

# Možnosti a problémy modelování dopravních toků a dalších prostorových interakcí v širší oblasti Krkonoš

## Possibilities and problems in modelling of transport flows and other spatial interactions in a broader area of the Krkonoše Mts

PAVEL KLAPKA<sup>1</sup> & MARTIN TOMÁŠ<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Katedra geografie, Přírodovědecká fakulta, Univerzita Palackého v Olomouci, 17. listopadu 12, 771 46 Olomouc, CZ, [pavel.klapka@upol.cz](mailto:pavel.klapka@upol.cz)

<sup>2</sup>Geografický ústav, Přírodovědecká fakulta, Masarykova Univerzita v Brně, Kotlářská 2, 602 00 Brno, CZ, [m.tom@atlas.cz](mailto:m.tom@atlas.cz)

**Abstrakt** Článek se zabývá možnostmi a problémy modelování prostorových interakcí v širší oblasti Krkonoš. Modely prostorových interakcí patří mezi tradiční analytické a predikční nástroje geografického výzkumu v oblasti toků a pohybů. V článku je aplikován gravitační model bez omezení na dopravní síti Krkonoš, která je interpretována jako graf skládající se z vrcholů a hran (*sensu* teorie grafů). Gravitační modely obecně vzešly z fyzikální analogie k Newtonovu gravitačnímu zákonu. Do modelu vstupují informace o masách vybraných vrcholů grafu (počet obyvatel a lůžek) a vzdálenostech mezi těmito vrcholy. Model je kalibrován podle reálně zjištěných interakcí ze sčítání dopravy. Kalibrace se týká nalezení optimálních parametrů funkce vzdálenosti. Výsledky obsahují jednak kalibrované parametry modelu, jednak modelované intenzity silniční dopravy a jejich porovnání s reálnými intenzitami. V diskuzi se článek zabývá možnostmi dalšího použití testovaného modelu a také modelováním prostorových interakcí v chráněných územích v obecnější rovině. Definuje sedm podmínek korektního modelování turistických intenzit v síti turistických cest.

**Klíčová slova:** modelování prostorových interakcí, gravitační model, intenzita dopravy, turistické toky, management chráněných území

**Abstract** The paper deals with possibilities and problems of spatial interaction modelling in a broader area of the Krkonoše Mts (the Giant Mts). Spatial interaction models belong among traditional analytical and predictive tools of geographical research in the field of flows and movements. The paper applies unconstrained gravity model on the transportation network of the Krkonoše Mts, which is interpreted as a graph consisting of vertices and edges (*sensu* graph theory). Generally, gravity models came up from physical analogy to Newton's law of gravitation. Information on masses of selected vertices of a graph (population and number of beds) and distances among these vertices enter the model. Model is calibrated according to real interaction from the traffic census. Calibration is concerned with the estimate of optimum parameters for the distance-decay function. The results include both calibrated parameters of the model and modelled road transport intensities and their comparison to real intensities. The paper also discusses possibilities of further use of tested model and spatial interaction modelling in protected areas in a more general sense. It defines seven conditions for correct modelling of tourism intensities along the touristic trail network.

**Keywords:** spatial interaction modelling, gravity model, transportation intensity, tourism flows, protected area management

## Úvod

Základní objekt studia geografie, planeta Země, je objektem vysoce komplexním a heterogenním, což

v různé míře platí i pro prostorové výseče planety, regiony různé hierarchické úrovně. Především heterogenita prostoru podmiňuje existenci prostorových interakcí, tj. vztahů mezi jednotlivými prostorovými

výšečemi. Hovoříme o polaritě prostoru, jež indukuje prostorové interakce (také horizontální toky, pohyby – HALÁS et al. 2014). Prostorové interakce mohou být podmíněny buď fyzikálně, nebo sociálněekonomicky (jedná se o zjednodušené základní členění). K fyzikálně podmíněným interakcím náleží například větrné proudění mezi tlakovými útvary či svahové pochody mezi oblastmi s rozdílnou gravitační potenciální energií. K sociálněekonomicky podmíněným interakcím pak patří rozmanité toky osob, materiálu, produktů, financí, informací vzniklé agregací individuálních pohybů.

V Krkonoších má zásadní význam studium gradientu anemo-orografických systémů (JENÍK 1961), určující rozmístění a interakci fyzickogeografických jevů, i behaviorálně podmíněných toků osob, které reagují na primární fyzickogeografický kontext – především reliéfové predispozice rozložení a parametrů dopravní sítě a systému osídlení, rozmístění atraktivit cestovního ruchu (rekreačních příležitostí). Z toho vyplývá i význam studia sociálněekonomicky podmíněných interakcí v chráněných územích, které se vztahují k problematice cestovního ruchu, navazující ochrany přírody a krajiny, v kombinaci obojího pak k otázkám regionálního plánování a managementu chráněných území.

Ačkoliv je existence prostorových interakcí z podstaty nevyhnutelná a zřejmá, přesná představa o prostorovém rozložení toků nemusí být snadno dosažitelná a zjištělná. Statisticky se zjišťuje pouze zlomek prostorových toků (např. dojíždka za prací), navíc mezi arbitrárními prostorovými jednotkami (typicky obcemi), které nejsou zvláště pro nižší hierarchické úrovně (mikroregionální, lokální) vhodné. V takovém případě se nabízí nástroj modelování prostorových interakcí, kdy se však setkáváme s vysokým podílem neurčitosti způsobené charakterem dat, zvoleným modelem a jeho parametry i subjektivní interpretací výsledků modelu (cf. Fusco et al. 2017). Kvalitní model by měl poskytnout co nejvěrnější informaci o objektivně existující realitě. Modelování prostorových informací tedy slouží v situacích, kdy nemáme k dispozici reálné údaje o tocích, kdy je chceme vysvětlit či predikovat.

Cílem článku je otestovat možnosti a identifikovat problémy modelování sociálněekonomicky podmíněných prostorových interakcí na území širší oblasti

českých Krkonoš, tedy v rámci biosférické rezervace a větších měst na pomezí Krkonoš a Podkrkonoší, která nelze v kontextu zkoumané problematiky opominout. Článek se po nezbytném stručném teoretickém vstupu zabývá metodikou modelování prostorových interakcí a konstrukcí gravitačního modelu. Gravitační model je pak aplikován v rámci případové studie na silniční dopravu v zájmovém území a kalibrován. Po prezentaci výsledků modelu jsou v závěrečné sekci diskutovány možnosti použití gravitačního modelu v chráněném území a také upozorňujeme na některé problémy spojené s tímto analytickým a predikčním nástrojem.

