

**MODELOWANIE PRZESTRZENNE
POTENCJALNYCH DRÓG PRZENIKANIA GRANICY
LĄDOWEJ PRZEZ NIELEGALNYCH IMIGRANTÓW**

**SPATIAL MODELING OF POTENTIAL WAYS
OF CROSSING THE BORDERS BY ILLEGAL IMMIGRANTS**

**Wojciech Drzewiecki^{1,2}, Małgorzata Jenerowicz², Sebastian Aleksandrowicz²,
Michał Krupiński²**

¹Katedra Geoinformacji, Fotogrametrii i Teledetekcji Środowiska,
Wydział Geodezji Górniczej i Inżynierii Środowiska AGH w Krakowie

²Zespół Obserwacji Ziemi, Centrum Badań Kosmicznych PAN

**Słowa kluczowe: modelowanie przestrzenne, systemy informacji geograficznej, wskaźnik
przenikalności granicy, granica polsko-ukraińska, GMES**

**Keywords: spatial modeling, geographical information systems, Border Permeability Index,
Polish-Ukrainian border, GMES**

Wprowadzenie

Rozwój usług dostarczających informacji geoprzestrzennej w celu wsparcia polityki zewnętrznej UE i przyczynienie się do zdefiniowania jednolitego globalnego systemu bezpieczeństwa stanowiły główne cele realizowanego w ramach programu GMES projektu G-MOSAIC (*GMES services for Management of Operations, Situation Awareness and Intelligence for regional Crises*). W ramach tego projektu, uruchomionego z inicjatywy Komisji Europejskiej i Europejskiej Agencji Kosmicznej, w Centrum Badań Kosmicznych PAN opracowana została metodyka określania wskaźnika przenikalności granicy (*Border Permeability Index – BPI*) w skali regionalnej. Opracowany wskaźnik przenikalności granicy stanowi część realizowanego w ramach projektu G-MOSAIC pakietu roboczego „Drogi i granice”, którego celem jest monitorowanie szlaków migracyjnych. Stanowi on narzędzie w pełni dostosowane do potrzeb służb odpowiedzialnych za bezpieczeństwo w strefie granicznej. Jego celem jest wspieranie ich działalności na poziomie decyzyjnym, przez dostarczanie informacji na temat sytuacji terenowej, a w szczególności wskazywanie miejsc o krytycznym znaczeniu.

Modele przenikalności granic lądowych

Koncepcję modelu przestrzennego, mającego na celu oszacowanie stopnia trudności nielegalnego przekraczania granicy przez dorosłą osobę poruszającą się pieszo, przedstawili Stephenne i Pesaresi (2006). Dla powstającego w efekcie realizacji modelu produktu końcowego w postaci mapy zaproponowali nazwę wskaźnika przenikalności granicy. Wartość indeksu obrazować ma łatwość nielegalnego przenikania przez granicę dla danego fragmentu granicy czy strefy granicznej.

Model jaki zaproponowali Stephenne i Pesaresi (2006) zakłada, iż przenikalność granicy zdefiniowana być może jako odwrotność funkcji oporu przestrzeni (ang. *friction*). Pojęcie „oporu przestrzeni” (stosowane są również terminy „tarcie” lub „koszt jednostkowy”) związane jest z dostępnymi w rastrowych systemach informacji geograficznej analizami, mającymi na celu wybór optymalnej trasy (ścieżki przejścia, ang. *least-cost path*) pomiędzy wskazanymi obiektami początkowymi i końcowymi. W przypadku kiedy optymalizowaną wielkością jest długość trasy, analiza tego typu sprowadza się do obliczenia odległości i wyboru ścieżki najkrótszej. Jednak, w zależności od celu analiz, trasa optymalna nie musi oznaczać najkrótszej, ale na przykład najszybszą, najtańszą (o najniższej sumarycznej wartości gruntu jaki trzeba wykupić by ją zrealizować, itp.) czy w najmniejszym stopniu oddziałującą na środowisko (por. Drzewiecki i in., 1999). W tego typu przypadkach konieczne staje się obliczenie tzw. „odległości w sensie kosztów” (ang. *cost distance*). W tego rodzaju analizie każdej komórce rastra przypisywany jest współczynnik oporu przestrzeni, którego wartość obrazuje koszt związany z przemieszczaniem się przez tą komórkę. Może być to oczywiście koszt wyrażony w wartościach monetarnych, ale także koszt innego typu, na przykład czas lub wyrażona w przyjętej skali wielkość wpływu na środowisko. „Odległość w sensie kosztów” obliczana jest jako suma iloczynów odległości pokonywanej w obrębie poszczególnych pikseli i przypisanych im wartości współczynników tarcia (oporów przestrzeni). W efekcie możliwe staje się wygenerowanie tzw. powierzchni kosztów (ang. *cost surface*), czyli mapy rastrowej, na której wartość komórki odpowiada najmniejszemu skumulowanemu kosztowi, jaki ponieść trzeba na dotarcie do niej z obiektów początkowych. Analiza „odległości w sensie kosztów” w postaci standardowej (zaimplementowanej w większości dostępnych na rynku rastrowych pakietów GIS) ma charakter izotropowy, to znaczy koszt jednostkowy przypisany poszczególnym komórkom rastra nie jest zależny od kierunku poruszania się w obrębie komórki. Możliwe jest jednak także ujęcie anizotropowe, w którym opór powierzchni (wartość współczynnika tarcia) dla danej komórki zmienia się w zależności od kierunku ruchu.

W przypadku modelu wskaźnika przepuszczalności granicy (BPI), zaproponowanego przez Stephenne i Pesaresi (2006), wartość oporu przestrzeni dla poszczególnych komórek rastra uzyskiwana jest na drodze analizy wielokryterialnej czynników mających wpływ na decyzję o wyborze drogi przez potencjalnego nielegalnego imigranta. Modelowany jest w tym przypadku jedynie wpływ czynników warunkowanych przez własności przestrzeni geograficznej, w jakiej porusza się osoba chcąca w sposób nielegalny przekroczyć granicę. Pogrupowane zostały one w trzy oceniane niezależnie komponenty modelu:

- komponent *walk* modelujący łatwość (szybkość) poruszania się determinowaną poprzez rzeźbę terenu i warunki klimatyczne,
- komponent *hide*, w ramach którego oceniana jest możliwość pozostania niezauważonym,
- komponent *secure* szacujący prawdopodobieństwo zatrzymania przez funkcjonariuszy służb ochrony granic.

Ocena poszczególnych komponentów modelu miała charakter analizy wielokryterialnej, której wyniki standaryzowane były w zakresie od 0 do 255, przy czym wyższe wartości oznaczały mniejszą przydatność terenu jako drogi przekraczania granicy. Końcowa wartość wskaźnika przenikalności była odwrotnością sumy ważonej wartości poszczególnych kryteriów.

Stephenne i Pesaresi (2006) przedstawili, oparty na opisanych założeniach, model przenikalności granicy lądowej ówczesnej Unii Europejskiej. Modelowanie przeprowadzone zostało z zastosowaniem rastra o rozdzielczości 1 km. W modelu tym komponent *walk* oszacowano uwzględniając: warunki klimatyczne, rzeźbę terenu, pokrycie terenu oraz istnienie infrastruktury transportowej (drogi, koleje). Ocenę warunków klimatycznych przeprowadzono w oparciu o uśrednione w skali roku wartości grubości pokrywy śnieżnej i temperatury. Szacując wpływ ukształtowania terenu wzięto pod uwagę wysokości i nachylenie, uwzględniając przy tym istnienie tuneli drogowych i kolejowych. Oceniono także pod kątem łatwości poruszania się różne typy pokrycia terenu. Uwzględniono również efekt bariery jaki dla poruszania się pieszego stanowi obecność rzek oraz ułatwiający poruszanie się wpływ istnienia dróg i kolei. W każdym z tych przypadków, ze względu na rozdzielczość modelu, posłużono się miarą gęstości sieci (odpowiednio: rzecznej, drogowej i kolejowej).

