

Milan KOREŇ

PRIESTOROVÉ MODELY KRAJINY

Koreň M.: Spatial models of landscape. Kartografické listy 2004, 12, 1 fig., 26 refs.

Abstract: The model is defined as mapping from source to target domain, which preserves some of the structure (morphism). There are two main categories of computer models of landscape: object-based models (vector) and field-based models (raster). From the point of view of mathematical theory the field-based models can be described by the set of functions (landscape's characteristics, fields). Consecutively, the spatial operators of computer models can be expressed in terms of well-defined mathematical operations (composition, distance, classification, approximation, interpolation, etc.). Abstract spatial models are associated with higher level of abstraction, universality and independence from specific computer implementation.

Keywords: geographic information, landscape, spatial models, time, space, field-based models, vector fields, object-based models, morphism

Úvod

Tvorba a ochrana životného prostredia, environmentálne databázy, optimalizácia využitia prírodných zdrojov, vplyv ľudskej činnosti na životné prostredie, monitoring prírodného prostredia sú podnetom na vytvorenie mnohých geografických databáz a modelov krajiny. Vytvorené počítačové simulácie integrujú rôzne priestorové premenné a sú základom pre krátkodobé až dlhodobé modely krajinných systémov. Najvhodnejším prostriedkom pre analýzu priestorových javov v krajine je geografický informačný systém. Umožňuje zber, zhromažďovanie, uchovávanie, spracovanie aj poskytovanie geografických informácií. V jeho prostredí vytvárame počítačové modely (simulácie) krajiny.

Pretože počítač je konečnostavový automat s konečnou pamäťou, pri vytváraní počítačového modelu je potrebné zvoliť vhodný spôsob diskretizácie spojitého priestoru a času. V súčasnosti sa používajú dva základné spôsoby diskretizácie priestoru: reprezentácia prostredníctvom vektorových objektov a rozklad územia do rastra. Vektorový model korešponduje s objektovým prístupom, rastrový zodpovedá reprezentácií krajiny prostredníctvom polí.

Pri tvorbe vektorového modelu vychádzame z množiny geometrických primitív (bod, línia, polygón), ktorými sa reprezentujú základné prvky krajiny. Medzi týmito objektmi sa definujú topologické vzťahy (líniová a plošná topológia). S použitím topologických vzťahov sa zo základných objektov potom vytvárajú zložené geometrické objekty (množiny bodov, líniové siete, množiny polygónov – regióny). Rozlíšenie vektorového modelu je dané reprezentáciou čísla.

Rastrové modely (spravidla) predstavujú pravidelný rozklad územia na sieť buniek obdĺžnikového tvaru. Každéj bunke je priradená hodnota, ktorá reprezentuje hodnotu areálu danej bunky. Okrem susedstva sa v rastrových modeloch nepoužívajú topologické vzťahy. Rozlíšenie rastrového modelu je dané veľkosťou bunky, ktorá je tiež limitovaná počítačovou reprezentáciou čísla.

V praktických aplikáciách je rozlíšenie počítačového modelu navyše limitované rozlíšením meracích prístrojov, mapovými podkladmi a spôsobom ich vektorizácie. Komerčne dostupné geografické informačné systémy ponúkajú širokú paletu metód pre spracovanie rastrových aj vektorových údajov.

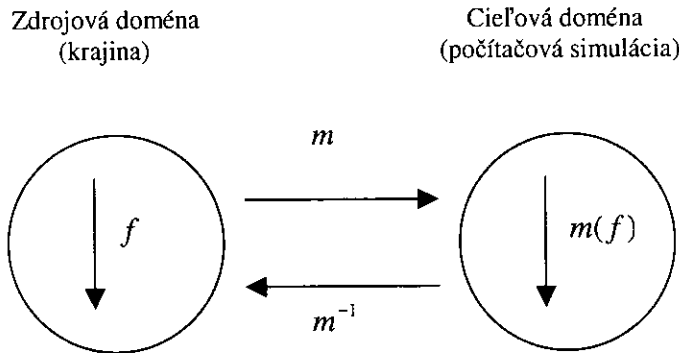
Priestorové (geografické) modely

Krajina je predmetom štúdia celého radu rôznych disciplín z ktorých každá sa zaoberá špeci-
fickými problémami a používa vlastné postupy a pojmový aparát (Mazúr a Urbánek 1982). Forma-
lizácia pojmov musí vychádzať zo všeobecne prijatých konceptov priestoru a času v geografii. Po-
užívané geografické a krajinnno-ekologické pojmy je potrebné presne definovať a následne nájsť
vhodné matematické štruktúry pre ich reprezentáciu. Vzťahy pre výpočet a modelovanie krajiny
potom bude možné definovať na úrovni abstraktného (matematického) modelu krajiny. Tým sa
dosiahne vyššia všeobecnosť a abstraktnosť modelov, ktorých formulácia bude nezávislá od kon-
krétnej počítačovej implementácie.

Teória modelovania je úzko spojená s rozvojom teórie systémov. V slovenskej a českej litera-
túre sa problematika modelovania prírodných a socio-ekonomických systémov rozoberá hlavne
v súvislosti so systémovým prístupom (Krcho 1981, Štach, 1982, Habr a Vepřek 1986, Oboňa,
1990 a ďalší). V nadväznosti na matematickú teóriu systémov (Bertalanffy 1968) boli vypracované
teórie modelov a modelovania. Medzi najviac teoreticky prepracované patria práce Zeiglera (1976)
a Castiho (1989).

