

Tomasz Oberski¹, Aleksander Zarnowski¹

ANALIZA WPŁYWU RZEŻBY TERENU NA KSZTAŁTOWANIE KRAJOBRAZU PRZYRODNICZEGO I JEGO ZAGOSPODAROWANIE

Streszczenie. Ukształtowanie rzeźby terenu ma podstawowy wpływ na zjawiska przyrodnicze zachodzące na powierzchni Ziemi. Dyrektywa 2000/60/WE (Ramowa Dyrektywa Wodna) Parlamentu Europejskiego i Rady Europy (23.10.2000) nakazuje wprowadzenie obowiązku zrównoważonego gospodarowania zasobami wody, między innymi poprzez ochronę przed pogarszaniem się stanu wód, ekosystemów wodnych oraz ekosystemów lądowych i terenów podmokłych zależnych od wody. Geneza powstania terenów podmokłych oraz zbiorników naturalnych wody związana ze strukturą i typem gleb, ukształtowaniem terenu, ze spływem powierzchniowym wód w cyklu hydrologicznym oraz z wodami podziemnymi, które przy pochylej warstwie nieprzepuszczalnej występują w postaci strumienia płynącej wody, znajdującej ujście w postaci źródeł lub sap. Ukształtowanie terenu jest funkcją grawitacyjnego zniesienia stokowego gleby będącego gęsto-plastycznym biegiem złoza powierzchniowego po powierzchni nachylonej opisywanym równaniem Szwedowa-Binghama. Ruch gleby na skosach ustaje po osiągnięciu nachylenia końcowego. Stanem końcowym będzie profil $H = H_0$, na którym krusz już jest w warunkach stabilności. W miarę upływu czasu kształt profilu dowolnego zbocza stanie się regularny niezależnie od jego stanu pierwotnego, przy czym w jego dolnej części uformuje się strefa akumulacji kruszy, która przy określonych warunkach hydrologicznych i glebowych stanowić będzie naturalną zaporę wód powierzchniowych i zaskórnych. Celem prowadzenia badań było opracowanie metod oceny stabilności ukształtowania terenu z wykorzystaniem nowoczesnych metod fotogrametrycznych i geoinformacyjnych oraz pozyskiwania obszarów zagrożonych podtopieniem i zanieczyszczeniami związanymi z powierzchniowymi oraz gruntowymi spływami wód.

Słowa kluczowe: ochrona środowiska, zanieczyszczenia wód, zanieczyszczenia gleb, zagospodarowanie terenu, GIS, NMRT, metody fotogrametryczne.

WSTĘP

Charakterystyka terenu, deniwelacja, stopień pofałdowania, wysokość i inne czynniki mają wpływ na zjawiska przyrodnicze zachodzące na jego powierzchni. Wiele dziedzin gospodarki i nauki takich jak zagospodarowanie przestrzenne, melio-

¹ Politechnika Koszalińska, Wydział Inżynierii Lądowej, Środowiska i Geodezji, Katedra Geoinformatyki, ul. Śniadeckich 2, 75-453 Koszalin, e-mail: tomasz.oberski@tu.koszalin.pl; e-mail: azarnowski@wilsig.tu.koszalin.pl

racja i gospodarka wodna, hydrogeologia, rolnictwo, budownictwo, geodezja i inne wymaga precyzyjnych badań charakterystyk powierzchni topograficznej i ich wpływu na podejmowane decyzje.

Szczególnie istotnym czynnikiem koniecznym do wzięcia pod uwagę przy opracowaniu charakterystyki terenu dla określonego obszaru np. przeznaczonego pod zagospodarowanie jest podatność na wystąpienie zabagnień i podmokłości. Podmokłości mogą mieć charakter okresowy lub stały, a przyczyny ich występowania mogą być bardzo różnorodne. W przypadku podmokłości o charakterze stałym nie ma większego problemu z ich zlokalizowaniem. Najczęściej wystarczy wywiad terenowy.