## Metodika

### Modelování prostorových interakcí

Modelování prostorových interakcí má v humánní geografii dlouhou tradici, která je teoreticky založena především na fyzikálních analogiích vycházejících z Newtonova gravitačního zákona (RAVENSTEIN 1885, ZIPF 1947, STEWART 1948, CARROTHERS 1956, FOTHERINGHAM et al. 2000). Od konce 60. let 20. století se objevují jiné fyzikální analogie vycházející z druhého zákona termodynamiky (WILSON 1967, 1970, 1974), z teorie pohybu (ALONSO 1978), z teorie informací (SNICKARS & WEIBULL 1977, PLANE 1982), které již pracují s pravděpodobností, byť fyzikálně zdůvodňovanou, a tvoří dodnes jeden z konceptuálních rámců (cf. SHEPPARD 1978; SENIOR 1979) modelování prostorových interakcí. Kritika těchto fyzikálních přístupů vedla k prosazování behaviorálních konceptů založených například na prostorovém zpracování informací a prostorové volbě, rozhodování (FOTHERINGHAM 1983, 1986), které tentokrát využívají behaviorálně podmíněné pravděpodobnosti. Tyto pravděpodobnostní modely však potřeby nesnadno dostupné informace o procesech rozhodování jednotlivců, což lze odstranit identifikací (také v konkrétních případech nesnadnou, nedostupnou či nepodloženou) vhodných atributů geografických objektů vyjadřujících atraktivitu, respektive emisivitu (viz dále).

V článku je použit neomezený gravitační model konceptuálně založený na maximalizaci entropie, který je součástí skupiny („rodiny“) interakčních modelů

definované prve WILSONEM (1971), později použité také například FOTHERINGHAMEM & O'KELLYM (1989) a rozšířené POOLEREM (1994). V české geografii jsou gravitační modely diskutovány a aplikovány např. HLAVÍČKOU (1993), KRAFTEM & BLÁZKEM (2012) či KLAPKOU et al. (2013). Gravitační model bez omezení je používán v případech, kdy nemáme informace ani o celkových reálných odchozích, ani o celkových reálných příchozích tocích z (respektive do) geografických objektů (míst, sídel, regionů apod.). Jeho úkolem je tedy modelovat intenzity interakcí mezi páry geografických objektů uspořádaných do čtvercové interakční matice, v tomto případě symetrické, kdy v řádcích jsou uvedeny zdroje (obecně nás zajímá jejich emisivita, schopnost produkovat odchozí tok), ve sloupcích pak cíle (obecně nás zajímá jejich atraktivita, schopnost přitahovat příchozí tok). Kromě interakční matice, jejíž konstrukce je vlastně cílem modelování prostorových interakcí, je ještě nezbytná také čtvercová matice vzdáleností mezi geografickými objekty. Vzdálenost je vlastně forma prostorové separace objektů, může být vyjádřena v délkových, časových či finančních jednotkách a podle Toblerova prvního zákona geografie (TOBLER 1970) má zásadní vliv na intenzitu interakce (viz dále).

### Neomezený gravitační model

Ačkoliv jsou schopnosti predikce neomezeného gravitačního modelu limitovány, je často používán pro svou jednoduchost, ale i v případech nedostatku reálných informací o prostorových tocích (cf. HAYNES & FOTHERINGHAM 1984). Intenzita interakce mezi párem míst  $i$  a  $j$  je funkcí jejich masy vyjádřené zástupnými proměnnými (viz níže) a vzdálenosti mezi nimi:

$$T_{ij} = f(\lambda v_i; \mu w_j; \alpha \beta d_{ij}), \quad [1]$$

kde  $T_{ij}$  vyjadřuje modelovanou intenzitu interakce mezi  $i$  a  $j$ ,  $v_i$  masu (emisní proměnnou) zdroje,  $w_j$  masu (atrakční proměnnou) destinace,  $d_{ij}$  míru prostorové separace mezi  $i$  a  $j$  a kde  $\lambda$ ,  $\mu$ ,  $\alpha$  a  $\beta$  jsou parametry modelu reflektující vztah proměnných k prostorovému vzoru interakcí. Jestliže jsou parametry  $\lambda$  a  $\mu$  rovny 1, což je zdaleka nejčastější případ, lze vztah mezi proměnnými vyjádřit takto:

$$T_{ij} = v_i \times w_j \times f(\alpha \beta d_{ij}), \quad [2]$$

Intenzita interakce je tedy přímo úměrná velikosti mas míst  $i$  a  $j$  a nepřímo úměrná vzdálenosti, která místa  $i$  a  $j$  odděluje. Univerzální masou, tedy zástupnou proměnnou, je počet obyvatel míst  $i$  a  $j$ . Funkce vzdálenosti je tedy vždy negativní, a proto je někdy základní rovnice zapisována takto:

$$T_{ij} = \frac{v_i \times w_j}{f(\alpha \beta d_{ij})}, \quad [3]$$

což je již obdobný zápis jako v případě Newtonova gravitačního zákona. Použití funkce vzdálenosti je jedním ze základních problémů modelování prostorových interakcí, protože různé funkce mohou poskytovat různé výsledky. Rolí vzdálenosti v modelování prostorových interakcí se zabývají například WILSON (1974), SHEPPARD (1978), FOTHERINGHAM (1981), některé vhodné funkce představují TAYLOR (1971), MARTÍNEZ & VIEGAS (2013), HALÁS et al. (2014) či HALÁS & KLAPKA (2015).

Na rozdíl od Newtonova gravitačního zákona, kdy je aplikována klasická mocinná funkce vzdálenosti s parametrem  $\beta = 2$ , tedy  $d_{ij}^2$ , mohou být při modelování socioekonomicky podmíněných prostorových interakcí použity i jiné funkce s jinou hodnotou parametru či s více parametry, protože člověk se nechová podle fyzikálních zákonů. Otázka funkce vzdálenosti je úzce spojena s tzv. kalibrací interakčního modelu. Kalibrace spočívá v takovém odhadu parametrů modelu, který věrně reprodukuje *známé* intenzity toků mezi geografickými objekty a který obtožij v tescch dobré shody. Ke kalibraci modelu tedy potřebujeme hodnoty reálných interakcí. Lze namítnout, proč reálné interakce modelujeme, když je známe. Důvody jsou následující (cf. FOTHERINGHAM & O'KELLY 1989): (a) známe toky jen pro část zkoumaného území, (b) chceme predikovat budoucí situaci, např. dopady plánovaných změn prostorové struktury na interakční vzor, (c) chceme model aplikovat v jiném území.

### Konstrukce gravitačního modelu a jeho kalibrace

Nejprve je třeba učinit tři přípravné kroky. Zaprvé gravitační model je konstruován jako graf (*sensu* teorie grafů) skládající se z vrcholů a hran, které generalizují reálnou dopravní síť. V našem případě jsme

**Tab. 1.** Masy vrcholů grafu. Zdroj: SLDB 2011, ČSÚ; vlastní průzkum.**Tab. 1.** Masses for graph vertices. Source: 2011 census, Czech Statistical Office; research of the authors of the article.