Modelom nazývame obraz zobrazenia, ktoré zobrazuje zdrojovú doménu do cieľovej (Oboňa
1990). Prvkami zdrojovej domény sú objekty, vzťahy, funkcie, procesy, alebo iné javy, ktoré sú
predmetom nášho záujmu (Worboys 1995). Tieto sa modelom transformujú do cieľovej domény,
kde ich analyzujeme a skúmame. Dôležitou vlastnosťou modelu je, že získané výsledky je možné
späťne aplikovať na zdrojovú doménu. Modelovaním napodobňujeme štruktúru a správanie reál-
nych alebo abstraktných systémov (Štach 1982). Model a údaje reprezentujú podstatné vlastnosti
reality. Operácie a pravidlá zodpovedajú procesom a vzťahom v reálnom svete. Užitočnosť mode-
lu posudzujeme podľa jednoduchosti prenosu výsledkov medzi doménami a ich vzájomnej koreš-
pondencii.

Zobrazenia, ktoré zachovávajú štruktúru a operácie sa v matematike nazývajú morfizmami a sú
predmetom štúdia teórie kategórií. Proces modelovania ako morfizmu medzi zdrojovou a cieľovou
doménou je zachytený na obr. 1.



Obr. 1. Modelovanie ako morfizmus m zdrojovej domény do cieľovej
(upravené podľa Worboys, 1995)

Zdrojovú doménu modelujeme morfizmom m , ktorý vlastnosť (funkciu) f zdrojovej domény
transformuje na vlastnosť (funkciu) $m(f)$ v cieľovej doméne. Modelovací morfizmus slúži na
zjednodušenie a abstrakciu zdrojovej domény do cieľovej. Výsledky výpočtov a vzťahy zistené
v cieľovej doméne potom späťne interpretujeme prostredníctvom inverzného morfizmu m^{-1} . Dia-
gram je komutatívny, čo zapíšeme ako $m^{-1} \circ m(f) \circ m = f$, alebo aj v tvare $m(f) \circ m = m \circ f$.

Práve komutatívnosť diagramu umožňuje spätnú interpretáciu výsledkov odvodených v cieľovej doméne modelu.

Modely môžeme klasifikovať do tried podľa viacerých kritérií. Z hľadiska účelu a použitia sa modely rozdeľujú spravidla na (Štach 1982, Oboňa 1990): analytické, predikčné (prognostické), rozhodovacie, optimalizačné, ostatné. Podľa spôsobu modelovania a druhu cieľovej domény rozlišujeme materiálne (fyzické) a formálne (abstraktné) modely (Štach 1982).

U materiálnych (fyzických) modelov je cieľová doména vybraný fyzikálny systém, v ktorom môžeme vhodným spôsobom modelovať prvky a vzťahy zdrojovej domény. Materiálne modely sa často používajú pri konštrukcii automobilov, lietadiel, mostov, budov, u ktorých sa najskôr vyrobí maketa navrhovanej konštrukcie a skúmajú sa jej vlastnosti napr. v aerodynamickom tuneli.

Najčastejším fyzickým modelom krajiny používaným v geografii a krajinnej ekológii je mapa. Mapa je kartografickým modelom krajiny (Krcho 1981). V procese tvorby mapy kartograf cieľavedome vyberá objekty reálnej krajiny, ktoré potom zobrazuje do projekčnej roviny. Využíva pritom výrazové prostriedky a jazyk mapy (Pravda, 1985, 1987). Užívateľia predpokladajú, že mapové dielo zachováva geometrické vlastnosti objektov: ich vzájomnú polohu, tvar, susedstvo, dĺžky, výmeru, smery (uhly). Na základe týchto predpokladov sa mapa dá využiť na meranie výmery, vyhľadávanie ciest, zaznamenávanie nových javov, k štúdiu priestorových vzťahov, vlastností objektov ap. Pretože rôzne kartografické zobrazenia zachovávajú odlišné geometrické vlastnosti (dĺžka, výmera, uhly), pri používaní mapy je nutné brať do úvahy charakter použitého kartografického zobrazenia, ako aj účel zhotovenia mapy, na základe ktorého boli vybrané a zobrazené objekty reálnej krajiny. Mapa nie je absolútne presným obrazom krajiny, ale modelom zhotoveným k špecifickému účelu.

Medzi fyzické modely zaraďujeme aj počítačové modely, ktoré sú realizované prostredníctvom výpočtovej techniky. Počítačové modely sú tesne previazané s matematickými. Využívajú matematickú formuláciu problému, ako aj prostriedky matematiky na riešenie problému. V geografickom informačnom systéme sa geometrické objekty mapy reprezentujú vhodnými štruktúrami údajov, ktoré sa zoskupujú do tematických vrstiev a prepájajú s popisnými údajmi.

Abstraktné (formálne) modely na opis modelu používajú formálny aparát vybudovaný nad systémami symbolov a pravidiel pre spájanie symbolov. Verbálny model je tvorený množinou slovných tvrdení a grafických opisov, ktoré opisujú objekty, ich stavy aj vzťahy medzi objektmi navzájom.

