferred from regional gravity and terrain data“, *Tectonophysics* **585**, 185–195 (2013).
- [25] J. G. Weihaupt, F. G. van der Hoeven, F. B. Chambers, C. Lorius, J. W. Wyckoff, D. Castedyk: „The Wilkes Land Anomaly revisited“, *Antarctic Sci.* **27**, 291–305 (2015). DOI: 10.1017/S0954102014000789.
- [26] J. Klokočník, J. Kostecký, A. Bezděk: „On the detection of the Wilkes Land impact crater“, *Earth, Planets and Space* **70**, 135–147 (2018). Dostupné z: <https://doi.org/10.1186/s40623-018-0904-7>.
- [27] B. M. French, C. Koeberl: „The convincing identification of terrestrial meteorite impact structures: What works, what doesn't, and why“, *Earth-Sci. Rev.* **98**, 123–170 (2010).
- [28] A. R. Hildebrand et al.: „Mapping Chicxulub crater structure with gravity and seismic reflection data, Meteoritics: Flux with Time and Impact Effects“, *Geological Soc., London, Spec. Publ.* **140**, 155–176 (1998).
- [29] K. H. Kjær, N. K. Larsen, T. Binder, A. A. Bjørk, O. Eissen, M. A. Fahnestock, S. Funder, A. A. Garde, H. Haack, V. Helm, M. Houmark-Nielsen, K. K. Kjeldsen, S. A. Khan, H. Machguth, I. McDonald, M. Morlighem, J. Mouginot, J. D. Paden, T. E. Waight, C. Weikusat, E. Willerslev, J. A. MacGregor: „A large impact crater beneath Hiawatha Glacier in northwest Greenland“, *Science Advances* **4**, eaar8173 (2018). DOI: 10.1126/sciadv.aar8173.
- [30] J. A. MacGregor, W. F. Bottke Jr., M. A. Fahnestock, J. P. Harbeck, K. H. Kjær, J. D. Paden et al.: „A possible second large subglacial impact crater in northwest Greenland“, *Geophysical Research Letters* **46**, 1496–1504 (2019). Dostupné z: <https://doi.org/10.1029/2018GL078126>.
- [31] G. Kletetschka, J. Klokočník, J. Kostecký, A. Bezděk, V. Čílek: „An independent discovery of subglacial impact crater in northwest Greenland by gravity aspects from

Vpravo: Kompozice virtuálních deformací vd (dilatace červeně, komprese modře) podle [1]: složeno z obrázku vd pro Wilkesovu zemi ve východní Antarktidě, přisunutou k jižnímu pobřeží Austrálie s vlastním obrázkem pro tamní vd. Takto pospolu to mělo být (dle Freseho a kol. [23, 24]) na rozhraní prvohor a druhohor před čtvrt miliardou let. Obří kráter (kráterovy bazén s maskonem uprostřed) o průměru přes 500 km, největší na naší planetě a ještě částečně zachovaný, by byl příčinou separace obou kontinentů a oddělení druhohor od prvohor. V Antarktidě by zbyla jeho větší část, jeho „severní zakončení“ do kruhovitěho tvaru by se dnes nacházelo na jihu Austrálie. Ale je třeba jasně říct, že kráter ve Wilkesově zemi nepatří dosud mezi impaktní krátery prokázané a oficiálně uznané mezinárodní komunitou; diskuse a hádky, zda je to impaktní objekt, nebo ne, pokračují. Naše výsledky podporují jeho impaktní původ. Výpočet a kresba J. Kostelecký. Samostatná publikace v [26].



moving from Indochina to northwest China“. *Annual meeting Meteorit. Soc.*, Berlin, 7–12 August.

Earth gravity model EIGEN 6C4 and magnetic anomaly data“, in: *50th Lunar and Planetary Science Conference*, Abstract #1318, Texas, 2019. Dostupné z: <https://www.hou.usra.edu/meetings/lpsc2019/pdf/1318.pdf>.