Obec / Municipality	Počet obyvatel / Population	Počet lůžek / No. of beds	Masa celkem / Total mass
Černý Důl	744	1 676	2 420
Harrachov	1 628	5 543	7 171
Horní Maršov	1 054	1 211	2 265
Jablonec nad Jizerou	1 780	919	2 699
Janské Lázně	818	2 452	3 270
Jilemnice	5 651	272	5 923
Lánov	1 734	361	2 095
Malá Úpa	147	1 657	1 804
Mladé Buky	2 223	315	2 538
Pec pod Sněžkou	739	6 642	7 381
Rokytnice nad Jizerou	2 974	3 570	6 544
Rudník	2 247	244	2 491
Svoboda nad Úpou	2 177	711	2 888
Špindlerův Mlýn	1 331	9 361	10 692
Trutnov	31 085	1 640	32 725
Vitkovice	452	477	929
Vrchlabí	12 674	1 134	13 808
Vysoké nad Jizerou	1 297	882	2 179
Žacléř	3 488	470	3 958

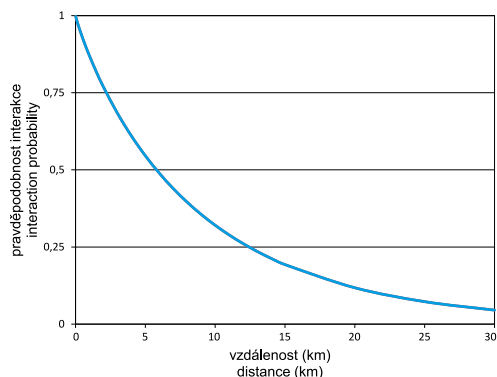
použili silniční síť české části Krkonoš a přilehlého Podkrkonoší po linii Harrachov – Vysoké nad Jizerou – Jilemnice – Vrchlabí – Rudník – Mladé Buky – Trutnov – Královec. Druhým krokem je definice mas, přičemž ne všechny vrcholy musí nezbytně nést masu. V našem případě se jednalo o 19 vrcholů a masou byl součet počtu obyvatel a počtu lůžek za danou obec (Tab. 1). Údaj o počtu obyvatel byl získán ze Sčítání lidu, domů a bytů 2011 (podle trvalého pobytu), údaj o počtu lůžek byl získán vlastním průzkumem a byla sledována pouze hromadná ubytovací zařízení. Databáze hromadných ubytovacích zařízení ČR spravovaná ČSÚ je považována za neúplnou. Je tedy vhodnější získat údaje o počtu lůžek z veřejných internetových zdrojů, případně je získat mailovým či telefonickým dotazem. Do počtu lůžek nejsou zahrnuta lůžka v objektech individuální rekreace, protože poslední relevantní údaje jsou ze SLDB 1991. Od té doby bylo mnoho soukromých chalup a bud v Krkonoších přeměněno na hromadná ubytovací zařízení. Počet lůžek (jako část masy) byl zvolen z toho důvodu, že pouhý počet obyvatel především horských center není v souladu s dopravní zátěží území. Uzly bez masy slouží k aproximaci reálné dopravní sítě a ke korekci dopravních proudů.

Ve třetím kroku je nutné zkonstruovat matici vzdáleností mezi uzly nesoucími masu. Vzdálenosti byly stanoveny v délkových a časových jednotkách pomocí vyhledávače [mapy.cz](http://mapy.cz).

Ve druhé fázi lze přistoupit k výpočtu interakčních intenzit mezi páry míst – uzlů nesoucích masu a ke konstrukci interakční matice. Do rovnice [2] tedy zadáváme hodnoty mas (počet obyvatel + počet lůžek) a funkci vzdálenosti v podobě:

$$f(d_{ij}) = \exp(-\alpha d_{ij}^{\beta}), \quad [4]$$

kde parametry  $\alpha$  a  $\beta$  kontrolují tvar křivky poklesu intenzity interakce se vzdáleností (viz Obr. 1) a jejich hodnota je pro první výpočet nastavena arbitrárně na nulové hodnoty. Jakmile je zkonstruována interakční matice, jsou naloženy všechny vypočtené intenzity párových interakcí na příslušné hrany a následně dochází k sumarizaci hodnot na každé hraně. Tyto hodnoty mohou být vyjádřeny i relativně (v procentech), kdy hrana s nejvyšší intenzitou sumárních interakcí má 100 %. Relativní vyjádření intenzity interakcí má výhodu především pro porovnávání (i grafické) reálných a modelovaných interakcí na jednotlivých hranách grafu.



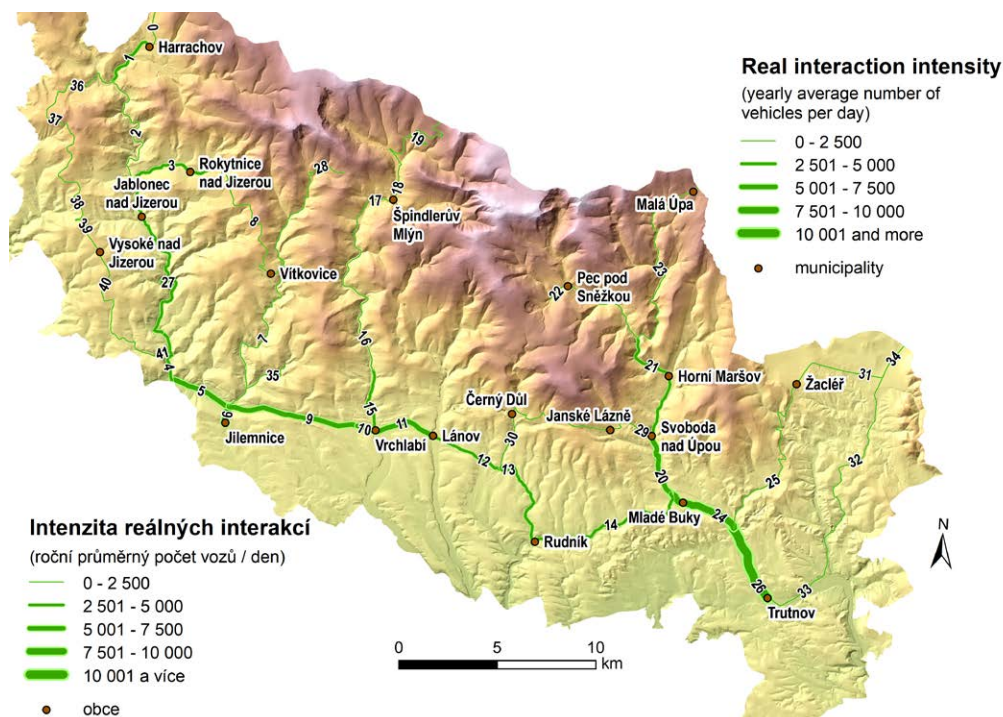
**Obr. 1.** Křivka poklesu intenzity interakce se vzdáleností pro kalibrovaný model.