Inaczej wygląda sytuacja z podmokłościami okresowymi, a szczególnie tymi które są krótkotrwałe, występujące często na chłonnych glebach. W takich przypadkach proces zalewania wodą trwa krótki okres czasu, jest trudny do wykrycia i praktycznie niemożliwe jest określenie jego zasięgu przestrzennego podczas badań terenowych. W analizach związanych z badaniem terenu pod kątem szukania miejsc podatnych na występowanie podmokłości należy przede wszystkim uwzględnić czynniki, które mają wpływ na ich powstawanie.

Bezpośrednią przyczyną ich występowania jest obecność nadmiaru wody w danym obszarze. Jest on często konsekwencją charakterystycznego ukształtowania rzeźby terenu. Uwzględniając istotne znaczenie rzeźby terenu można określić genezę powstawania zabagnień i miejsc podmokłych. Analizy ukształtowania terenu powinny być przeprowadzane są przy użyciu nowoczesnych technologii fotogrametrycznych i geoinformatycznych. W miejscach występowania zabagnień można spodziewać się zwiększonego stężenia substancji szkodliwych transportowanych przez wody spływowe i w związku z tym konieczne jest pobranie próbek wód i gleb oraz przeprowadzenie analiz biochemicznych.

Źródłami informacji o ukształtowaniu terenu mogą być pomiary terenowe, mapy topograficzne lub numeryczne modele rzeźby terenu (NMRT - ang. Digital Elevation Model) pozyskane metodą fotogrametryczną, który daje nieporównywalne możliwości prowadzenia analiz powierzchni topograficznej i symulacji wielu zjawisk przyrodniczych [4]. Cechą charakterystyczną metod opartych na analizie danych przestrzennych jest ich powtarzalność, weryfikowalność oraz minimalizacja niezbędnych pomiarów terenowych [3]. Możliwości analizy numerycznej takich danych stwarzają warunki do sprawdzania nowych koncepcji, tworzenia modeli i symulowania zjawisk ekstremalnych.

Niniejszy artykuł przedstawia koncepcję wykorzystania nowoczesnych technik pozyskiwania danych geoprzestrzennych do wyznaczania obszarów podatnych na występowanie podmokłości stałych i okresowych wynikających z ukształtowania terenu w badanym obszarze.

CZYNNIKI WPLYWAJĄCE NA POWSTAWANIE PODMOKŁOŚCI

Proces powstania podmokłości w terenie związany jest z ogólnym obiegiem wody w przyrodzie. Jej ilość wynika bezpośrednio z sumy opadów w danym obszarze i jest

związana ze strefą klimatyczną. W Polsce średnia suma opadów kształtująca się na poziomie 600 mm zapewnia warunki do występowania podmokłości i zabagnień.

Naturalnie ukształtowany teren w każdym miejscu posiada szereg cech określających jego charakterystykę i wskazujących na podatność występowania zjawisk przyrodniczych. Wynikają one z kształtu rzeźby terenu, budowy geologicznej, sposobu zagospodarowania i innych. Dla dowolnego fragmentu terenu można wyznaczyć jego nachylenie średnie jako płaszczyznę aproksymacyjną [6] odzwierciedlającą naturalny spadek terenu. Odniesienie rzeczywistego ukształtowania terenu do odpowiadającej mu płaszczyzny aproksymacyjnej pozwala na określenie ogólnego kierunku spływu wód powierzchniowych.

Spływ powierzchniowy będący sumą opadów atmosferycznych (deszczowe i śnieżne) z uwzględnieniem zatrzymania powierzchniowych wód i infiltracji zależy od intensywności i rozkładu opadów, przepuszczalności i początkowej wilgotności gruntu, czasu trwania opadów, rodzaju pokrycia roślinnością, charakteru drenażu, głębokości wód gruntowych i nachylenia powierzchni [2].

Innym czynnikiem wpływającym na powstawanie podmokłości gleb są wody zaskórne. Wody zaskórne najczęściej są zbiornikami wód stojących, zasilanych prawie wyłącznie przez wsiąkanie opadów atmosferycznych [5]. Podniesienie się zwierciadła wody do powierzchni ziemi jest równoznaczne z zabagnieniem terenu.