- [32] J. Klokočník, J. Kostelecký, A. Bezděk, V. Čílek, G. Kletetschka, H. Staňková: „Support for two subglacial impact craters in northwest Greenland from Earth gravity model EIGEN 6C4 and other data“, *Tectonophysics* **780**, 228396 (2020). Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.tecto.2020.228396>.
- [33] J. Klokočník, J. Kostelecký, A. Bezděk, G. Kletetschka, H. Staňková: „A 200 km suspected impact crater Kotuykanskaya near Popigai, Siberia, in the light of new gravity aspects from EIGEN 6C4, and other data“, *Sci. Reports* **10**, 6093 (2020). Dostupné z: <https://doi.org/10.1038/s41598-020-62998-6>.
- [34] D. H. Abbott, W. B. Masse, L. H. Burckle, D. Breger, P. Gerard-Little: „Burckle abyssal impact crater: Did this impact produce a global deluge?“, in: *Searching for a lost land*, Ed. Stavros P., Milos island, Greece, Conf. Procs. 179–190 (2005).
- [35] J. Klokočník, J. Kostelecký, A. Bezděk: „The putative Saginaw impact structure, Michigan, Lake Huron, in the light of gravity aspects derived from recent EIGEN 6C4 gravity field model“, *Journal of Great Lakes Research* **45**, 12–20 (2019). Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.jglr.2018.11.013>.
- [36] J. Klokočník, J. Kostelecký, V. Čílek, A. Bezděk, I. Pešek: „A support for the existence of paleolakes and paleorivers buried under Saharan sand by means of “gravitational signal” from EIGEN 6C4“, *Arab. J. Geosciences* **10**, 199 (2017). DOI: 10.1007/s12517-017-2962-8.
- [37] J. Klokočník, V. Čílek, J. Kostelecký, A. Bezděk: „Gravity aspects from recent Earth gravity model EIGEN 6C4 for geoscience and archaeology in Sahara, Egypt“, *Journal of African Earth Sciences* **168**, 103867 (2020). Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2020.103867>.
- [38] J. Klokočník, J. Kostelecký, A. Bezděk: *Gravitational Atlas of Antarctica*. Series Springer Geophysics. Springer International Publishing, Cham 2017. ISBN: 978-3-319-56639-9.
- [39] J. Klokočník, J. Kostelecký: „Gravity signal at Ghawar, Saudi Arabia, from the global gravitational field model EGM 2008 and similarities around“, *Arab. J. Geosciences* **8**, 3515–3522 (2015). DOI: 10.1007/s12517-014-1491-y.
- [40] J. Klokočník, J. Kostelecký, A. Bezděk, V. Čílek: „The spatial distribution of the strike angles derived from EIGEN 6C4 gravity model – a new possibility for oil and gas exploration?“, *International Journal of Oil, Gas and Coal Technology*. přijato k publ.
- [41] Z. Mizera, J. Řanda, J. Kameník, J. Klokočník, J. Kostelecký: „Hypothetical source crater for Australian tektites: moving from Indochina to northwest China“. *Annual meeting Meteorit. Soc.*, Berlin, 7–12 August.
- [42] L. Eppelbaum, Y. Katz, J. Klokočník, J. Kostelecký, Z. Ben-Avraham, V. Zheludev: „Tectonic insights into the Arabian-African region inferred from a comprehensive examination of satellite gravity big data“, *Global and Planetary Change* **171**, 65–87 (2017). Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2017.10.011>.
- [43] Ch. Förste, S. Bruinsma, O. Abrykosov, J.-M. Lemoine et al.: „The latest combined global gravity field model including GOCE data up to degree and order 2190 of GFZ Potsdam and GRGS Toulouse (EIGEN 6C4)“, in: *5th GOCE user workshop*. Paris, 25–28 Nov, 2014.
- [44] S. Maus, U. Barckhausen, H. Berkenbosch, N. Bournas, J. Brozena, V. Childers, F. Dostaler, J. D. Fairhead, C. Finn, R. R. B.von Frese et al.: „EMAG2: A 2-arcmin resolution Earth Magnetic Anomaly Grid compiled from satellite, airborne, and marine magnetic measurements“, *Geochimistry, Geophysics, Geosystems* **10**, Q08005 (2009).
- [45] C. Amante, B.W. Eakins: „ETOPO1, 1 arc-minute global relief model: procedures, data sources and analysis“, in: *NOAA Techn. Memo. NESDIS NGDC 24* (National Geophysical Data Center), 2009. DOI: 10.7289/V5C8276M.
- [46] P. Fretwell, H. Pritchard, D. Vaughan, J. Bamber et al.: „Bedmap2: improved ice bed, surface and thickness datasets for Antarctica“, *The Cryosphere* **7**, 375–393 (2013). DOI: 10.5194/tc-7-375-2013.
- [47] Ch. Hirt, M. Rexer, M. Scheinert, R. Pail, S. Claessens, S. Holmes: „A new degree-2190 (10 km resolution) gravity field model for Antarctica developed from GRACE, GOCE and Bedmap 2 data“, *J. Geod.* **90**, 105–127 (2013). DOI: 10.1007/s00190-015-0857-6.
- [48] M. J. Siegert, J. Priscu, I. Alekhina, J. M. Wadham, W. B. Lyons (eds.): „Antarctic subglacial lake exploration: first results and future plans“, *Phil. Trans. R. Soc. A* **374**, 2059 (Theo Murphy meeting issue; sborník). Dostupné z: <http://dx.doi.org/10.1098/rsta.2014.0306>.
- [49] A. P. Wright, M. J. Siegert: „A fourth inventory of Antarctic subglacial lakes“, *Antarct. Sci.* **24**, 659–664 (2012). DOI: 10.1017/S095410201200048X.
- [50] S. Goeller, D. Steinhage, M. Thoma, K. Grosfeld: „Assessing the subglacial lake coverage of Antarctica“, *Annals of Glaciology* **57**, 109–117 (2016). DOI: 10.1017/aog.2016.23 109.
- [51] R. Kuper, S. Kroepelin: „Climate-controlled Holocene occupation in the Sahara: Motor of Africa’s evolution“, *Science* **313**, 803–807 (2006).
- [52] C. A. Murphy, J. L. Dickinson: „Exploring exploration play models with FTG gravity data“, in: *11th SAGA Biennial Techn. Meeting and Exhib.*, s. 89–91. Swaziland, 16–18 Sept. 2009.
- [53] R. R. Donofrio: „North American impact structures hold giant field potential“, *Oil and Gas J.* **96**, 69–83 (1998).
- [54] W. U. Reimold, C. Koeberl, R. L. Gibson, B. O. Dressler: „Economic mineral deposits in impact structures: a review“, in: *Impact Tectonics*, 479–552. Springer, Berlin – Heidelberg 2005.