**Fig. 1.** Distance-decay curve for calibrated model.

Konečně ve třetí fázi je interakcí model kalibrován. Metody kalibrace jsou diskutovány FOTHERINGHAMEM & O'KELLYM (1989). V našem případě volíme principiálně podobný postup, matematicky ovšem zjednodušený. Vlastní kalibrace spočívá v odhadu hodnot parametrů modelu (v našem případě parametrů

funkce vzdálenosti  $\alpha$  a  $\beta$ ) tak, aby modelované interakce co nejvíce odpovídaly reálným tokům. Reálné interakce ve formě celkové intenzity dopravy na relevantních hranách grafu byly zjištěny z Celostátního sčítání dopravy 2010 (<http://scitani2010.rsd.cz> – viz Obr. 2). Cílem kalibrací je, aby se sumární modelované interakce na jednotlivých hranách grafu pomocí testování různých hodnot parametrů  $\alpha$  a  $\beta$  co nejvíce přiblížily statisticky zjištěným hodnotám intenzity dopravy na těchto hranách. Statistické údaje jsou ve zkoumaném území k dispozici pro 41 hran (viz také Obr. 2–4, kde je navíc zobrazen jako hrana i úsek Špindlerův Mlýn – Špindlerova bouda s nulovou intenzitou dopravy), ovšem modelované interakce se týkaly pouze 33 hran, což je vzorek vstupující do kalibrace modelu.

Pro vlastní identifikaci optimálních hodnot parametrů  $\alpha$  a  $\beta$  byl naprogramován skript v jazyce Python. Postupně se procházejí všechny kombinace hodnot parametrů  $\alpha$  a  $\beta$  (po setinách v rozpětí od 0 do 3,99, pro každou iteraci jsou vypočteny sumární modelované intenzity pro každou z 33 hran. Pro zhodnocení



**Obr. 2.** Reálné intenzity dopravy v roce 2010. Zdroj: Celostátní sčítání dopravy 2010 (<http://scitani2010.rsd.cz>).

**Fig. 2.** Real transport intensities in the year 2010. Source: State transport census 2010 (<http://scitani2010.rsd.cz>).

schopnosti modelu predikovat modelované intenzity (tj. závislou proměnnou; nezávislou proměnnou jsou v tomto případě reálné interakce) je použit koeficient determinace ( $R^2$ ), což je čtverec Pearsonova korelačního koeficientu. Iterace skriptu skončí v případě, když už nedochází ke zlepšení hodnoty koeficientu determinace (resp. Pearsonova korelačního koeficientu) v rámci daného rozpětí (u hodnot větších než 3,99 již nelze očekávat zlepšení predikčních schopností modelu).

## Výsledky

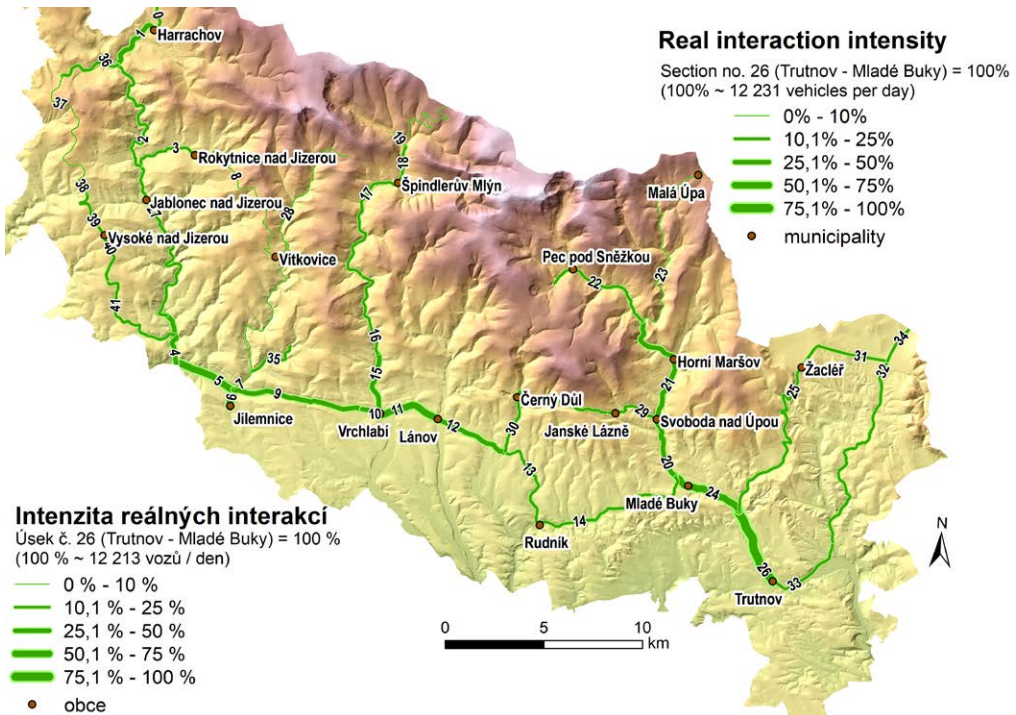
Výsledky výzkumu lze prezentovat ve dvou na sebe navazujících krocích: 1) kalibrace modelu, 2) modelování intenzit interakcí. Co se týče prvního bodu, nejvyšší korelace mezi reálnými a modelovanými intenzitami na hranách grafu reprezentujícího dopravní

síť české části Krkonoš byla dosažena pro hodnoty parametrů  $\alpha = 0,14$  a  $\beta = 0,91$ . Hodnota koeficientu determinace byla 68,42 % a Pearsonova korelačního koeficientu +0,8347, což je zvláště v sociálních vědách považováno za významnou pozitivní korelaci. Po dosažení do vztahu [4] dostáváme tedy tuto funkci vzdálenosti:

$$f(d_{ij}) = \exp(-0,14 \times d_{ij}^{0,91}), \quad [5]$$

podle níž je pokles intenzity interakce se vzdáleností vyjádřen graficky v Obr. 1.

Co se týče druhého bodu, je na úvod nutné poznamenat, že do gravitačního modelu vstupovala délková vzdálenost (v km) i časová vzdálenost (v minutách). Jelikož výsledky byly velice podobné (při použití intervalových intenzit pro mapové zobrazení prakticky totožné), dále tedy prezentujeme pouze model, do kterého vstupovala délková vzdálenost. V modelu s časovou vzdáleností byla hodnota Pearsonova korelačního koeficientu ještě vyšší: +0,8579. V Obr. 2 jsou



**Obr. 3.** Relativizované reálné intenzity dopravy v roce 2010. Zdroj: Celostátní sčítání dopravy 2010 (<http://scitani2010.rsd.cz>), upraveno autory.

**Fig. 3.** Relativized real transport intensities in the year 2010. Source: State transport census 2010 (<http://scitani2010.rsd.cz>), adjusted by authors.