Kolejnym czynnikiem sprzyjającym powstawaniu podmokłości i zabagnień mogą być wody podziemne, które nawet przy poziomym układzie warstw nieprzepuszczalnych są zazwyczaj w ruchu. Jak zauważono [5] przy pochylej warstwie nieprzepuszczalnej powstaje strumień płynącej wody, przy czym może on być zgodny z kierunkiem spływu powierzchniowego, albo może być zupełnie od niego niezależny. Woda znajduje w miejscach, gdzie warstwa ta dochodzi do powierzchni gruntu, albo podwodnie zasila zbiorniska wód powierzchniowych, lub też trafiwszy na warstwy wodonośne idące w głąb zasila wody zalegające na większych głębokościach.

GENEZA POWSTANIA TERENÓW PODMOKŁYCH ORAZ ZBIORNIKÓW NATURALNYCH WODY.

Geneza powstania terenów podmokłych oraz zbiorników naturalnych wody związana ze strukturą i typem gleb, ukształtowaniem terenu, ze spływem powierzchniowym wód w cyklu hydrologicznym oraz z wodami podziemnymi, które przy pochylej warstwie nieprzepuszczalnej występują w postaci strumienia płynącej wody, znajdującej ujście w postaci źródeł lub sap. Wobec niejednorodności budowy geologicznej oraz warunków hydrologicznych i klimatycznych formy rzeźby tereny o podobnej strukturze różnią się w szczegółach, które mają znaczny wpływ na powstania terenów podmokłych czy zbiorników naturalnych wody.

Wiadomo, że przekształcenie pierwotnych utworów geologicznych może być zmodelowane jako zniesienie stokowe gleby tzn. jako grawitacyjne gęsto-plastyczne

przesuwanie złoza powierzchniowego po powierzchni nachylonej, które opisuje się równaniem Szwedowa-Binghama [1]:

$$\tau = \tau_p + \eta \frac{dV}{dY} \quad (1)$$

gdzie: τ – napięcie osuwające na głębokości Y , którą odliczamy od podłoża osuwającej się warstwy,

τ_p – napięcie osuwające najwyższe, przy którym zaczyna się deformacja plastyczna,

$\frac{dV}{dY}$ – gradient szybkości przesuwania na głębokości Y ,

η – współczynnik gęstości plastycznej.

Napięcie osuwające może być obliczone na podstawie wzoru:

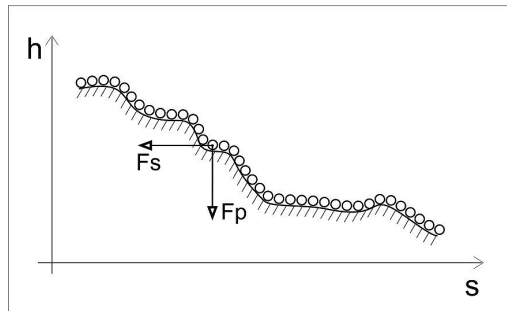
$$\tau = \gamma(H - Y) \cdot \sin \nu \quad (2)$$

gdzie: γ – waga objętościowa gruntu,

H – potężność warstwy się osuwającą,

ν – kąt nachylenia warstwy.

Oczywiście, przy $\tau \leq \tau_p$ ruchu nie będzie $\eta \frac{dV}{dY} = 0$. Stokowy ruch gleby zatrzymuje się przy nachyleniach ostatecznych i stanem końcowym będzie przekrój $H = H_0$, na którym grunt już jest w warunkach stabilności.



Rys. 1. Siły działające na pojedynczą cząstkę gruntu

Fig. 1. The forces acting on a single particle of soil

Dla przekroju przy dowolnych kształtach i warunkach granicznych $\frac{dH}{dt} = 0$ na bazie denudacji $x = 0$ i $\frac{dH}{dx} = 0$ na wierzchu przekroju $x = l$ rozwiązanie równania rozwoju przekroju stoku:

$$\frac{\delta^2 y}{\delta x^2} = \frac{1}{k} \frac{\delta y}{\delta t} \quad (3)$$

można przedstawić jako szereg Fouriera [1]:

$$H = H_0 + \sum_{i=1}^{\infty} A_i e^{-m_i t} \sin a_i x \quad (4)$$

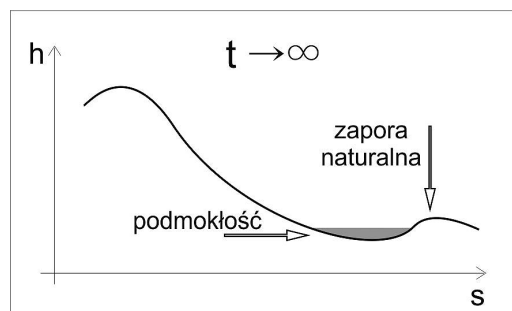
gdzie A_i , a_i , m_i – są stałe, przy tym A_i jest zależne od warunków pierwotnych, a m_i spełnia warunek:

$$m_1 < m_2 < m_3 < \dots < m_n \quad (5)$$

Z warunku tego wynika, że z upływem czasu każdy następny wyraz szeregu (4) maleje szybciej niż poprzedni. Po określonym czasie w szeregu pozostanie tylko pierwszy członek szeregu i równanie (4) przyjmuje postać:

$$H = H_0 + A e^{-m t} \sin ax \quad (6)$$

Wynika z tego, że przy $t \rightarrow \infty$ wyraz pierwszy szeregu znika i pod taką postacią będzie osiągnięty przekrój końcowy $H = H_0$, a skos otrzymuje okres regularny niezależne od jego stanu pierwotnego.



Rys. 2. Kształt zbocza w stanie stabilnym
Fig. 2. Shape of slope in steady-state

Ustawiony na podstawie wzoru (6) przekrój końcowy $H = H_0$ możemy określić jako równowagę dwóch składników: energii potencjalnej cząstek, z których składa się skos, i sił przylegania cząstek, które utrzymują je w masywie (tzn. sił tarcia).

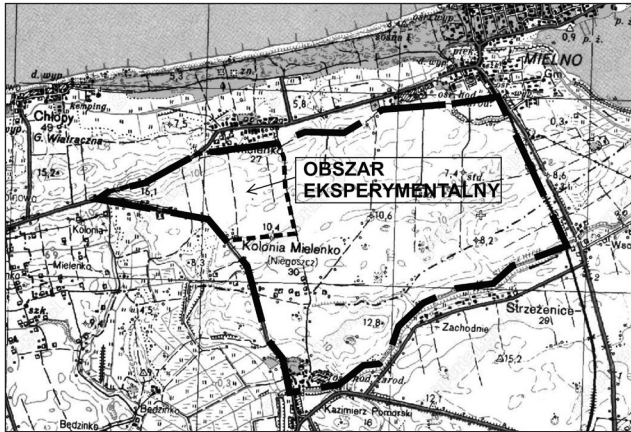
Przewaga energii potencjalnej cząstek nad siłami ich przylegania wyzwała proces modyfikacji przekroju skosu aż do momentu, w którym nastąpi równowaga tych składników i przekrój będzie mieć charakter stabilny (końcowy).

PRACE EKSPERYMENTALNE

Obiektem badań jest teren o powierzchni 850 hektarów zlokalizowany na wybrzeżu środkowym w pobliżu morza Bałtyckiego. Przy wyborze obiektu wykorzystano mapę topograficzną w skali 1:10000 z cięciem warstwicowym 1,25 m oraz barwne cyfrowe zdjęcia lotnicze.

W celu sprawdzania przydatności opracowanych metod i technologii oraz testu oprogramowania wybrano mniejszy obszar, w którym teren charakteryzuje się