Špeciálnym prípadom abstraktných modelov sú matematické modely, ktoré používajú prostriedky a metódy matematiky. Matematický aparát sa používa dvojakým spôsobom: ako jazyk, ktorým opisujeme študovaný predmet, a ako nástroj, ktorý používame pri štúdiu predmetu a hľadani riešenia. Matematické modely majú oproti verbálnym niekoľko výhod (Štach 1982). Ich presnejšia logická štruktúra umožňuje jednoznačné vyjadrovanie, sú univerzálne, opakovateľné, umožňujú odvoditeľnosť a realizáciu prostriedkami výpočtovej techniky (Oboňa 1990). Vo verbálnych modeloch sú objekty zjednodušené. Matematické modely umožňujú hlbšie pochopiť štruktúru a správanie sa systému. Podľa použitého matematického aparátu sa matematické modely rozdeľujú na (Štach 1982, Habr a Vepřek 1986, Oboňa 1990, Kemp 1993): spojité a diskrétné, dynamické a statické, priestorové a nepriestorové, deterministické a nedeterministické (stochastické), lineárne a nelineárne, redukcionistické a holistické.

V dynamických modeloch je prítomný časový komponent, ktorý umožňuje sledovať ich vývoj v čase. Pri štúdiu ekologických procesov sa často používajú aj dynamické nepriestorové modely, napr. pri modelovaní trofických reťazcov, alebo skúmaní vývoja populácií.

Ak niektorá premenná (resp. prechodová funkcia) môže súčasne nadobúdať viacej hodnôt, a to s určitou pravdepodobnosťou, potom hovoríme o stochastickom modeli. Môžu byť definované napríklad sústavou stochastických diferenciálnych rovníc alebo stochastických distribučných funkcií. Redukcionistické modely sa snažia obsiahnuť čo najväčšie množstvo detailov a vzťahov. Na dru-

hej strane holistické modely maximálne využívajú abstrakciu, zjednodušenie a model opisujú na všeobecnej úrovni.

Za deterministické sa považujú modely, ktorých správanie sa je jednoznačne určené ich stavom a okolím (Habr a Vepřek 1986). Ak sú opísané sústavou diferenciálnych rovníc, tak každým bodom fázového priestoru prechádza práve jedna trajektória. Prechodová funkcia determinického modelu je jednoznačné zobrazenie. Deterministický model je lineárny práve vtedy, keď všetky jeho funkcie sú lineárne. Dajú sa ďalej členiť na algebraické, diferenciálne a diferenčné. Nelineárne deterministické modely sú opísané nelineárnymi rovnicami. Podľa druhu použitých rovníc rozlišuje Oboňa (1990) konvexné, parabolické, hyperbolické a iné nelineárne deterministické modely.

Aj deterministické dynamické modely sa môžu správať zložito. U všetkých nelineárnych dynamických modelov s dvomi a viac stupňami voľnosti sa môže vyskytovať chaotické správanie. Pri určitých parametroch riešenie nekonverguje k očakávanej hodnote, ale sa chaoticky mení. Toto správanie nezávisí na presnosti výpočtov, ale je vlastné samotnému modelu (Horák a Krlín 1996). Štúdium správania sa týchto modelov sa rozvinulo až s nástupom modernej výpočtovej techniky. Výkonné počítače sa používajú na numerické experimenty v oblasti fyziky, biológie, chémie, sociológie, geografických aj ekologických vied.

Modely v ktorých je prítomná priestorová zložka sa nazývajú priestorové. Pre oblasť geografie a krajinskej ekológie sú zvlášť významné dynamické priestorové modely, pomocou ktorých modelujeme krajinný systém a jeho podsystémy. Ich praktické využitie je veľmi rozmanité. Dajú sa využiť napríklad: pre hodnotenie potenciálu krajiny a plánovanie jej využitia (napr. tvorba územných systémov ekologickej stability, krajinné plánovanie, územné plánovanie), pre potreby rezortného plánovania (v lesnom hospodárstve, vodohospodárstve, poľnohospodárstve ap.), pre interpretáciu a analýzu údajov z monitorovania (znečistenie ovzdušia, vodných tokov a nádrží, pôd, priemyselné havárie), pre odhad environmentálnych rizík (napr. pri posudzovaní vplyvov na životné prostredie).

Z formálneho opisu procesu modelovania vyplýva rozdielnosť významu pojmov: správnosť a presnosť modelu (Worboys 1995). Správnosť (*accuracy*) sa vzťahuje na vyjadrenie stupňa vernosti a výstižnosti, akým cieľová doména zodpovedá zdrojovej (aplikačnej). Pri posudzovaní správnosti modelu je potrebné uvážiť, či sú zachytené všetky dôležité objekty, ich vlastnosti (atribúty), priestorové vzťahy, súvislosti a podobne. Presnosť (*precision*) sa vzťahuje na rozlíšenie (precíznosť) s akým môžeme vykonávať merania v cieľovej doméne používaného modelu. Rozlíšenie je najmenšie možné meranie, ktoré dokážeme vykonať v doméne.

Každý model má určité nedostatky a odlišuje sa od aplikačnej domény (inak by bol samotnou aplikačnou doménou). Vždy je preto potrebné počítať s chybami spôsobenými správnosťou (vernosťou) a presnosťou modelu. Geografické modely navyše obsahujú priestorovú zložku. Určenie kvantitatívnych chýb správnosti a presnosti tejto zložky je komplikovaný problém. Chyby sa šíria rýchlo a môžu výrazne ovplyvniť výsledky výpočtov a modelovania. V geografických modeloch rozlišuje Chrisman (1991) štyri druhy chýb: polohové chyby, chyby popisných údajov, chyby konzistencie údajov, chyby úplnosti modelu.