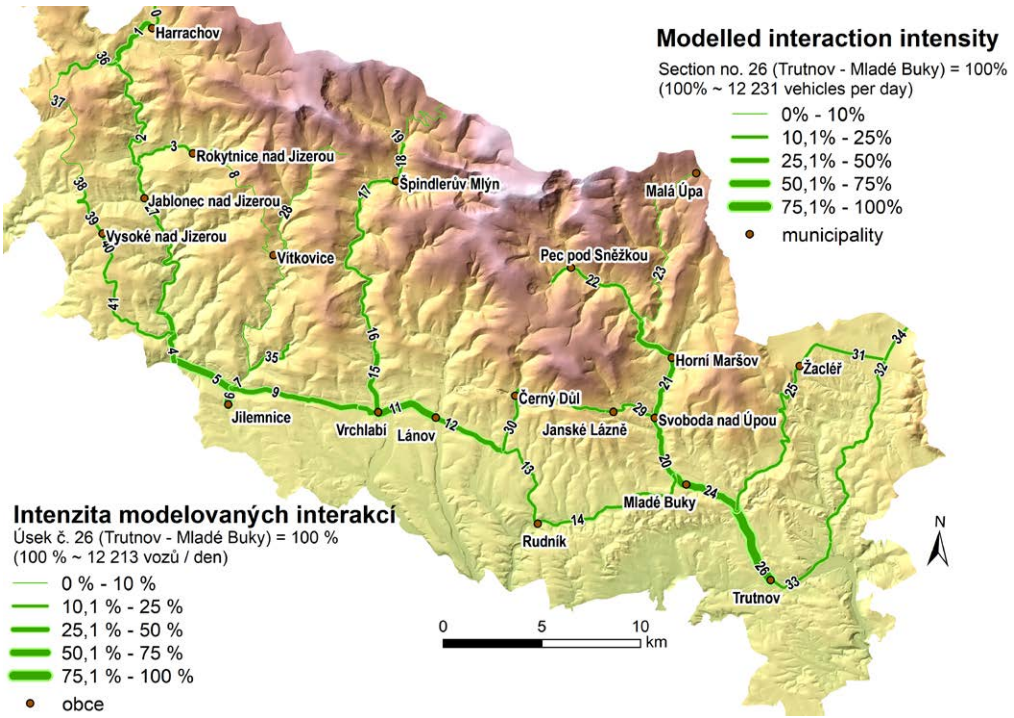
**Tab. 2.** Relativizované reálné a modelované intenzity dopravy na hranách grafu. Zdroj: Celostátní sčítání dopravy v roce 2010 (<http://scitani2010.rsd.cz>), upraveno autory.

**Tab. 2.** Relativized real and modelled transport intensities along graph edges. Source: State transport census in the year 2010 (<http://scitani2010.rsd.cz>), adjusted by authors.

Číslo hrany v obrázcích / No. of edge in figures	Číslo sčítacího úseku / No. of census section	Reálná intenzita (%) / Real intensity (%)	Modelovaná intenzita (%) / Modelled intensity (%)
0	50296	13,37	0,00
1	50290	25,62	12,51
2	52320	17,86	11,49
3	52340	23,78	23,84
4	52336	39,08	20,89
5	50980	52,22	20,89
6	52382	65,28	30,52
7	52370	6,83	2,13
8	52350	2,43	1,31
9	50978	41,64	39,14
10	50979	41,64	39,14
11	50960	52,01	58,55
12	50950	37,13	50,82
13	50940	22,11	28,65
14	53430	21,26	30,76
15	51026	37,99	27,11
16	51027	19,52	27,11
17	51020	19,52	27,11
18	54450	19,52	0,00
19	54760	0,00	0,00
20	51270	48,78	63,93
21	51260	31,01	43,90
22	54460	14,68	27,60
23	53440	7,60	5,41
24	51280	67,74	94,70
25	53450	15,79	18,29
26	51290	100,00	100,00
27	52330	20,48	21,38
28	52360	3,26	0,00
29	54786	13,05	42,74
30	54770	13,05	28,01
31	53460	15,79	0,00
32	53470	15,13	0,00
33	53471	19,59	0,00
34	51180	11,68	0,00
35	52520	10,41	0,00
36	40208	12,47	1,02
37	41440	4,90	1,02
38	51009	4,90	1,02
39	51000	13,20	1,02
40	50990	18,44	8,51
41	55430	11,69	8,51

uvedeny reálné intenzity dopravy podle Celostátního sčítání dopravy 2010 (<http://scitani2010.rsd.cz>). Vůči těmto údajům byl model kalibrován. Pro potřeby komfortnější komparace s modelovanými intenzitami jsou reálné intenzity relativizovány vzhledem k nejsilnější hraně (Obr. 3., Tab. 2).

Výsledky modelování dopravních intenzit na zkoumaném grafu pomocí kalibrovaného gravitačního modelu jsou pak uvedeny v Obr. 4 a v Tab. 2. I zde jsou intenzity relativizovány vůči nejsilnější hraně. Jestliže hodnota koeficientu determinace ( $R^2 = 68,42\%$ ) ukazuje globální spolehlivost gravitačního modelu, lze



Obr. 4. Relativizované modelované intenzity dopravy.

Fig. 4. Relativized modelled transport intensities.

na základě údajů v tabulce 2 a také graficky porovnáním obrázků 3 a 4 zhodnotit lokální spolehlivost. Uvedme dva extrémní příklady. Zatímco v úsecích 3 (křižovatka u Kroupů – Rokytno), 27 (Nová Ves – křižovatka u Kroupů), 8 (Rokytno – Vítkovice) model reprodukuje reálné intenzity dopravy nejspolehlivěji, pak úseky 6 (Jilemnice – Hřabačov), 5 (Hřabačov – Horní Sytová) a 29 (Svoboda nad Úpou – Janské Lázně) představují části grafu, kde byla schopnost modelu reprodukovat reálné intenzity relativně nejhorší.

## Diskuse

Tato sekce je členěna do tří oddílů. V prvním stručně hodnotíme dosažené výsledky, ve druhém diskutujeme možnosti použitého gravitačního modelu a ve třetím se věnujeme možnostem a problémům širší oblasti modelování prostorových interakcí v chráněném území.

Co se týče výsledků, lze říci, že použitý gravitační model bez omezení se podařilo uspokojivě kalibrovat a test dobré shody využívající koeficient determinace ukázal, že globální schopnost modelu reprodukovat reálné interakce je postačující. Model však dosahuje různé lokální spolehlivosti, jelikož odhadnuté parametry modelu jsou prostorově stacionární. Tyto závěry slouží jako základ pro diskusi v následujícím druhém oddílu.

Možnosti využití představeného gravitačního modelu bez omezení, tj. bez znalostí reálných odchodů i příchozích toků z, respektive do vrcholů grafu, se v této podobě týkají pouze dopravních úloh, ale i tak mohou predikovat a analyzovat prostorové interakce v několika směrech. Jmenujme je od jednodušších ke složitějším:

(i) Model může sloužit k odhadu intenzit dopravních interakcí na všech hranách grafu bez ohledu na to, zda známe reálné intenzity interakcí či nikoliv. To se v praxi týká především vedlejších komunikací, které nejsou předmětem sčítání dopravy. Potřebujeme



znát pouze údaje o masách vrcholů a vzdálenostech hran vrcholy spojující.