Analizując komponent *hide* opracowywanego modelu Stephenne i Pesaresi (2006) uwzględnili: możliwość ukrycia się związaną z rodzajem pokrycia terenu, istnienie obszarów zabudowy, oświetlenie terenu w porze nocnej oraz nachylenie terenu. Komponent *secure* modelowany był poprzez minimalny czas dotarcia z punktów kontrolnych służb ochrony granicy, określony na powierzchni tarcia uzyskanej z komponentu *walk*. Końcową wartość wskaźnika przenikalności granicy (BPI) uzyskano stosując równe wagi dla każdego z trzech modelowanych komponentów. Wartość tę dla poszczególnych rozważanych odcinków granicy określono na drodze agregacji wartości komórek rastra w otoczeniu jednego, pięciu i pięćdziesięciu kilometrów.

Stephenne i Zeug (2007) przedstawili model przenikalności granicy zrealizowany według tych samych założeń, ale w skali lokalnej – dla odcinka granicy pomiędzy Ukrainą a Węgrami i Słowacją w okolicach miasta Użhorod. W tym przypadku w komponencie *walk* nie analizowano warunków klimatycznych i wpływu rzeźby terenu, zakładając iż nie powodują one w skali analizowanego obszaru istotnych różnic w prędkości poruszania się po terenie. Wartość tego komponentu określono jedynie w oparciu o informację o pokryciu i użytkowaniu terenu, uzyskane na drodze fotointerpretacji ortofotomapy opracowanej z wysokorozdzielczych obrazów satelitarnych. Dokonując fotointerpretacji uwzględniano również obiekty ułatwiające przeprawę przez ciek wodne, na przykład przekroczenia cieków przez rurociągi. Również w przypadku komponentu *hide* ocena bazowała jedynie na opracowanej mapie pokrycia i użytkowania terenu.

Malinowski (2010) dokonał oceny wskaźnika przenikalności granicy (BPI) w skali pośredniej pomiędzy ujęciem kontynentalnym a lokalnym, to jest dla całości granicy polsko-ukraińskiej. Zastosowana w tym przypadku metodyka oparta była na założeniach wymienionych modeli, przy czym ocenie poddano jedynie komponenty *walk* i *hide* (nie oceniano komponentu *secure*). Zmodyfikowano jednak zestaw wykorzystywanych danych źródłowych (dostosowując je do regionalnej skali opracowania) oraz sposób standaryzacji kryteriów (zamiast 256 zastosowano jedynie pięć poziomów wartości).

Koncepcja metodyczna modelu przenikalności granicy w skali regionalnej

Celem prezentowanych w niniejszym artykule badań była analiza przenikalności granicy w skali regionalnej, wykonana w sposób pozwalający wykorzystać wyższą dokładność i szczegółowość dostępnych w tej skali danych przestrzennych, przeprowadzona w odniesieniu do komponentów *walk* i *hide*. Podejścia stosowane dotychczas w analizie przenikalności granic lądowych dostosowane były do kontynentalnej skali opracowania. Uwidacznia się to już w samej koncepcji stosowanego wskaźnika przenikalności, zdefiniowanego jako odwrotność wartości określonej na powierzchni tarcia. Definicja ta zakłada bowiem milcząco izotropowość modelowanego zjawiska. W każdym ze zrealizowanych dotychczas modeli (Stephene, Pesaresi, 2006; Stephene, Zeug, 2007; Malinowski, 2010) przenikalność granicy traktowana jest jak zjawisko izotropowe, niezależne od kierunku migracji. W rzeczywistości jednak modelowane zagadnienie posiada charakter anizotropowy. Przenikalność granicy oceniana w oparciu o uwarunkowania fizjograficzne będzie zasadniczo różna w zależności od kierunku jej przekraczania. Łatwość (szybkość) poruszania się w terenie zależy bowiem nie tylko od jego nachylenia, ale również od kierunku w jakim spadek ten jest pokonywany. Uwzględnienie tego faktu nie było możliwe w przypadku analiz prowadzonych w rozdzielczości wynoszącej 1 km, staje się jednak takim w skali regionalnej, przy zastosowaniu modeli wysokościowych o wyższej szczegółowości i dokładności. Z punktu widzenia modelowanych komponentów dotyczy to zarówno kryterium *walk* jak i *secure*.

Również w ocenie komponentu *hide* wykorzystany może zostać wyższy poziom dokładności i szczegółowości dostępnych w rozważanej skali opracowania modeli wysokościowych oraz danych topograficznych. Widoczność hipotetycznego nielegalnego imigranta w terenie jako przemierza może być bowiem nie tylko szacowana w sposób pośredni (za pomocą oceny nachylenia), ale modelowana w oparciu o numeryczny model pokrycia terenu (NMPT), a przy jego braku o NMT.

Zmiana podejścia do zagadnienia izotropowości w modelowaniu przenikalności granicy wymusza również zmianę podejścia do definicji samego wskaźnika przenikalności granicy. Nie może on być definiowany, jak dotychczas, jako odwrotność wartości na mapie tarcia, gdyż dla poszczególnych komórek rastra przyjmuje ono różne wartości w zależności od kierunku ruchu. Dodatkowo, zasadne wydaje się pytanie, czy wskaźnik przenikalności granicy odzwierciedlać powinien jedynie warunki panujące wewnątrz komórki rastra, czy też o potencjalnej przydatności danej komórki jako drogi poruszania się nielegalnego imigranta decydują również warunki na całej trasie, której częścią jest rozpatrywana komórka? W tej sytuacji wydaje się, iż miarą właściwą dla opisu wskaźnika przenikalności granicy mogłaby być odwrotność wartości na mapie kosztów. Oznacza to bowiem, że im mniejszy skumulowany koszt dotarcia od rozważanej komórki rastra do strefy bezpiecznej, tym większe prawdopodobieństwo, że przez rozpatrywany punkt przebiegać będzie trasa wybrana przez nielegalnego imigranta. Powierzchnia kosztu obrazuje bowiem najmniejszą skumulowaną wartość rozpatrywanego kryterium. W przypadku komponentu *walk* będzie nim czas dotarcia do strefy bezpiecznej, w przypadku komponentu *hide* – prawdopodobieństwo zostania zauważonym na pokonywanej trasie, w przypadku komponentu *secure* – prawdopodobieństwo zostania dostrzeżonym i zatrzymanym bezpośrednio przez służby ochrony granicy. Takie ujęcie problemu pozwala równocześnie na bezpośrednie porównywanie pod względem

przepuszczalności poszczególnych punktów na linii granicznej czy innej linii zdefiniowanej przez użytkownika modelu. Aby umożliwić porównanie wartości wskaźnika dla dowolnego miejsca w rozpatrywanej strefie (obszarze analiz) konieczne jest jednak zdefiniowanie go jako ilorazu wartości na mapie kosztów i dystansu pozostałego do pokonania. W ten sposób każdej komórce przypisana zostanie wartość kosztu przypadającego na jednostkę odległości na trasie od tej komórki do początku strefy bezpieczeństwa.

Komponent *walk*

Ocena przepuszczalności granicy w aspekcie uwarunkowań fizjograficznych wpływających na czas, jakiego potencjalny nielegalny imigrant potrzebuje do jej przekroczenia, przypomina swoim charakterem problem modelowania dostępności (*accessibility*) w ujęciu, w jakim rozpatrywany jest on między innymi w ocenie pierwotności krajobrazu (np. Fritz et al., 2000). Podstawą oceny jest czas dotarcia z miejsc stałego przebywania ludzi lub z istniejących tras komunikacyjnych. Miarą dostępności jest czas w jakim odległość od tych miejsc jest pokonywana przez pieszego wędrowca. Jego oszacowanie jest możliwe na drodze modelowania w systemach informacji geograficznej poprzez wygenerowanie powierzchni kosztów.