Pri vytváraní matematických a počítačových priestorových modelov krajiny je potrebné zohľadňovať (Kemp 1993): komplexnosť modelovaného javu, procesu (reálneho sveta), nepresnosť meraní, nevyhnutné aproximácie, neúplnosť a nepresnosť hypotéz.

Abstraktné modely krajiny

Krajinný systém (sféra), ako špeciálny druh geosystému, je hybridný časovo-priestorový, látково-energetický a informačný systém (Mičian a Zatkalk 1990), ktorý pozostáva zo svojich podsystémov. Z hľadiska teórie systémov môžeme ho vyjadriť nasledovne (Krch 1977, 1979, 1981, 1990):

$$S_G = \{S_{FG}, S_{AG}\}, \quad (1)$$

kde S_{FG} je fyzicko-geografický podsystem a S_{AG} socio-ekonomický. Okolie systému S_G budeme označovať S_O . Fyzicko-geografický systém S_{FG} a socio-ekonomický systém S_{AG} môžeme ďalej dekomponovať na podsystemy druhého rádu.

Pod pojmom „krajina“ (geografická krajina) rozumieme konkrétnu časť zemského povrchu vhraničenú na základe zvoleného kritéria (Mičian a Zatkalk 1990). V tejto práci budeme túto konkrétnu časť zemského povrchu reprezentovať otvoreným dvojrozmerným intervalom:

$$L = (x_0, y_0) \times (x_1, y_1), \quad (2)$$

ktorý je podmnožinou dvojrozmerného euklidovského priestoru E^2 s definovaným pravouhlým súradnicovým systémom. Tento interval nazývame „územie“.

Systemový prístup znamená vytvorenie určitého konceptuálneho modelu krajiny, pri ktorom sa vymedzujú podsystemy a samotné prvky krajiny, ktoré sa oddeľujú od okolia. Prvky krajiny sa nachádzajú v istom stave. Medzi prvkami navzájom ako aj s okolím krajiny existujú väzby. Skúmať štruktúru (a rozmanitosť) krajiny predstavuje skúmať štruktúru (a rozmanitosť) systému, jeho podsystemov, prvkov, väzieb a stavov.

Naproti tomu územie predstavuje len dvojrozmerný priestor, do ktorého sa premietajú jednotlivé objekty a ich vlastnosti. V priemete do územia sa takto môže odraziť len časť štruktúry a rozmanitosti krajiny ako systému. Pri štúdiu rozmanitosti územia preto skúmame len priestorovú časť rozmanitosti krajinného systému.

Z hľadiska precíznosti je potrebné rozlišovať pojmy „územie“ (vybraná časť zemského povrchu) a „krajina“ (krajinný systém). Vlastnosti krajiny závisia od štruktúry, stavu a funkcií krajinného systému. Vlastnosti územia vyjadrujú rozloženie určitého parametra v závislosti od polohy v území. V geografických a krajinnno-ekologických prácach sa však krajina vždy chápe ako priestorový systém a termín „územie krajiny“ nie je zaužívaný.

Pre aplikácie geografických informačných systémov a počítačové simulácie, predstavuje územie časť projekčnej roviny, do ktorej sa vhodnou kartografickou transformáciou zobrazuje referenčný elipsoid. Na ňom je spravidla definovaný systém zemepisných (geodetických) súradníc, ktoré sú reprezentované zemepisnou šírkou φ a zemepisnou dĺžkou λ . Kartografické zobrazenie k je potom definované na podmnožine zemepisných súradníc, ktorú zobrazuje do dvojrozmerného (resp. trojrozmerného) euklidovského priestoru:

$$k: U \rightarrow E_2 (E_3), \text{ kde } U \subseteq [-90^\circ, 90^\circ] \times [0^\circ, 360^\circ). \quad (3)$$

Pod štruktúrou územia v zmysle Kozovej (1980) rozumieme priestorovú stavbu krajinného systému, t. j. všeobecný kvalitatívne a kvantitatívne určený poriadok (usporiadanie) priestorových závislostí a väzieb medzi podsystemami krajinného systému. Medzi štruktúrou konkrétneho územia a procesmi ktoré v ňom prebiehajú existujú silné obojstranné väzby. Priestorové usporiadanie ovplyvňujú abiotické podmienky, distribúcia prírodných zdrojov, avšak aj trofické vzťahy, vitalita spoločenských a antropické aktivity.

Pri analýze štruktúry územia vychádzame z troch základných typov priestorových údajov: bod, línia, plocha (polygón). Z tohto hľadiska je potrebné odlišovať štruktúru bodových údajov, štruktúru líniových sietí, štruktúru priestorových jednotiek (areálov, regiónov ap.).

Bodové údaje sa v geografickom a ekologickom výskume vyskytujú pomerne často, hlavne v oblastiach kde predmetom záujmu sú konkrétne individuálne prvky a objekty. Môže ísť napr. o jednotlivé stromy lesného porastu u ktorých sa sleduje ich rozmiestnenie, vzájomné ovplyvňovanie, napadnutie hmyzom a priestorová distribúcia týchto javov.