(ii) Model může sloužit k odhadu přeshraničních dopravních interakcí, respektive k odhadu interakcí v polské části Krkonoš. Tato možnost může řešit buď nedostatek informací o tocích (v zásadě v praxi pouze v relacích Harrachov – Szklarska Poręba, Horní Malá Úpa – Kowary, resp. Kamienna Góra, a Královec, resp. Trutnov – Lubawka) či jiný způsob statistického sledování (metodika sčítání dopravy či jeho četnost a kvalita se může v České republice a Polsku lišit). Údaje o masách (počet obyvatel a lůžek) jsou dobře dostupné pro oba dva státy a jsou zcela jednoznačné.

(iii) V případě, že bychom uvažovali časovou vzdálenost, může model identifikovat změny intenzity dopravy zapříčiněné zrychlením (teoreticky i zpomalením) dopravy mezi vrcholy grafu. V globálnějším pohledu na Krkonoše lze tento efekt očekávat s pokračující dostavbou dálničního spojení Hradce Králové, Trutnova, Královce, Lubawky, Kamienné Góry a Bolkowa, které přinese snadnější a rychlejší dostupnost východních Krkonoš. Naopak uleví výrazně úseku přes Novosvětský průsmyk.

(iv) Model může být parametricky upraven (sice ne snadno) například v případě plánovaného zpoplatnění vybraných komunikací (či jiné formy regulace) a mohou být zkoumány efekty regulace na intenzitu dopravy, respektive na možnosti „přelévání“ dopravy na jiné komunikace (pokud to konfigurace dopravní sítě umožňuje).

(v) Jednoduchou úpravou mas ve smyslu využití lůžkových kapacit během roku, ale i během jednotlivých týdnů (obsazenost ubytovacích zařízení) lze modelovat změny zátěže komunikací v jednotlivých sezónách, respektive během pracovního dne a víkendu, a tomu například přizpůsobit dopravní opatření, včetně plánování dopravní obslužnosti veřejnou hromadnou dopravou. V tomto případě je však nezbytné získat údaje o obsazenosti, což nemusí být snadné.

(vi) Jestliže máme informaci o budování nových lůžkových kapacit (případně o směrných lůžkových kapacitách), model může predikovat budoucí dopravní zátěž a lépe zhodnotit nároky na infrastrukturu i dopravní obslužnost. Totéž lze využít pro hypotetický případ rušení ubytovacích kapacit. V obou posledně jmenovaných případech předpokládáme, že počet obyvatel se nebude výrazněji měnit.

V předchozím oddíle jsme se zabývali pouze silniční dopravou na celkem jednoduché a pro automobilovou dopravu veřejně dostupné dopravní síti Krkonoš, v zásadě na úrovni obcí, za něž jsme měli k dispozici údaje o masách. Při detailnějším pohledu na území Krkonoš se však jeví jako extrémně zajímavá možnost modelování intenzit na turistických trasách, což potvrzují i (bohužel nepublikované) aktivity Správy KRMAP. Zde se však setkáváme s množstvím různě obtížně řešitelných problémů teoretického i praktického rázu, kterým je věnován třetí oddíl.

Zopakujeme, že úlohy tohoto typu řeší na konstruovaném grafu nejlépe gravitační model vyžadující údaje o masách alespoň některých vrcholů a o vzdálenostech mezi vrcholy (délkách hran). Asi nejmenším problémem je podstatně složitější charakter sítě turistických tras v Krkonoších, kterou však lze do grafu převést. Konstrukce matice vzdáleností mezi vrcholy grafu (délkových i časových) je sice pracná, ale proveditelná (u časových údajů je otázka spolehlivosti např. u serveru mapy.cz, roli hraje i směr pohybu a kondice „běžného“ turisty).

Problematická je tedy v tuto chvíli především otázka mas vrcholů grafu. V prezentovaném modelu byla pro zdrojový i cílový vrchol grafu použita zástupná proměnná ve formě součtu počtu obyvatel a lůžek krkonošských sídel. V případě modelování zatížení turistických tras je ovšem nezbytné oddělení mas vyjadřujících emisivitu a atraktivitu jednotlivých vrcholů grafu, stačí si představit relaci Pec pod Sněžkou – Sněžka. Jestliže nemáme informace o odchozích tocích z Pece pod Sněžkou a o příchozích tocích na Sněžku, je nutné najít zástupné proměnné vyjadřující emisivní schopnosti Pece pod Sněžkou a atrakční schopnosti Sněžky. Zatímco v prvním případě lze použít počet lůžek, jejich obsazenost počet parkovacích míst a různé kombinace uvedených zástupných proměnných, vyjádření atraktivity Sněžky je mnohem obtížnějším úkolem. Nabízí se například údaj o počtu přepravených osob lanovkou, který je ovšem uměle regulován a reprezentuje pouze jednu z přístupových cest na Sněžku.

Dalším problémem je, že potřebujeme získat vyjádření atraktivity pro mnohem víc vrcholů grafu, kdy je tato atraktivita objektivně i subjektivně různá a špatně měřitelná: jak vyjádřit atraktivitu tak různých lokalit, jako jsou Sněžka, pramen Labe, Luční bouda, Mumlavský vodopád, Zlaté návrší, Žalý,

Černohorské rašeliniště, Rýchory atp.? Dalším faktorem jsou pak sezonní změny v atraktivitě lokalit. Nezdá se, že by vhodným řešením byly například bodované zátěže vyjadřující atraktivitu lokalit, ať už formou expertních odhadů či získané dotazováním odborníků či návštěvníků Krkonoš. Faktor subjektivity je zde příliš velký, stejně jako nebezpečí zkreslení výsledků.

Pokud bychom chtěli shrnout předcházející úvahy, je pro modelování turistických intenzit nezbytné: (i) rozdělení masy pro zdrojové a cílové vrcholy grafu, (ii) nalézt příslušné vyjádření emisivity a atraktivity vrcholů grafu, (iii) zaměřit se především na problematické atrakční zástupné proměnné.

Jedním ze způsobů jak vyjádřit atraktivitu vrcholu grafu je kalibrace modelu. Problematika kalibrace je však mnohem širší. Jak jsme již uvedli, abychom mohli model kalibrovat, potřebujeme znát turistické intenzity alespoň pro některé hrany v grafu. První a celkem vhodnou možností jsou údaje ze sčítačů provozovaných Správou KRNAP. Teoreticky tedy lze upravovat parametry gravitačního modelu tak, aby modelované intenzity nějakým způsobem korelovaly s naměřenými reálnými intenzitami.