W przypadku modelowania poruszania się w terenie osoby pieszej koszt (czas) związany z przejściem fragmentu terenu odpowiadającego pojedynczej komórce rastra uzależniony jest zarówno od pokrycia tego fragmentu terenu, jak i od jego topografii. O ile jednak prędkość poruszania się związana z pokryciem terenu nie zależy od kierunku w jakim teren ten jest pokonywany (czyli tarcie ma w tym przypadku charakter izotropowy), o tyle nie bez znaczenia jest czy po nachylonym stoku osoba piesza schodzi w dół, podchodzi do góry czy też porusza się w kierunku prostopadłym do linii spadku (trawersuje). Wpływ topografii na koszt poruszania się po terenie jest zatem zróżnicowany w zależności od kierunku ruchu. Modelowanie wymaga w tym przypadku zastosowania algorytmów umożliwiających uwzględnienie anizotropowości powierzchni tarcia.

Algorytmy tego rodzaju dostępne są w pakietach GIS, takich jak GRASS, IDRISI i ArcGIS. W każdym z nich zaimplementowany jest inny algorytm analizy. Na potrzeby określenia wskaźnika przenikalności granicy w ramach prezentowanych badań zdecydowano się zastosować podejście zaimplementowane w rozszerzeniu *Spatial Analyst* pakietu ArcGIS jako narzędzie *Path Distance*. W obliczeniach kosztu związanego z pokonaniem określonej odległości umożliwia ono zarówno uwzględnienie oporu ruchu związanego z charakterem powierzchni po jakiej porusza się rozpatrywany obiekt (np. wynikającego z rodzaju pokrycia terenu), jak i uwzględnienie wpływu kształtu powierzchni topograficznej na rzeczywistą długość pokonywanej trasy (czyli odległość mierzona po powierzchni terenu, a nie w rzucie na płaszczyznę odniesienia), a także uwzględnienie wpływu jaki na koszt przemieszczania się wywiera kierunek ruchu. W tym ostatnim przypadku uwzględnić można zarówno wpływ kąta pionowego (wynikający z nachylenia terenu mierzzonego wzdłuż rozpatrywanego kierunku ruchu), jak i poziomego (wynikający z działania sił kierunkowych, np. kierunku wiatru).

W analizowanym zagadnieniu nie ma potrzeby uwzględniania kąta poziomego (czyli azymutu). Dla uwzględnienia wpływu nachylenia terenu w kierunku ruchu wykorzystać można natomiast zależność podaną przez Toblera (1993). Proponuje on wyrażoną w kilometrach na godzinę prędkość poruszania się po szlakach dla pieszych w terenie pagórkowatym (W) określać według wzoru:

$$(1)$$

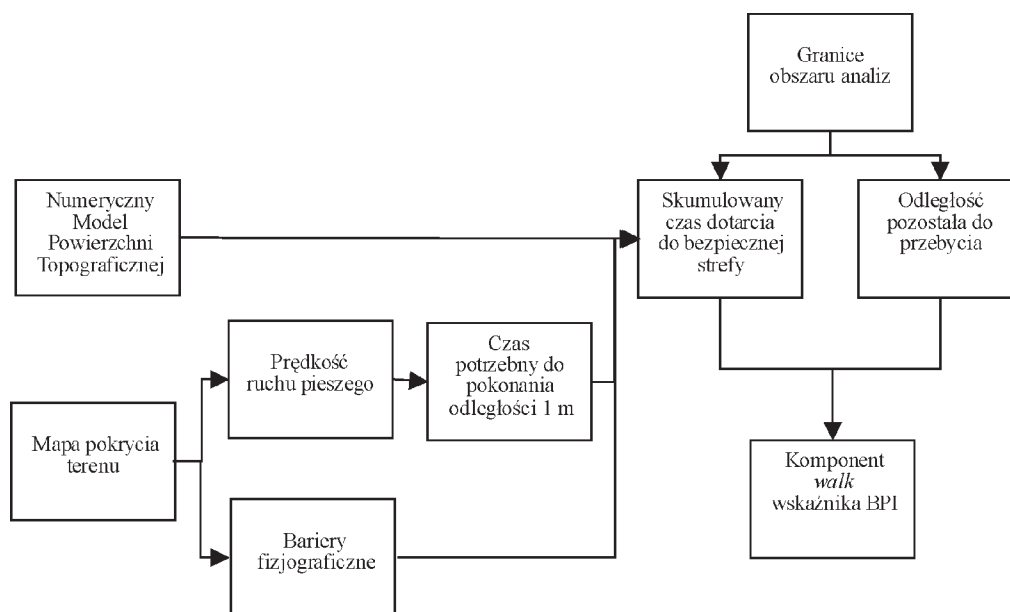
$$W = 6^{(-3.5|S+0.05|)}$$

gdzie: S oznacza nachylenie terenu wyrażone w procentach (tj. jako tangens kąta nachylenia).

Zgodnie z tą zależnością, maksymalną prędkość poruszania się pieszy osiąga schodząc w dół po terenie o nachyleniu wynoszącym niespełna trzy stopnie. Poruszanie się w dół po terenie o większym (lub mniejszym) nachyleniu, a tym bardziej podchodzenie pod górę powoduje zwolnienie tempa marszu. W terenie płaskim prędkość poruszania się pieszego liczona według tego wzoru osiąga wartość 5 km/h. Dla terenów poza utwardzonymi szlakami Tobler (1993) proponuje redukcję wyliczonej prędkości o 40%.

W przypadku wykorzystania zależności Toblera w narzędziu *Path Distance* pakietu ArcGIS, konieczne jest jej przedstawienie w postaci tabeli definiującej mnożnik wartości na mapie tarcia w zależności od wartości kąta pionowego (nachylenia). Wartość na mapie tarcia przedstawiać może czas potrzebny do pokonania jednostkowej odległości (np. 1 metra) w danej komórce rastra. Zależność on będzie oczywiście od rodzaju pokrycia terenu jaki w tej komórce występuje, determinującego prędkość z jaką wewnątrz tej komórki poruszał się będzie pieszy.

Mapa uzyskana jako wynik modelowania przedstawiać będzie dla każdego piksela czas jaki potrzebny jest na dotarcie do komórek docelowych – w tym przypadku początku „bezpiecznej strefy” dla osoby nielegalnie przekraczającej granicę Unii Europejskiej. Ostateczna mapa przedstawiająca atrakcyjność poszczególnych komórek rastra, jako dróg przemieszczania się ze względu na uzależnioną od czynników fizjograficznych łatwość poruszania się i szybkość dotarcia do strefy bezpieczeństwa, powstanie przez podzielenie czasu potrzebnego na dotarcie do tej strefy z danej komórki przez pozostałą do przebycia odległość (rys. 1).



Rys. 1. Schemat analizy – komponent *walk*

Komponent *hide*

Poziom dokładności danych wejściowych, dostępnych w skali przestrzennej przewidzianej dla implementacji projektowanego modelu, pozwala na wykorzystanie w nim analiz widoczności, nie stosowanych w dotychczasowych realizacjach koncepcji wskaźnika przenikalności granicy. Koncepcję wykorzystania analiz widoczności do konstruowania powierzchni tarcia na potrzeby określania różnego typu ścieżek minimalnych kosztów (*least-cost paths*) przedstawili po raz pierwszy Lee i Stucky (1998). Bang i in. (2010) pokazali możliwość zastosowania tego typu analiz w odniesieniu do optymalizacji rozmieszczenia posterunków obserwacyjnych służb ochrony granic.

W prezentowanych badaniach wykorzystano ideę zastosowania wyników analiz widoczności do konstruowania powierzchni tarcia na potrzeby tworzenia powierzchni kosztów. Analizę widoczności przeprowadzono wykorzystując koncepcję ekspozycji na obserwację zaproponowaną dla potrzeb studiów z zakresu ochrony krajobrazu (Ipswich City Council, 2002). Wychodząc od założenia, iż miarą komponentu *hide* jest prawdopodobieństwo pozostania niezauważonym na pokonywanej trasie, określenie ekspozycji terenu na obserwację przeprowadzono z uwzględnieniem „mocy obserwacji” punktu, z którego teren może być widziany. W założeniu „moc obserwacji” pozostawać powinna w związku z sumarycznym czasem obserwacji obliczanym dla poszczególnych punktów (bądź ich rodzajów) jako iloczyn liczby obserwatorów i czasu obserwacji pojedynczego obserwatora. Uwzględnić należy również fakt, że prawdopodobieństwo zostania zauważonym maleje wraz z odległością od obserwatora.