Líniové siete reprezentujú líniové objekty krajiny, ktoré sa prenikajú v uzloch. V reálnej krajine nachádzame množstvo líniových sietí, napr. riečna sieť, cestná sieť, železničná sieť, rôzne inžinierske siete. Na ich analýzu sa používajú metódy sieťovej analýzy. Skúma sa hustota sietí, prepojenie a dostupnosť jednotlivých uzlov, existencia náhradných ciest, vytváranie okruhov ap.

Priestorové jednotky zobrazujeme prostredníctvom tematických máp (kategórií). Každá tematická mapa (kategória) zvyčajne pozostáva z viacerých kategórií, z ktorých každá sa skladá z množiny vzájomne sa neprekrývajúcich priestorových areálov. Areál reprezentuje súvislú časť územia, ktorá je vnútorne homogénna vzhľadom na zvolené kritérium.

Pri analýze priestorovej štruktúry sa na krajinu a jej prvky môžeme pozeráť na rôznych úrovniach. Z hľadiska rozsahu a miery môžeme parametre (charakteristiky) sledovať a počítať na troch hlavných úrovniach: areálu, triedy, kategórie (tematickej vrstvy).

Počítačové modely krajiny

Priestor, čas aj vlastnosti objektov modelu sú spojité veličiny. Ak s nimi model narába ako so spojitými, potom hovoríme o spojitom modeli. Pretože počítače sú konečnostavové zariadenia s obmedzenou pamäťou, realizácia počítačových modelov si vyžaduje diskretizáciu priestoru, času i popisných údajov. Na formálne vyjadrenie modelov sa používajú prostriedky diskretnej matematiky. Spôsob diskretizácie závisí od účelu modelu, použitých metódach tvorby modelu, požiadavkách na presnosť a správnosť modelu.

Pre modelovanie priestorových javov v geografii a krajinnej ekológii sa v odbornej literatúre (Peuquet 1988, Worboys 1995) rozlišujú dve základné triedy konceptuálnych počítačových modelov: modelovanie prostredníctvom polí (field-based models) a objektové modely (object-based models).

Modely založené na poliach zobrazujú geografické údaje ako množinu priestorových distribúcií popisných údajov, ktoré ako matematické funkcie zobrazujú priestorový rámec do oboru hodnôt. Priestorovým rámcem sa nazýva rozklad územia na konečný počet množín. Priestorovým poľom je potom každá vypočítateľná funkcia z rozkladu územia do vhodného konečného oboru hodnôt. Modelom sa nazýva každá konečná množina vypočítateľných priestorových polí (Worboys 1995).

Typickým predstaviteľom modelov založených na poliach sú rastrové modely, ktoré používajú pravidelný obdĺžnikový alebo štvorcový rozklad územia. Pole je reprezentované ako rastrová tematická vrstva. Pretože priestorový rámec má pravidelnú a konečnú štruktúru je potrebné vzorkovanie sledovaného javu. Procesom vzorkovania sa do rastrového modelu nutne zavádzajú chyby správnosti aj presnosti.

Ďalším zástupcom modelov založených na poliach je nepravidelná trojuholníková sieť (TIN, triangulated irregular network). Nepravidelné trojuholníkové siete sa používajú hlavne na reprezentáciu digitálnych modelov georeliéfu (Krcho 1990, 2001). Na nepravidelných trojuholníkových sieťach je možné vykonávať výpočty, alebo ich vhodným algoritmom transformovať na rastrové alebo vektorové modely (bodové pole, vrstevnice, spádnice ap.).

Objektovo založené modely najskôr na základe hodnôt popisných údajov definujú objekty, ktorým sa potom priradí ich poloha v priestore. Tým vzniká nepravidelný rozklad územia. V počítačovom prostredí sa tieto objekty implementujú ako základné geometrické objekty: bod, línia, polygón.

Podobnosť modelov spočíva v rozklade územia na geometrické objekty určitého typu. Okrem rozdielu medzi pravidelným rozkladom rastrových modelov a nepravidelným rozkladom vektorových modelov, hlavný rozdiel spočíva v odlišnom postupe tvorby rastrového a vektorového modelu. V rastrových modeloch, alebo nepravidelných trojuholníkových sieťach areálu (bunke rastra) priradíme hodnotu (vlastnosť). Vo vektorových modeloch objektom vymedzeným na základe ich vlastností priradíme polohu v priestore. V rastrových modeloch nepracujeme s objektmi, len

s priestorovými distribúciami hodnôt (vlastností). Vo vektorovom modeli je objekt jednoznačne identifikovateľná entita s ktorou môžeme manipulovať (napr. posúvať). V rastrovom modeli zodpovedá polohe jedného objektu zvyčajne niekoľko buniek rastra, ktoré sa však nepovažujú spolu za jeden celok.

Modely založené na poliach sú výhodné v situáciách, pri ktorých potrebujeme vykonávať výpočty. Ťažko nahraditeľné sú napríklad v oblasti počítačového spracovania leteckých a družicových snímkov, modelovania kontaminácie pôdy, znečistenia ovzdušia, erózie pôdy ap.