Jsou tu však dva zásadní problémy. Prvním je složitost sítě turistických tras, kdy není jednoznačné, která trasa je optimální. Právě k identifikaci optimální trasy lze použít gravitační model s dvojnásobným omezením, pokud bychom znali reálné odchozí a příchozí toky (tj. dva typy omezení). Druhým problémem je pak odpověď na otázku, co je to optimální? V případě dopravních úloh se uplatňuje výrazně princip minimálního úsilí, kdy obecně mají lidé tendenci volit nejkratší, nejrychlejší či nejlevnější trasu. Ovšem tyto požadavky nelze aplikovat na oblast cestovního ruchu, kdy se volba trasy (pravděpodobně) řídí jinými požadavky a principy, hůře zobecnitelnými (např. možnost výhledů, charakter povrchu, kolize s jinými druhy pohybu po horách, možnosti návratové trasy atp.).

Oba výše uvedené problémy lze částečně řešit za využití analýzy tzv. *big data*, v tomto případě tedy údajů ze sledování mobilních telefonů. Zde by bylo možné identifikovat optimální trasy alespoň mezi některými vrcholy grafu a společně s údaji ze sčítačů by se dalo přistoupit ke kalibraci modelu. Problémem v tomto případě může být topografická přesnost sledování mobilních telefonů. Další možností je pak korekce těchto dat pomocí dotazníkového šetření,

kteřé by mohlo přinést i identifikaci motivů návštěvníků pro volbu trasy.

Modelování turistických intenzit může přinést cenné informace využitelné pro management chráněných území. Krkonoše se jeví jako vhodná lokalita. K již dříve vyjmenovaným třem předpokladům úspěšného modelování přidáváme další podmínky:

(i) Považujeme za vhodné nejprve ověřit možnosti modelování turistických intenzit v menším a z hlediska konstrukce grafu jednodušším zájmovém území.

(ii) Toto území by mělo tvořit logicky uzavřený celek vzhledem k pohybu turistů (např. Rýchory, povodí Úpy nad soutokem se Zeleným potokem, povodí Malé Úpy, povodí Mumlavy nad soutokem s Bílou vodou apod.).

(iii) V území by se měl nacházet dostatečný počet sčítačů turistů a měly by pro něj být dostupné dostatečně podrobné údaje o pohybu turistů podle mobilních telefonů.

(iv) Model se musí podařit kalibrovat takovým způsobem, aby vyhověl testům dobré shody.

Celkem jsme tedy definovali sedm podmínek, které by měly být naplněny, abychom se mohli pokusit řešit problematiku modelování turistických intenzit v Krkonoších. Jestliže by byl pokus úspěšný, lze využít gravitační modelování pro podobné typy úloh, jaké jsme uváděli ve druhém oddíle této kapitoly, což by mohlo drobnou měrou přispět k řešení otázek managementu chráněných území.

## Summary

**Introduction** Basic object of geographical study, the planet Earth, is highly complex and heterogeneous, which holds true also for its regions at various hierarchical levels. The heterogeneity conditions the existence of spatial interactions. We speak of spatial polarity, which induces spatial interactions, either physical geographical or human geographical. In the latter case the exact notion of the spatial distribution of flows need not be easily accessible and detectable. In these cases spatial interaction modelling can be a solution. It is applied if there are no statistical data on flows at our disposal, if we want to explain and predict these flows. The objective of the paper is to test possibilities and to identify problems in the field

of socio-economically conditioned spatial interaction in a broader area of the Krkonoše Mts, including larger towns in the adjacent Podkrkonoší region. After theoretical introduction the paper deals with the methods of spatial interaction modelling and the construction of the gravity model. The gravity model is applied on the road transport in the area and it is calibrated. After the results are presented the concluding section discusses the possibilities of the use of the gravity model in protected area and turns our attention to some problems related to this analytic and predictive tool.

**Theoretical-methodological basis** Spatial interaction modelling has a long tradition in human geography, which is based particularly on physical analogies resulting from Newton's law of gravitation (RAVENSTEIN 1885, ZIPF 1947, STEWART 1948, CARROTHERS 1956, FOTHERINGHAM et al. 2000). Since the end of the 1960s analogies based on the second law of thermodynamics had started to prevail (WILSON 1967, 1970, 1974). The paper uses such a gravity model in its unconstrained form. This variant is used if we have no information both on the real total outgoing and total ingoing flows from/to geographical objects (places, regions, etc.). The task of the model is to estimate interaction intensities among pair of geographical objects stored in square interaction (origin-destination) matrix, rows being the origins and columns the destinations of interactions. Distance matrix has to be constructed as well, where the spatial separation among incident objects is stored.

The intensity of interaction between two geographical objects is a function of their masses and spatial separation between them (equations [1, 2, 3]). In the unconstrained case the masses are expressed through proxy variables denoting the emissivity of origins and the attractiveness of destinations. The use of distance-decay function is one of the crucial factors in the spatial interaction modelling (WILSON 1974, SHEPPARD 1978, FOTHERINGHAM 1981, TAYLOR 1971, MARTÍNEZ & VIEGAS 2013, HALÁS et al. 2014, HALÁS & KLAPKA 2015).

Gravity model is constructed as a graph (*sensu* graph theory) consisting of vertices and edges, which approximate the real transport network (see Fig. 2). Then masses for relevant edges are identified, in our case 19 edges were loaded with the sum of population and number of beds in accommodation facilities (see

Tab. 1). Finally the distance matrix is constructed for pairs of vertices carrying masses. Modelled interaction intensities are computed for the initial parameter values using the equations [3 and 4]. Then the model can be calibrated (see FOTHERINGHAM & O'KELLY 1989) through the optimum estimate of  $\alpha$  and  $\beta$  parameters, which replicates the real interactions best. Coefficient of determination was used as a goodness-of-fit tool between modelled and real interactions.

**Results** The calibration of model produced optimum parameter values as in equation [5] (see also Fig. 1). The coefficient of determination was 68.41% and the Pearson correlation coefficient was +0.8347. Real transport intensities along the edges of the graph are shown in Fig. 2. These are the values to be matched by the modelled estimates. Fig. 3 shows relativized real intensities and Fig. 4 shows relativized modelled intensities. While the coefficient of determination shows the global reliability of the model, Tab. 2 and Figs. 3 and 4 present local variabilities in the model reliability. Note that parameters of the model to be estimated have stationary character. Thus while modelled intensities along edges numbered 3, 27 a 8 present best examples of estimates, modelled intensities along edges numbered 6, 5 and 29 are relatively worst estimates.

**Discussion** We conclude that tested unconstrained gravity model was successfully calibrated and that its ability to replicate real interactions is satisfying.

The model in proposed form can be used to analyse and predict spatial interactions in several ends.

(i) Model is able to estimate transport intensities along all edges of the graph regardless of the knowledge of real interaction.

(ii) Model is able to estimate cross-border interactions and interaction in the Polish part of the Krkonoše Mts.