Ocenę ekspozycji wizualnej komórki rastra uzyskano w zależności od liczby komórek, z których potencjalnie jest ona widoczna, ich rodzaju oraz odległości pomiędzy analizowanymi komórkami, zgodnie ze wzorem:

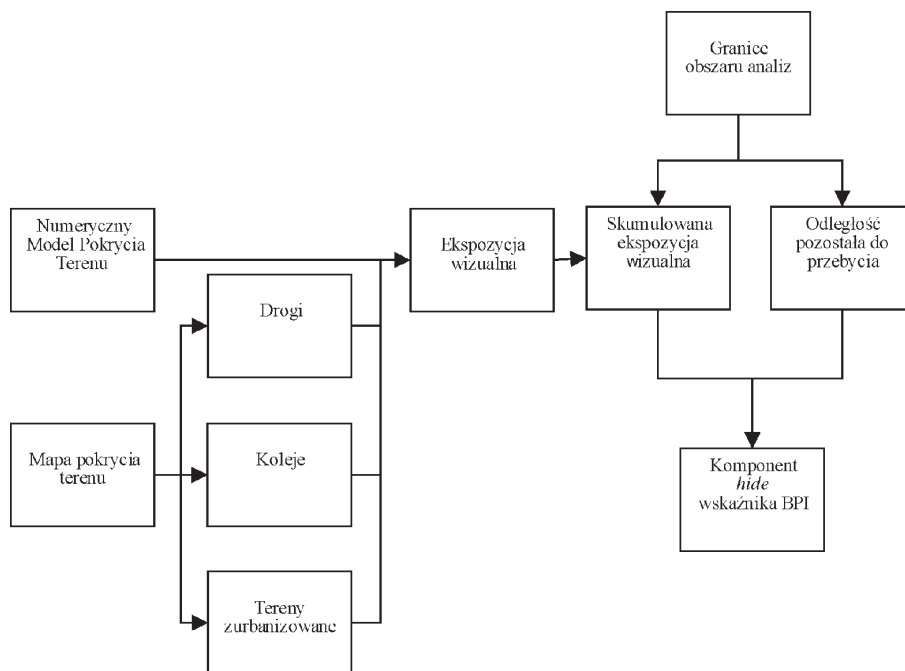
$$E = \sum_{i=1}^N w_i d_i \quad (2)$$

gdzie:

- N – liczba pikseli, z których widziany jest rozważany piksel,
- w – waga zależna od rodzaju miejsca obserwacji,
- d – współczynnik zależny od odległości pomiędzy miejscem obserwacji a pikselem obserwowanym.

Algorytmy umożliwiające określenie zasięgu (strefy) widoczności w oparciu o analizę NMPT dostępne są w większości rastrowych pakietów GIS. Przegląd zaimplementowanych rozwiązań wykazał jednak, że gotowe narzędzie umożliwiające określenie liczby pikseli, z których widoczna jest określona lokalizacja, dostępne jest jedynie w oprogramowaniu Idrisi.

Mapa ekspozycji wizualnej stanowi mapę współczynników tarcia do wygenerowania powierzchni kosztów (w przypadku komponentu *hide* nie występuje anizotropowość). W efekcie, dla poszczególnych pikseli obliczona zostaje wartość stanowiąca najmniejszy skumulowany koszt dotarcia do celu po powierzchni tarcia zdefiniowanej przez wskaźnik ekspozycji. Wartość ta interpretowana być może jako najniższa skumulowana ekspozycja wizualna na trasie od danego piksela do celu. Ostateczna mapa przedstawiająca atrakcyjność poszczególnych komórek rastra, jako dróg przemieszczania się ze względu na możliwość pozostania niezauważonym, powstanie przez podzielenie uzyskanej wartości skumulowanej ekspozycji wizualnej przez pozostałą do przebycia odległość (rys. 2). Uzyskana w ten sposób wartość pozostaje w związku z prawdopodobieństwem pozostania niezauważonym.



Rys. 2. Schemat analizy – komponent *hide*

Wskaźnik przenikalności granicy

Wskaźnik przenikalności granicy stanowić powinien syntetyczną miarę uwzględniającą zarówno komponent *walk* jak i *hide*. Przyjęto założenie, iż podobnie jak dla każdego z komponentów powstawać ona powinna w oparciu o wartość skumulowanego kosztu dotarcia do granicy strefy bezpiecznej. Powierzchnia kosztów powinna być generowana przy użyciu powierzchni współczynników tarcia, powstającej z połączenia informacji uzyskanych na drodze modelowania obu rozważanych komponentów.

Propozycję tego rodzaju przedstawili Franklin i in. (2007). Przeprowadzona przez nich analiza miała na celu określenie ścieżki pomiędzy dwoma punktami zoptymalizowanej w taki sposób, by poruszający się nią pieszy (przemysłowiec) przebył ją możliwie szybko, jednocześnie jednak minimalizując czas, w którym jest widoczny z rozmieszczonych w terenie posterunków obserwacyjnych. W analizie tej ocena widoczności przeprowadzana była w ujęciu zero-jedynkowym (widoczny/niewidoczny). Mapa współczynników tarcia uzyskana została poprzez stukrotne zwiększenie oporu dla komórek widocznych.

Na potrzeby modelowania syntetycznego wskaźnika przepuszczalności granicy (BPI) wykorzystane może być podejście analogiczne, jednak ewentualny wzrost tarcia dla poszczególnych komórek rastra uzależniony być musi od stopnia ich widoczności (ekspozycji wizualnej). Proces modelowania przebiegać powinien tak jak dla komponentu *walk* – podstawowa wartość kosztu jednostkowego związanego z pokonaniem komórki rastra (tarcie) to czas jaki potrzebny jest do pokonania odległości jednego metra w terenie o danym rodzaju

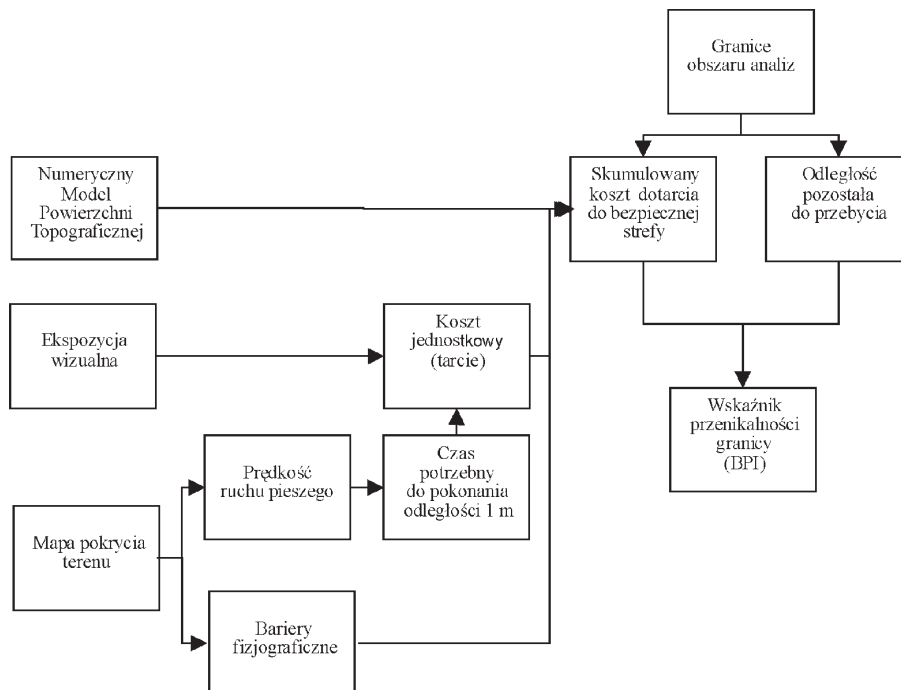
pokrycia. Jednak na potrzeby modelowania syntetycznego wskaźnika przenikalności granicy, koszt ten mnożony będzie przez współczynnik P_r , którego wartość związana będzie z ekspozycją wizualną danej komórki oszacowaną w procesie modelowania komponentu *hide*. Aby zwiększyć elastyczność modelu i umożliwić jego użytkownikom modelowanie różnych preferencji potencjalnego nielegalnego imigranta, wartość tego współczynnika zdecydowano się określać na drodze zależności funkcyjnej w postaci:

$$P_r = 1 + (A - 1) * (1 - 10^{\frac{-Bx}{MAX(x)}}) \tag{3}$$

gdzie:

- x – wartość komórki rastra na mapie ekspozycji wizualnej,
- A – maksymalna wartość współczynnika (wartość współczynnika dla komórki rastra o maksymalnej wartości na mapie ekspozycji wizualnej nie przekroczy tej wartości; dla komórek niewidocznych wartość współczynnika wyniesie 1),
- B – parametr wpływający na szybkość z jaką wzrasta wartość mnożnika.