Naproti tomu na budovanie rozsiahlych geografických databáz sú vhodnejšie objektové modely, ktoré priamo pracujú s objektmi a ich vlastnosťami. Vyhľadávanie a triedenie objektov je v objektových modeloch omnoho efektívnejšie ako v modeloch založených na poliach. Aj metódy sieťovej analýzy je jednoduchšie implementovať a vykonať nad vhodným objektovým modelom líniových sietí.

Modely založené na poliach a objektové modely sa dajú kombinovať a tým využívať výhody oboch prístupov. Boli vyvinuté postupy pre transformáciu modelov založených na poliach na objektové modely a opačne. Tieto transformácie sú vo väčšine prípadov možné, avšak sú časovo náročné a dochádza pri nich k strate presnosti a správnosti modelov. Podobne pri výpočtoch nad modelmi založenými na poliach je potrebné zabezpečiť aby všetky polia boli definované nad rovnakým priestorovým rámcom. Ak nie sú definované, je nevyhnutné polia prevzorkovať.

Modely založené na poliach aj objektové modely predstavujú triedy konceptuálnych počítačových modelov, ktoré sú nezávislé na konkrétnej implementácii vo výpočtovom prostredí. V súčasnosti existuje viacero spôsobov efektívnej implementácie rastrových aj vektorových modelov. Rozpracované sú aj vhodné štruktúry údajov a algoritmy práce s týmito údajmi (napr. Samet 1989).

Modelovanie krajiny prostredníctvom polí

V prírodovedných disciplínach, hlavne vo fyzike, sa na opis a modelovanie veličín často používajú vektorové funkcie. Vektorovým poľom sa nazýva zobrazenie:

$$v : L \rightarrow R^n, \quad (4)$$

kde R označuje množinu reálnych čísel. Vektorové funkcie sú vhodné v prípadoch, keď veličina sa dá v každom bode opísať vektorom reálnych čísel. Takto definovaná funkcia sa potom nazýva vektorové pole (Moravský et. al 1992).

Okrem vektorových funkcií sa zaviedli skalárne funkcie, resp. skalárne polia. Rozumie sa tým každé zobrazenie územia (oboru hodnôt) do množiny reálnych čísel.

Vektorové pole v môžeme rozložiť na jeho skalárne zložky:

$$v_i : L \rightarrow R, \quad (5)$$

a zapísať ho:

$$v(x) = (v_1(x), v_2(x), \dots, v_n(x)). \quad (6)$$

Na vyjadrenie vlastností krajiny sú potrebné aj iné ako reálne funkcie. Z tohto dôvodu použijeme rozšírenú definíciu skalárneho poľa. Skalárnym poľom potom nazývame každú funkciu, ktorá zobrazuje územie L do vhodne zvoleného oboru hodnôt:

$$s : L \rightarrow D, \quad (7)$$

kde D je zvolený obor hodnôt skalárneho poľa. Ak obor hodnôt je podmnožina reálnych čísiel, potom ho budeme nazývať reálnym skalárnym poľom.

Obdobne vektorovým poľom nazývame každú funkciu, ktorá zobrazuje územie L do karteziánskeho súčinu vhodne zvoleného konečného počtu oborov hodnôt:

$$v : L \rightarrow D_1 \times D_2 \times \dots \times D_n, \quad (8)$$

Ak všetky obory hodnôt sú podmnožiny reálnych čísiel, potom ho nazývame reálnym vektorovým poľom.

Vlastnosti krajiny môžeme súhrnne vyjadriť množinou funkcií

$$F_G = \{ f_i, i = 1, 2, 3, \dots \}, \quad (9)$$

kde každá funkcia

$$f_i : L \rightarrow D_i, \quad (10)$$

je skalárnym alebo vektorovým poľom nad územím L a vyjadruje určitú kvantitatívnu alebo kvalitatívnu vlastnosť krajiny. Funkcie z množiny (9) nazývame aj vlastnosťami krajiny.

Každá funkcia f_i má definovaný vlastný obor hodnôt D_i . Obor hodnôt je množina hodnôt, ktoré môže daná funkcia nadobúdať. Podľa oboru hodnôt môžeme vlastnosti krajiny rozdeliť do štyroch skupín (Triola 1989): nominálne, ordinálne, intervalové, podielové. V rámci uvedených skupín sú nominálne hodnoty považované za najnižšiu úroveň, podielové za najvyššiu. Vhodnou transformáciou sa hodnoty vyššej úrovne dajú previesť na hodnoty nižšej úrovne.

Použitím vhodných matematických operácií je možné odvodzovať ďalšie vlastnosti krajiny, simulovať výpočty a postupy, vytvárať teoretické matematické modely nezávislé na počítačovej reprezentácii.

Pri systémovom modelovaní krajiny sa geografický systém S_G rozkladá na dva podsystemy: fyzicko-geografický podsystem S_{FG} a socio-ekonomický podsystem S_{AG} . Obdobným spôsobom môžeme množinu všetkých vlastností krajiny F_G rozdeliť na podmnožinu fyzicko-geografických vlastností F_{FG} a podmnožinu socio-ekonomických vlastností F_{AG} , ktoré vyjadrujú vlastnosti jednotlivých podsystemov krajiny:

$$F_G = F_{FG} \cup F_{AG}. \quad (11)$$

V praxi sa často stretávame s prípadom, keď vlastnosti krajiny nie sú známe v každom bode územia. Výsledkom terénnych prieskumov a meraní sú hodnoty vo vybraných pozorovacích bodoch. Na reprezentáciu takýchto údajov sa používajú bodové skalárne a vektorové polia.