(iii) If time cost distance is taken into account the model is able to identify changes in transport intensities caused by accelerating (and theoretically slowing down) the traffic.

(iv) Model can be adjusted for the cases of planned tolls or other form or traffic regulation and show its effect of transport intensities.

(v) Simple operations with masses (occupancy of beds during different seasons and different parts of week) can predict the changes in transport intensities,

which can be used in transport planning and demand for public mass transport.

(vi) If we have information on newly planned bed capacities the model is able to predict future transport intensities and its consequences.

What can be of an extreme interest is a more detailed view at the Krkonoše Mts and modelling of tourism intensities along touristic trails. However there are number of more or less difficult problems of both theoretical and practical character. Firstly, network of touristic trails is far more complex than publically accessible road network. Secondly, the question of masses must be solved. Mass (proxy variable) expressing emissivity of origins should be separated from the mass (proxy variable) expressing attractiveness of destinations. The latter case is particularly challenging. Thirdly, the model calibration can be quite difficult, although data from tourist loggers on touristic trails can be used. The complex network of touristic trails does not enable one to identify an optimum path between origin and destination. Moreover, what is an optimum path? Classic assumptions of the shortest, fastest and cheapest path (distance) cannot probably withstand, because the logic of touristic path choice can be grounded on different principles and motives. Both problems can be partially solved by the use of big data, i.e. mobile phone tracking, though the topographic precision can be arguable. Tourism intensity modelling can bring valuable information for the management of protected areas. We suggest that possibilities of tourism intensity modelling be tested in smaller area of interest. This area should represent logically self-contained system with regard to tourism flows. This area should have sufficient number of tourist loggers. The model should be calibrated in order to satisfy goodness-of-fit tests.

## Poděkování

Článek vznikl v rámci projektu IGA UP, č. IGA\_PrF\_2019\_025 „Specifika behaviorálně podmíněných časoprostorových informací: metody jejich analýzy a interpretace“. Autoři děkují Ivaně Saranové za naprogramování algoritmu pro kalibraci parametrů funkce vzdálenosti.

## Literatura

- ALONSO W. 1978: A theory of movement.  
In: HANSEN, N. M. (ed.), *Human Settlement Systems: International Perspectives on Structure, Change and Public Policy*. Ballinger Cambridge (Mass.): 197–211.
- CARROTHERS G. A. P. 1956: An historical review of the gravity and potential concepts of human interaction. *Journal of the American institute of planners* 22, 2: 94–102.
- FOTHERINGHAM A. S. & O'KELLY M. E. 1989: *Spatial interaction models: formulations and applications*. Kluwer London. 244 str.
- FOTHERINGHAM A. S. 1981: Spatial structure and distance-decay parameters. *Annals of the association of American geographers* 71, 3: 425–436.
- FOTHERINGHAM A. S. 1983: A new set of spatial-interaction models: the theory of competing destinations. *Environment and Planning A* 15, 1: 15–36.
- FOTHERINGHAM A. S. 1986: Modelling hierarchical destination choice. *Environment and Planning A* 18, 3: 401–418.
- FOTHERINGHAM A. S., BRUNSDON C. & CHARLTON M. 2000: *Quantitative geography: perspectives on spatial data analysis*. Sage London. 270 str.
- FUSCO G., CAGLIONI M., EMSELLEM K., MERAD M., MORENO D. & VOIRON-CANICIO C. 2017: Questions of uncertainty in geography. *Environment and Planning A* 49, 10: 2261–2280.
- HALÁS M., Klapka P. & KLADIVO P. 2014: Distance-decay functions for daily travel-to-work flows. *Journal of Transport Geography* 35: 107–119.
- HALÁS M. & Klapka P. 2015: Spatial influence of regional centres of Slovakia: analysis based on the distance-decay function. *Rendiconti Lincei – Scienze Fisiche e Naturali* 26, 2: 169–185.
- HAYNES K. E. & FOTHERINGHAM A. S. 1984: *Gravity and spatial interaction models*. Sage London. 88 str.
- HLAVIČKA V. 1993: Teoretická východiska a souvislosti konstrukce gravitačních modelů. *Geografie* 98, 1: 34–43.

- JENIK J. 1961: Alpinská vegetace Krkonoš, Kralického Sněžníku a Hrubého Jeseníku: teorie anemo-orografických systémů. Nakladatelství ČSAV Praha. 412 str.
- KLAJKA P., ERLEBACH M., KRÁL O., LEHNERT M. & MIČKA T. 2013: The footfall of shopping centres in Olomouc (Czech Republic): An application of the gravity model. *Moravian geographical reports* 21, 3: 12–26.
- KRAFT S. & BLÁŽEK J. 2012: Spatial interactions and regionalisation of the Vysočina Region using the gravity models. *Acta Universitatis Palackianae Olomucensis, Facultas Rerum Naturalium, Geographica* 43, 2: 65–82.
- MARTÍNEZ L. M. & VIEGAS J. M. 2013: A new approach to modelling distance-decay functions for accessibility assessment in transport studies. *Journal of Transport Geography* 26: 87–96.
- PLANE D. A. 1982: An information theoretic approach to the estimation of migration flows. *Journal of Regional Science* 22, 4: 441–456.
- POOLER J. 1994: An extended family of spatial interaction models. *Progress in Human Geography* 18, 1: 17–39.
- RAVENSTEIN E. G. 1885: The laws of migration. *Journal of Royal Statistical Society* 48: 167–235.
- SENIOR M. L. 1979: From gravity modelling to entropy maximising: a pedagogic guide. *Progress in Human Geography* 3, 2: 174–210.
- SHEPPARD E. S. 1978: Theoretical underpinnings of the gravity hypothesis. *Geographical analysis* 10, 4: 386–402.
- SNICKARS F. & WEIBULL J. W. 1977: A minimum information principle. *Regional Science and Urban Economics* 7, 1–2: 137–168.
- STEWART J. Q. 1948: Demographic gravitation: evidence and applications. *Sociometry* 11, 1/2: 31–58.
- TAYLOR P. J. 1971: Distance transformation and distance decay function. *Geographical Analysis* 3, 3: 221–238.
- TOBLER W. 1970: A computer movie simulating urban growth in the Detroit region. *Economic geography* 46 Supplement: Proceedings. International Geographical Union, Commission on quantitative methods, 234–240.
- WILSON A. G. 1967: Statistical theory of spatial distribution models. *Transportation Research* 1: 253–269.
- WILSON A. G. 1970: Entropy in urban and regional modelling. Pion London. 166 str.
- WILSON A. G. 1971: A family of spatial interaction models, and associated developments. *Environment and Planning* 3, 1: 1–32.
- WILSON A. G. 1974: Urban and regional models in geography and planning. Wiley London. 418 str.
- ZIPF G. K. 1947: The hypothesis of the 'minimum equation' as a unifying social principle: with attempted synthesis. *American Sociological Review* 12, 6: 627–650.