Wpływ parametrów A i B na wartość współczynnika zwiększającego tarcie w zależności od ekspozycji wizualnej rozpatrywanej komórki ilustruje rysunek 4. Wykorzystanie zaproponowanej zależności funkcyjnej pozwala użytkownikowi modelu modelować preferencje potencjalnego nielegalnego imigranta. Niskie wartości parametru A oznaczają, iż zależy mu bardziej na szybkości poruszania. Im są one wyższe, tym bardziej preferowane będzie poruszanie się trasą niewidoczną. Możliwość elastycznego definiowania wartości współczynnika, w zależności od ekspozycji wizualnej komórki (przy pomocy parametru B), umożliwiła określenie progu ekspozycji wizualnej akceptowanej przez starającego się w sposób nielegalny przekroczyć granicę.



Rys. 3. Schemat analizy – wskaźnik przenikalności granicy w ujęciu syntetycznym

Dalszy tryb modelowania wskaźnika przenikalności granicy jest analogiczny jak dla komponentu *walk* – generowana jest powierzchnia kosztów z uwzględnieniem anizotropowości wynikającej z kierunku ruchu po powierzchni topograficznej, a następnie przeprowadzana normalizacja przez podzielenie obliczonego kosztu przez pozostającą do pokonania odległość (rys. 3). Końcowy wynik interpretować można jako średni współczynnik tarcia na najchętniej wybieranej przez nielegalnego imigranta trasie z rozważanego piksela do najbliższego piksela celu (czyli strefy bezpiecznej). Ponieważ wartość ta pozostaje w relacji do preferencji imigranta, można przyjąć iż im jest ona niższa, tym bardziej prawdopodobne, że rozważany piksel znajduje się na potencjalnie atrakcyjnej trasie przejścia.

Obszar analiz

Jako obszar testowy wybrany został rejon wzdłuż granicy polsko-ukraińskiej (rys. 5) o długości 535 km, co stanowi około 15% całkowitej długości granic Polski. Pogranicze, będące obszarem zainteresowania, przebiega w województwach podkarpackim i lubelskim po stronie polskiej, a po stronie ukraińskiej głównie w obwodach wołyńskim i lwowskim. Analizowana strefa obejmuje tereny znajdujące się po obydwu stronach granicy w odległości maksymalnej do około 20 km o powierzchni ponad 13000 km². Na obszarze opracowania po stronie polskiej znajduje się 9 powiatów, w tym: 5 na Podkarpaciu (bieszczadzki, leski, przemyski, jarosławski i lubaczowski) oraz 4 na Lubelszczyźnie (tomaszowski, hrubieszowski, chełmski i włodawski), natomiast po stronie ukraińskiej znajduje się 11 rejonów: 6 z obwodu lwowskiego (turczański, starsamborski, mościcki, jaworowski, żółkiewski i sokalski) oraz 5 z obwodu wołyńskiego (horochowski, iwanicki, włodzimierski, lubomelski i szacki).

Dane

Opracowanie map indeksu przenikalności granicy, według zaproponowanego podejścia metodycznego, wymagało wykorzystania jako danych wejściowych trzech podstawowych warstw informacyjnych: numerycznego modelu powierzchni topograficznej (NMT), numerycznego modelu powierzchni terenu (NMPT) i mapy pokrycia terenu. Zgodnie z założeniami warstwy te powinny posiadać dokładność przestrzenną i atrybutową pozwalającą na zastosowanie zaawansowanych procedur modelowania przestrzennego w środowisku GIS. Jednocześnie, ze względu na pożądaną uniwersalność modelu umożliwiającą jego zastosowanie dla różnych fragmentów granicy Unii Europejskiej, warstwy te powinny być zbudowane w oparciu o powszechnie dostępne dane wejściowe, a informacja o sposobie pokrycia terenu możliwie najbardziej aktualna. Ze względu na przedstawione przesłanki, zdecydowano się na wykorzystanie w tym celu, jako danych podstawowych, tzw. Mapy Wektorowej Poziomu 2 (V-Map L2) oraz obrazów satelitarnych.

Do budowy NMT zastosowanego w zrealizowanym projekcie, wykorzystano przede wszystkim warstwice dostępne jako jedna z warstw tematycznych V-Map L2. Niestety dostępne dane swoim zakresem obejmowały, poza obszarem Polski, jedynie część ukraińskiej strony strefy przygranicznej. Dla pozostałego obszaru nie udało się uzyskać ukraińskich map topograficznych. W tej sytuacji, warstwice zdecydowano się uzupełnić na podstawie Map Taktycznych Polski w skali 1:100 000, wydawanych w okresie międzywojennym przez

Wojskowy Instytut Topograficzny. Według opisu pozaramkowego, mapy pochodzą z lat 1932-1938, a warstwy opracowano na podstawie map w skali 1:25 000. Na skalibrowanych skanach pięciu sekcji map (Luboml, Sokal, Rawa Ruska, Mościska i Sambor) zwektoryzowano warstwy i punkty wysokościowe, a następnie, po zintegrowaniu z analogicznymi danymi z V-Map L2, wygenerowano NMPT przy użyciu narzędzi dostępnych w pakiecie ArcGIS. Należy podkreślić, że przed integracją danych na obszarze ich nakładania się sprawdzono różnice wysokości na testowych modelach wysokościowych, wygenerowanych osobno na podstawie warstw z VMap L2 i z map topograficznych. Średnie różnice wysokości pomiędzy tymi modelami nie przekraczały kilku metrów i mieściły się w zakresie dokładności wysokościowej wymaganej przez standard VMap L2.

Jako materiał wyjściowy, dla potrzeb opracowania dla obszaru testowego mapy pokrycia terenu, wybrany został zestaw pięciu scen satelitarnych LANDSAT ETM+ z roku 2005. Każda scena poddana została procesowi korekcji atmosferycznej przy pomocy oprogramowania ATCOR z wykorzystaniem metadanych dołączonych do zdjęć. Ponieważ daty akwizycji obrazów były różne, zrezygnowano z mozaikowania obrazów, a każdy sklasyfikowany był oddzielnie.

Kolejnym etapem było zdefiniowanie schematu klasyfikacyjnego w oparciu o charakter planowanych analiz. Oznacza to, że rozpoznawane klasy są powiązane z możliwością ukrycia się, a także łatwością poruszania się w terenie. Rozpoznanych zostało sześć klas pokrycia terenu: pola uprawne, zakrzewienia, lasy, odkryta gleba, tereny zurbanizowane oraz woda. Klasyfikację przeprowadzono w obiektowym środowisku klasyfikacji w programie eCognition. Obraz podzielono na trzy poziomy segmentów, które wykorzystywane były w procesie klasyfikacji. Obiekty przypisywano do poszczególnych klas na podstawie wartości spektralnych w poszczególnych kanałach, a także obliczonych wartości współczynników (*ratios*) i indeksów. W procesie klasyfikacji szczególnie przydatne okazały się: znormalizowany różnicowy indeks zabudowy (*Normalised Difference Built-up Index – NDBI*) (Zha et al., 2003), znormalizowany różnicowy indeks wegetacji (*Normalised Difference Vegetation Index – NDVI*) (Rouse et al., 1974), indeks zabudowy (*Built-up Area Index – BAI*) (Zha et al., 2003).