Dvojmerným skalárnym bodovým poľom sa nazýva konečná množina usporiadaných trojíc:

$$\{ (x_k, y_k, z_k) : k = 0, \dots, n-1 \}, \quad (12)$$

Usporiadaná dvojica $(x_i, y_i) \in L$ predstavuje súradnice bodu v území, číslo z_i hodnotu priradenú tomuto bodu.

Zovšeobecnenie si bodové pole môžeme predstaviť ako čiastočnú funkciu, ktorá zobrazuje množinu bodov P do vhodného oboru hodnôt

$$\begin{aligned} h: U &\rightarrow H, \\ U &\subset L. \end{aligned} \tag{13}$$

Ak množina U je konečná, tak ho budeme nazývať konečným bodovým polom. Množina U môže byť v území rozmiestnená pravidelne (napr. v pravidelnej obdĺžnikovej sieti). Vtedy hovoríme o pravidelnom bodovom poli. Ak je rozmiestnená nepravidelne, potom pole nazývame nepravidelným. Podľa oboru hodnôt U rozlišujeme skalárne a vektorové bodové polia.

Bodové polia sa vhodnou metódou rozširujú (zovšeobecňujú) na celé územie. Rozoznávame dva druhy rozšírení: aproximácie a interpolácie. Pole (funkcia, vlastnosť) f je interpoláciou bodového poľa h , ak v každom bode množiny U nadobúda rovnaké hodnoty ako dané bodové pole h :

$$f(x, y) = u(x, y), \text{ pre každé } (x, y) \in U. \tag{14}$$

U aproximačných funkcií je táto podmienka zoslabená. Požaduje sa, aby hodnota aproximačnej funkcie g bola dostatočne blízka hodnote bodového poľa:

$$g(x, y) \cong u(x, y), \text{ pre každé } (x, y) \in U. \tag{15}$$

Interpolácia je vlastne špeciálnym prípadom aproximácie keď sa požaduje, aby hodnoty aproximačnej funkcie a bodového poľa sa zhodovali.

Záver

Pri vytváraní a používaní počítačových modelov krajiny je nevyhnutné vychádzať z teoretického základu modelovania. Teoretická časť práce sa zakladá na systémovom prístupe a teórii modelov, ktoré sú morfizmami medzi zdrojovou a cieľovou doménou. Počítačový model krajiny je špeciálnym prípadom priestorového dynamického modelu.

Pri vytváraní modelu krajiny prostriedkami geografických informačných systémov sa vytvára postupnosť niekoľkých modelov. Model aplikačnej domény vytvárajú odborníci v danej oblasti. Model sa opisuje neformálnym jazykom, ktorý je blízky vybranej aplikačnej oblasti. Konceptuálny výpočtový model, ktorý sa vytvára prostriedkami entitno-relačného alebo objektového modelovania. Zvyčajne ho vytvárajú odborníci v danej aplikačnej oblasti v spolupráci s počítačovými odborníkmi (analytikmi). Logický výpočtový model zohľadňuje konkrétnu paradigmu implementácie počítačového modelu. Napríklad, ak údaje majú byť uložené v relačnom databázovom systéme, tak logický model opisuje spôsob uloženia údajov v relačných tabuľkách. Počítačový (fyzický výpočtový) model vzniká realizáciou modelu v konkrétnom prostredí výpočtového systému. Na realizáciu sa používajú vhodné zvolené technické a programové prostriedky (operačný systém, databázový systém, prostredie pre vývoj aplikačných programov, atď.).

Vypracovaný matematický formalizmus umožňuje vytvoriť všeobecný opis a modely krajinného systému na teoretickej úrovni, ktorý je nezávislý na cieľovej počítačovej implementácii (Koreň 2003). Vyjadrenie vlastností krajiny prostredníctvom skalárnych a vektorových polí sa pre tento účel ukazuje výhodnejšie, ako klasický objektový prístup. Pole sa chápe ako funkcia, ktorá zobrazuje územie do vhodného oboru hodnôt.

Matematické modely krajiny založené na poliach umožňujú formalizovať základné pojmy z oblasti geografie a krajinskej ekológie. Vybrané pojmy a termíny sa vyjadria prostredníctvom vhodných matematických štruktúr: krajina (systém), územie (dvojrozmerný interval), vlastnosť

krajiny (funkcia, pole), regionalizácia (rozklad), areál (súvislá množina). Zavedením charakteristických funkcií rozkladu (regionalizácie) a operátora vzdialenosti (metriky) možno teoreticky definovať operácie, akými sú nakladanie vrstiev, zónovanie ap. Vďaka dualite vlastností krajiny (polia) a regionalizácie (rozklady), sa zachováva integrita medzi klasickým objektovým prístupom a reprezentáciou prostredníctvom polí.

Literatúra

- BERTALANFFY, L. (1968). *General Systems Theory: Foundations, Development, Applications*. George Braziller, New York, 295 s.
- CASTI, J. L. (1989). *Alternate Realities: Mathematical Models of Nature and Man*. John Wiley & Sons, 493 s.
- HABR, J., VEPŘEK, J. (1986). *Systémová analýza a syntéza (zdokonalování a projektování systému)*. SNTL, Nakladatelství technické literatury, Praha, 316 s.
- HORÁK, J., KRLÍN, L. (1996). *Deterministický chaos a matematické modely turbulence*. Academia, Praha, 444 s.
- CHRISMAN, N. R. (1991). The error component in spatial data. In Maguire, D. J., Goodchild, M. F., Rhind, D. W. (Eds.) *Geographical Information Systems*, Vol. 1. Longmans, Harlow, s. 165-174.
- KEMP, K. K. (1993). *Environmental Modeling with GIS: A Strategy for Dealing with Spatial Continuity*. NCGIA Technical Report 93-3, Santa Barbara, 142 s.
- KOREŇ, M. (2003). *Výpočet indexov rozmanitosti územia prostriedkami geografických informačných systémov*. Dizertačná práca. Prírodovedecká fakulta, Univerzity J. A. Komenského v Bratislave. 138 s.
- KOZOVÁ, M. (1980). *Kvantitatívne hodnotenie geometrických aspektov krajinej štruktúry*. Kandidátska dizertačná práca, Centrum biologicko-ekologických vied, Ústav experimentálnej biológie a ekológie SAV, Bratislava, 179 s.
- KRCHO, J. (1977). *Krajina ako priestorový dynamický systém a vyjadrenie jej priestorovej diferenciácie mierou entropie*. Habilitačná práca, Katedra fyzickej geografie, Prírodovedecká fakulta Univerzity Komenského, Bratislava, 354 s.
- KRCHO, J. (1979). Reliéf ako priestorový subsystém SRF geografickej krajiny a jeho komplexný digitálny model. *Geografický časopis*, Vol. 31, No. 3, s. 237-262.
- KRCHO, J. (1981). Mapa ako abstraktný kartografický model S_K geografickej krajiny ako reálneho priestorového systému S_G . *Geografický časopis*, Vol. 33, No. 3, s. 224-272.
- KRCHO, J. (1990). *Morfometrická analýza a digitálne modely georeliéfu*. Veda, vydavateľstvo Slovenskej akadémie vied, Bratislava, 427 s.
- KRCHO, J. (2001). Modelling of georelief and its geometrical structure using DTM: positional and numerical accuracy. Q111 Publishers, Bratislava, 336 s.
- MAZÚR, E., URBÁNEK, J. (1982). Kategória priestoru v geografii. *Geografický časopis*, 4, s. 309-325.
- MIČIAN, L., ZATKALÍK, F. (1990). *Náuka o krajine a starostlivosť o životné prostredie*. Vysokoškolské skriptá, Prírodovedecká fakulta UK, Bratislava, 137 s.
- MITÁŠOVÁ, I., VEVERKA, B., PEZLAR, Z. (1990). *Základy teórie systémov a kybernetiky s aplikáciami v geodézii a kartografii*. Alfa, Bratislava, 247 s.
- MORAVSKÝ, L., MORAVČÍK, J., ŠULKA, R. (1992). *Matematická analýza 2*. Vydavateľstvo Alfa, Bratislava, 522 s.
- OBOŇA, J. (1990). *Systémy a systémová analýza v praxi*. Vydavateľstvo Alfa, Bratislava, 272 s.
- PEUQUET, D. J. (1988). Representations of Geographical Space: Toward a Conceptual Synthesis. *Annals of the Association of American Geographers*, Vol. 78, No. 3, s. 375-394.
- PRAVDA, J. (1985). Rozvoj teórií v kartografii. *Geografický časopis*, Vol. 37, s. 346-355.
- PRAVDA, J. (1987). K poznávacej koncepcii kartografie. *Geografický časopis*, Vol. 39, s. 257-271.
- SAMET, H. (1989). *The Design and Analysis of Spatial Data Structures*. Reading, Massachusetts, Addison-Wesley, 493 s.
- ŠTACH, J. (1982). *Základy teórie systémů*. SNTL, Nakladatelství technické literatury, Praha, 172 s.

- TRIOLA, M. F. (1989). *Elementary statistics*. The Benjamin/Cummings Publishing Company Inc., Redwood City, California, ISBN 0-8053-0271-9.
- WORBOYS, M. F. (1995). *GIS: A Computing Perspective*. Taylor & Francis, London, 2000, tretie vydanie, 376 s.
- ZEIGLER, B. P. (1976). *Theory of Modelling and Simulation*. John Wiley & Sons, New York, 460 s.

S u m m a r y

Spatial models of landscape

The model is defined as mapping from source to target domain. In the process of modeling we emulate structure and behaviour of the geographic system. The mappings which preserve structure are called morphisms. The landscape is the source domain, computer environment is the target one. The most important model of landscape commonly used in geography and landscape ecology is a map.

From the point of view of the target domain there are two main categories of models: physical and abstract. Widely used physical models are computer ones (simulations). Present-day technology of geographic information systems uses object-based (vector) or field-based (raster) models.

Computer models are closely interconnected with abstract mathematical models. The characteristics of landscape can be expressed by the set of mappings (fields) defined on landscape's area.

Operations of map algebra (local, focal, zonal, summary) are replaced by general mathematical operators like composition, distance, classification. Mathematical models are independent from specific computer implementation, abstract and universal.

Fig. 1. Modeling as a morphism from source to target domain

Lektorovala:

Doc. RNDr. Mária KOZOVÁ, CSc.,

Univerzita Komenského Prírodovedecká fakulta