Wyniki klasyfikacji poddano manualnej korekcji, co pozwoliło znacznie zminimalizować błędy. Wyniki wyeksportowano jako warstwy wektorowe w formacie shapefile. Między wszystkimi sąsiadującymi częściami uzgodniono styki. Dla każdej z części przeprowadzono sprawdzenie dokładności klasyfikacji na 200 losowo wybranych punktach. We wszystkich przypadkach dokładność całkowita klasyfikacji wyniosła ponad 85%. Mapę pokrycia terenu uzyskaną na drodze klasyfikacji obrazów satelitarnych uzupełniono o pozyskane z V-Map L2 warstwy wektorowe obejmujące wody śródlądowe (rzeki i zbiorniki wodne), sieć drogową, kolejową i obiekty mostowe.

Ze względu na brak możliwości opracowania dla tak dużego obszaru numerycznego modelu pokrycia terenu (NMPT), wykorzystano wcześniej wygenerowany numeryczny model powierzchni topograficznej (NMT). NMT zmodyfikowano do postaci NMPT przez dodanie stałych wartości wysokości dla poszczególnych klas (las +10 m, zabudowa +7 m, krzewy i zarośla +4 m).

Realizacja modelu przenikalności granicy polsko-ukraińskiej

Tabela. Prędkości poruszania się pieszego przyjęte dla poszczególnych rodzajów pokrycia terenu

Klasa pokrycia	Prędkość [km/h]
Zakrzewienia	2,00
Lasy	2,50
Tereny rolnicze	3,00
Odkryta gleba	4,00
Koleje	4,50
Tereny zurbanizowane	4,75
Drogi	5,00

Modelowanie komponentu *walk* rozpoczęto od przypisania poszczególnym klasom obiektów reprezentowanych na mapie pokrycia terenu założonej prędkości poruszania się pieszego (tabela).

Prędkości poruszania się pieszego przyjęte dla poszczególnych rodzajów pokrycia terenu przeliczono następnie na czas (wyrażony w sekundach) potrzebny do przebycia odległości jednego metra. Wartości te przypisano poszczególnym komórkom rastra, generując w ten sposób mapę kosztów jednostkowych (współczynników tarcia) związanych z poruszaniem się pieszego w terenie płaskim o różnym pokryciu. Na ostateczną mapę współczynników tarcia nałożono również, jako bariery dla ruchu pieszego, zbiorniki wodne i rzeki, uwzględniając istnienie mostów drogowych i kolejowych.

Opracowana mapa współczynników tarcia wraz z NMT, stanowiły dane wejściowe do modelowania powierzchni kosztów z uwzględnieniem anizotropowości, z wykorzystaniem narzędzia *PathDistance* pakietu ArcGIS. Teoretycznie narzędzie to umożliwia, poprzez wykorzystanie tabeli wprowadzanej przez użytkownika, dowolne zdefiniowanie wpływu kąta pionowego na prędkość poruszania się po terenie. Niestety w praktyce okazało się, że generowane w ten sposób powierzchnie kosztów nie odzwierciedlały prawidłowo wpływu ukształtowania terenu. Narzędzie działało prawidłowo jedynie w przypadku wykorzystania dostępnych w nim predefiniowanych funkcji. Uniemożliwiło to wykorzystanie założonej w pierwotnie opracowanej koncepcji metodycznej zależności podanej przez Toblera (1993). W obliczeniach wykorzystano funkcję secans 5. stopnia, której charakter w największym stopniu odpowiadał zależności Toblera. Założono również, że nachylenie przekraczające 40° stanowi barierę dla ruchu pieszego.

W przypadku komponentu *hide* modelowanie rozpoczęto od wygenerowania masek definiujących komórki stanowiące poszczególne rodzaje miejsc obserwacji – drogi, koleje oraz obszary zabudowy. W tym ostatnim przypadku przyjęto, że obliczenia wykonywane będą jedynie dla pikseli stanowiących krawędzie obszaru. Dla każdego z rodzajów miejsc obserwacji wykonano oddzielnie obliczenia widoczności przy użyciu modułu *Viewshed* pakietu Idrisi Andes. Jako wysokość obserwacji przyjęto 2 metry.

Wskaźnik ekspozycji wizualnej dla poszczególnych komórek rastra uzyskano stosując wzór (2). Wagi określające „moc obserwacji” przyjęto arbitralnie w sposób następujący: koleje – 1, drogi – 10, zabudowa – 100. Aby uwzględnić spadek prawdopodobieństwa zauważenia obiektu (pieszego) w terenie wraz z jego odległością od obserwatora, obliczenia przeprowadzono dla zakresów widoczności wynoszących: do 500 m, 500-1000 m, 1000-1500 m i 1500-2000 m. Dla wyznaczenia spadku prawdopodobieństwa obserwacji wraz ze zwiększającą się odległością od punktu obserwowanego wykorzystana została zależność (Ipswich Council, 2002):

$$P_o = (1 - 0.001)^d \quad (4)$$

gdzie:

P_o – prawdopodobieństwo obserwacji,

n – odległość od obserwatora wyrażona w metrach.

W przypadku pikseli znajdujących się wewnątrz obszarów zadrzewionych, uwzględniono dodatkowo odległość od granicy terenu zadrzewionego, przyjmując iż w terenie tym prawdopodobieństwo obserwacji podlega zależności (Ipswich Council, 2002):

$$P_o = (1 - 0.01)^n \quad (5)$$

Obliczenia wartości wskaźnika ekspozycji wizualnej dokonano sumując wyniki uzyskane dla poszczególnych rodzajów miejsc obserwacji i zakresów odległości. Powstałą mapę skorygowano przypisując obszarom zabudowy maksymalną wartość wskaźnika ekspozycji jaką uzyskano na drodze modelowania (założono, że w granicach terenu zabudowanego nielegalny imigrant jest w maksymalny sposób narażony na zaobserwowanie przez przypadkowe osoby) oraz wartość zerową terenom wód powierzchniowych (założono, że są to obszary, po których nie można się poruszać pieszo).

W wyniku przeprowadzonego modelowania otrzymano trzy mapy wynikowe przedstawiające komponenty *walk* i *hide* oraz wskaźnik przenikalności granicy w ujęciu syntetycznym (rys. 6).

Analiza przenikalności granicy polsko-ukraińskiej, z punktu widzenia determinowanej czynnikami fizjograficznymi łatwości poruszania się osoby pieszej, pokazuje że zdecydowanie trudniejsze warunki występują w południowej części obszaru analiz. Jest to fragment pogranicza o charakterze górskim (Bieszczady). Obszar ten jest jednak jednocześnie atrakcyjny z punktu widzenia możliwości ukrycia się osoby chcącej w sposób nielegalny przekroczyć granicę. Najmniej korzystne pod tym względem warunki (dla nielegalnego imigranta) występują w centralnej części pogranicza w obszarze pomiędzy miejscowościami Chełm, Hrubieszów, Tomaszów Lubelski (po stronie polskiej) oraz Nowowołyńsk, Sokal, Czerwonograd (po stronie ukraińskiej). Wyniki modelowania wskazują również na zwiększone ryzyko zostania zaobserwowanym w rejonie pomiędzy Przemyślem a Jarosławiem oraz w okolicach Lubaczowa. Wszystkie te obszary to rejon o stosunkowo wysokim stopniu urbanizacji i zwiększonej gęstości sieci komunikacyjnej.

Analizując wyniki modelowania syntetycznego wskaźnika przenikalności granicy, zidentyfikować można obszary o podwyższonym ryzyku występowania szlaków nielegalnego jej przekraczania. Są to:

- rejon Bieszczadów (tereny na południe od Przemyśla) – fragment pogranicza najtrudniejszy dla przejścia pieszego, ale jednocześnie bardzo atrakcyjny pod względem możliwości ukrycia się (urozmaicona rzeźba terenu, wysoki stopień lesistości, rzadka sieć osadnicza i komunikacyjna),
- zalesione obszary pomiędzy Jarosławiem a Bełżcem, z wyłączeniem bardziej zurbanizowanych okolic Lubaczowa,
- rejon północnego krańca granicy polsko-ukraińskiej – również zalesiony i słabo zurbanizowany.

Dokładniejsza analiza uzyskanych wyników pozwala na bardziej szczegółową identyfikację znajdujących się w tych rejonach obszarów o największym stopniu potencjalnej przenikalności.

Podsumowanie i wnioski

Przedstawiona metodyka modelowania przestrzennego potencjalnych dróg nielegalnego przenikania granicy lądowej przez osoby poruszające się pieszo bazuje na koncepcji wskaźnika przenikalności granicy (*Border Permeability Index – BPI*) (Stephenne, Pesaresi, 2006). Koncepcja ta została jednak w znaczący sposób zmodyfikowana oraz dostosowana do większej skali opracowania i wyższej dokładności dostępnych w tej skali danych przestrzennych. W efekcie konieczne było przededefiniowanie samego wskaźnika BPI oraz zaproponowanie zupełnie odmiennego podejścia do konstrukcji modelu.

Przyjęte założenia metodyczne zweryfikowano dokonując modelowania dla obszaru pogranicza polsko-ukraińskiego. Zaznaczyć należy, że całość procesu modelowania zrealizowana została w ten sposób, że efektem końcowym są również narzędzia umożliwiające wykonanie modelowania użytkownikowi nie posiadającemu zaawansowanej znajomości systemów informacji geograficznej. Poszczególne kroki modelowania dostępne są dla użytkownika jako gotowe modele, wymagające jedynie zdefiniowania parametrów opcjonalnych. Do ich uruchomienia potrzebne jest posiadanie pakietów ArcGIS i Idrisi.

Uzyskane wyniki poddane zostały kontroli tematycznej i jakościowej na drodze konsultacji przeprowadzonych z przedstawicielami Straży Granicznej patrolującymi analizowany teren. Funkcjonariusze Straży Granicznej ocenili je pozytywnie i wstępnie potwierdzili możliwość wykorzystania opracowanych produktów do wsparcia działań prowadzonych w terenie. Ze względu na poufność danych operacyjnych nie zostały przez Straż Graniczną udostępnione materiały, które mogłyby posłużyć jako dane referencyjne w procesie walidacji. W oparciu o te konsultacje uzyskane wyniki, chociaż wymagające dalszej szczegółowej weryfikacji, uznać należy za satysfakcjonujące i potwierdzające prawidłowość zaproponowanego podejścia.

Powstały model może być oczywiście dalej ulepszany. W przypadku komponentu *walk* możliwe jest na przykład zweryfikowanie w terenie wynikowych czasów przejścia i w razie potrzeby modyfikacja przyjętych założeń dotyczących prędkości poruszania się pieszego w różnych typach pokrycia terenu czy przy różnych kątach nachylenia. Możliwe jest oczywiście również zwiększenie liczby klas pokrycia terenu i uwzględnienie dodatkowych utrudnień fizjograficznych (np. podmokłości). W przypadku komponentu *hide* ulepszenia wymaga z pewnością numeryczny model pokrycia terenu (NMPT). Można sobie wyobrazić, że nawet w przypadku jego tworzenia z NMT, wysokości obiektów terenowych określone są w sposób zróżnicowany przestrzennie (np. z wykorzystaniem danych atrybutowych V-mapy lub danych z leśnej mapy numerycznej). Również w przypadku określania ekspozycji wizualnej, wagi dla poszczególnych punktów obserwacji mogłyby być oparte o informacje o natężeniu ruchu na drogach czy liczby mieszkańców w poszczególnych obszarach zurbanizowanych. Można nawet wyobrazić sobie, że zarówno dane wysokościowe, jaki i aktualne informacje o pokryciu terenu, pozyskiwane są ze specjalnie w tym celu wykonanych zobrażeń teledetekcyjnych.

Literatura

- Bang S., Heo J., Han S., Sohn H.-G., 2010: Infiltration Route Analysis Using Thermal Observation Devices (TOD) and Optimization Techniques in a GIS Environment. *Sensors* 10: 342-360.
- Drzewiecki W., Hejmanowska B., Pirowski T., 1999: Przykładowe analizy przestrzenne w oparciu o Komputerowy Atlas Województwa Krakowskiego (KAWK). *Archiwum Fotogrametrii, Kartografii i Teledetekcji* vol. 9: 233-244.
- Franklin W.R., Inanc M., Xie Z., Tracy D.M., Cutler B., Andrade M.V.A., 2007: Smugglers and Border Guards – The GeoStar Project at RPI. Proceedings of ACMGIS'07, November 7-9, 2007, Seattle, WA.
- Fritz S., Carver S., See L., 2000: New GIS Approaches to Wild Land Mapping in Europe. USDA Forest Service Proceedings RMRS-P-15-VOL-2.
- Ipswich City Council, 2002: Visual Exposure of Landscapes in the Bremen River Catchment and the Middle Brisbane River Catchment.
- Lee J., Stucky D., 1998: On applying viewshed analysis for determining least-cost paths on Digital Elevation Models. *International Journal of Geographical Information Science* 12, 8: 891-905.
- Malinowski R., 2010: Land Border Monitoring with remote sensing technologies. Proceedings of SPIE, vol. 7745.
- Rouse J., Haas R., Schell J., Deering D., 1974: Monitoring Vegetation Systems in the Great Plains with ERTS. Proceedings, 3rd Earth Resource Technology Satellite (ERTS) Symposium, vol. 1: 48-62.
- Stephene N., Pesaresi M., 2006: Spatial Permeability Model at the European Union Land Border, EUR report 22332 (Luxembourg: European Commission / DG-JRC / IPSC).
- Stephene N., Zeug G., 2007: Border permeability modelling: technical specifications at global and local scale, [In:] Zeug, G., Pesaresi, M. (eds.), Global Monitoring for Security and Stability (GMOSS) – Integrated Scientific Technological Research supporting security aspects of the European Union, EU-report EUR 23033 EN: 223-240.
- Tobler W. R., 1993: Three presentations on geographical analysis and modeling. Technical Report 93–1. Santa Barbara, CA: National Center for Geographic Information and Analysis.
- Zha Y., Gao J., Ni S., 2003: Use of Normalised Difference Vegetation Index in Automatically Mapping Urban Areas from TM Imagery. *International Journal of Remote Sensing* 24(3): 583-594.

Abstract

One of the main objectives of geographical information systems is to support the process of decision making. Spatial modeling can be a useful tool to provide such support also for the analyses of general security, including preventing illegal border crossing (immigration and smuggling).

The paper presents a spatial model to estimate the level of border permeability. The model is based on Border Permeability Index (BPI) concept as presented by Stephene and Pesaresi (2006). The valuation of the border and the borderland was done with the use of only physiographic factors. There was analyzed the attractiveness of the border-crossing way for an adult person who plans to cross it illegally on foot in summertime. The model comprises two elements. 'Walk' describes the attractiveness of the area for fast covering the distances on foot. 'Hide' describes the attractiveness of the area to stay unseen.

The data for the analyses was provided by V-Map 2, archival topographic maps and mid-resolution satellite images (Landsat 7 ETM+). The data used in the presented spatial modeling was much more detailed in comparison with the data used by Stephene and Pesaresi (2006). This fact resulted in a completely different attitude to the model construction and, consequently, in a different definition of the Border Permeability Index (BPI).

The model was applied to assess the border permeability between Poland and Ukraine. It comprises a part of the G-MOSAIC (GMES services for Management of Operations, Situation Awareness and Intelligence for Regional Crises) a project conducted by CBK PAN.

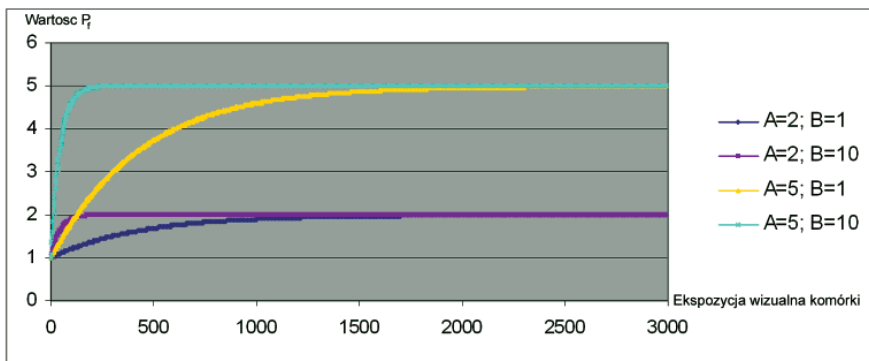
Wojciech Drzewiecki
drzewiec@agh.edu.pl
tel. 12 617 22 88

Małgorzata Jenerowicz
mjenerowicz@cbk.waw.pl
tel. 22 496 63 99

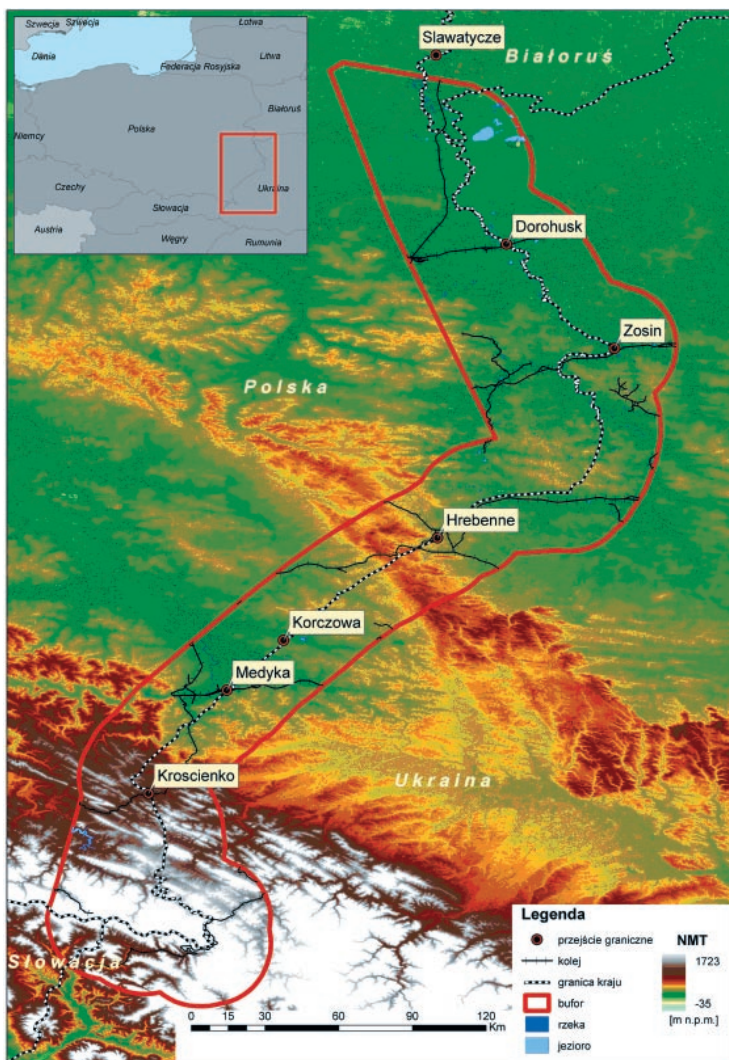
Sebastian Aleksandrowicz
saleksandrowicz@cbk.waw.pl
tel. 22 496 63 88

Michał Kurpiński
mkurpinski@cbk.waw.pl
tel. 22 496 63 88

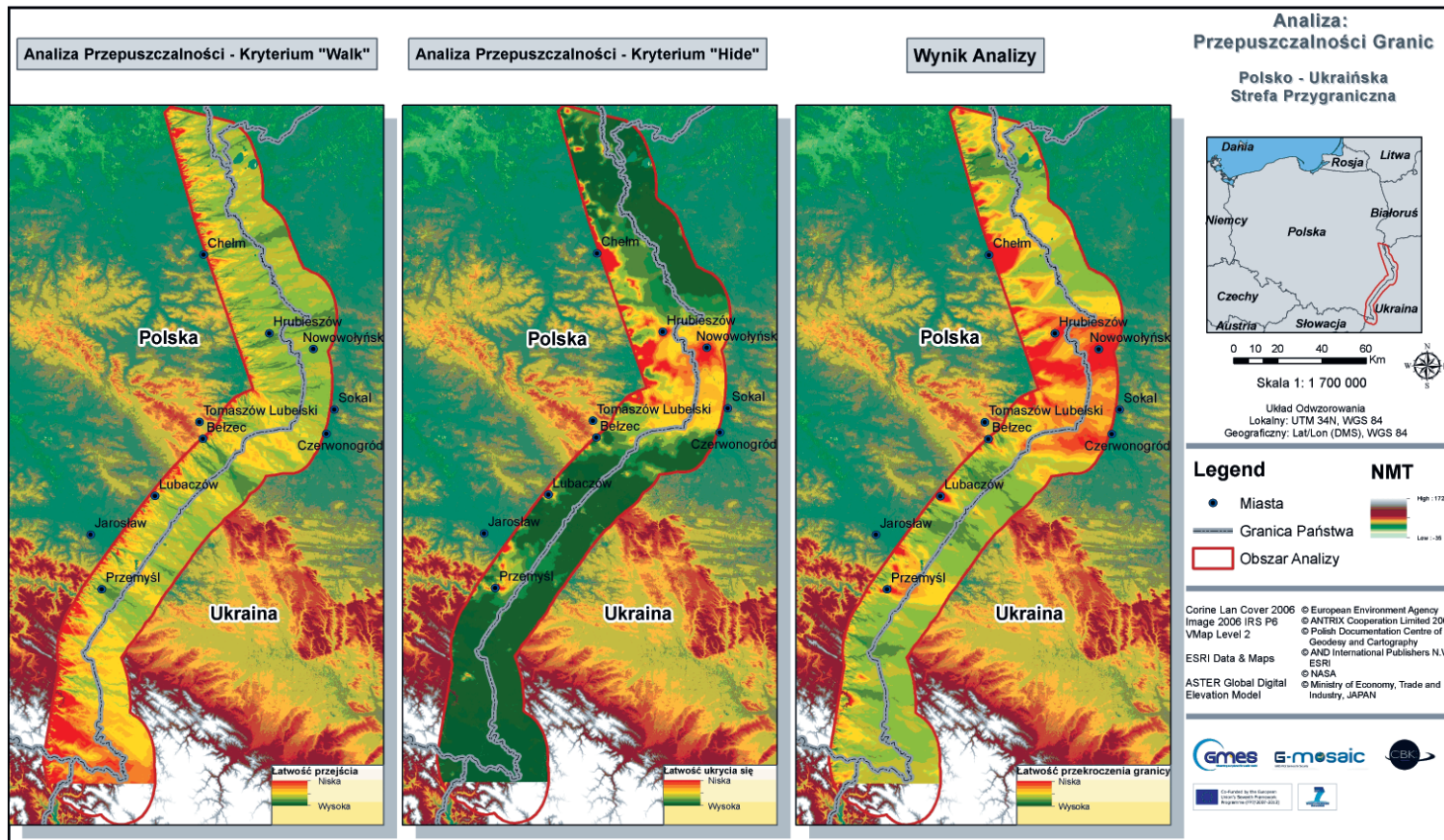
gmes.cbk.waw.pl



Rys. 3. Wykresy wartości przyjmowanych przez współczynnik P_f w zależności od wartości ekspozycji wizualnej dla wybranych wartości parametrów A i B



Rys. 5. Granice obszaru testowego na tle NMT



Rys. 6. Prezentacja wyników analizy