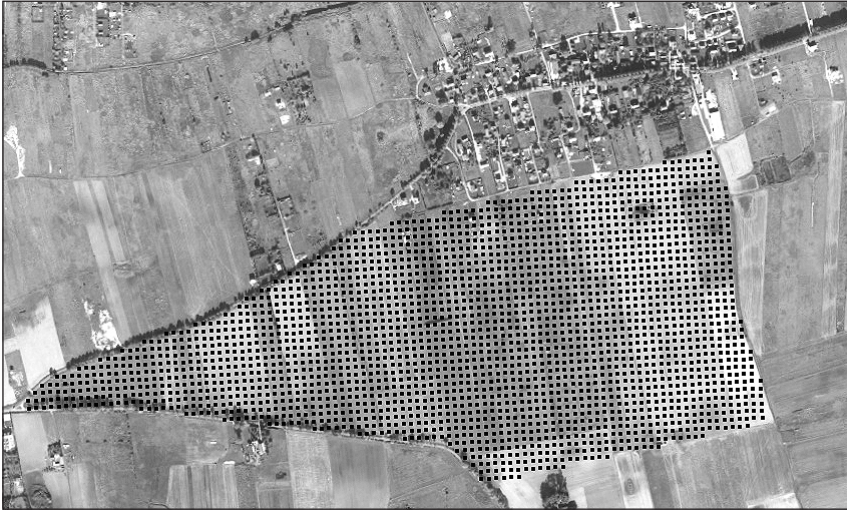
spadkiem w kierunku południowo-wschodnim. Obszar obejmuje tereny regularnie uprawiane rolniczo. Różnice wysokości w badanym obszarze wynoszą od około 4 m n.p.m. do około 15 m n.p.m. Od strony zachodniej i północnej ograniczony jest drogą utwardzoną, od strony wschodniej droga gruntową, a od południa rowem melioracyjnym.



Rys. 3. Obiekt badań
Fig. 3. The object of research

W pierwszym etapie pozyskano mapy topograficzne w skali 1:10000 w standardzie TBD oraz cyfrowe obrazy lotnicze wraz z dokumentacją lotu fotogrametrycznego i metryką kamery. Mapy topograficzne wykorzystano jako źródło wyznaczenia granic obszaru testowego charakteryzującego się jednorodną strukturą zagospodarowania, charakterystyczną dla terenów wiejskich przeznaczonych pod uprawy rolne.

Do eksperymentu wykorzystano obrazy cyfrowe o terenowym rozmiarze piksela 0,35 m wykonane 3.10.2010 r. Do ich wykonania użyto kamery fotogrametrycznej UltraCamD ze stożkiem 101,4 mm, a wysokość lotu wynosiła 3950 m. Przy wykonaniu nalotu wykorzystano integralny system GPS/INS dla określenia elementów orientacji zewnętrznej (EOZ). Podane w uzyskanych dokumentach EOZ wykorzystano przy rejestracji projektu na cyfrowej fotogrametrycznej stacji roboczej DEPHOS i za pomocą narzędzia MapperStereo zbadano dokładność wyznaczania wysokości na punktach kontrolnych. Analiza dokładności pokazała, że dokładność wyznaczania EOZ jest niewystarczająca. Dlatego wykonano standardowe opracowanie stereogramu z wykorzystaniem cyfrowej stacji fotogrametrycznej Dephos (dwa obrazy cyfrowe, dane z kalibracji kamery oraz fotopunkty naturalne). Terenowa osnowa fotogrametryczna i punkty kontrolne dla oceny dokładności budowy NMRT pozyskano techniką GPS (Leica GPS 1200). Opracowanie NMRT wykonano na cyfrowej stacji fotogrametrycznej DEPHOS za pomocą narzędzia MapperStereo w postaci modelu regularnego z bokiem kwadratu 20 m.



Rys. 4. NMRT wykonany w module Mapper3D programu Dephos
Fig. 4. DTM made with Dephos software using Mapper3D module

Tabela 1. Wyniki kontroli dokładności NMT w oparciu o punkty kontrolne
Table 1. Results of DTM accuracy test based on ground control points

| Nr | Pomiar terenowy | | | pomiar 3D | Δz |
|-----|-----------------|-----------|-------|-----------|------------|
| | x [m] | y [m] | z [m] | z1 [m] | [m] |
| 06a | 712061.96 | 305310.37 | 7.18 | 7.15 | -0.03 |
| 04a | 712666.37 | 305059.73 | 6.74 | 6.44 | -0.30 |
| 04b | 712705.23 | 305057.08 | 6.79 | 6.71 | -0.08 |
| 03a | 712800.31 | 304083.25 | 11.76 | 12.01 | 0.25 |
| 05b | 711863.28 | 304163.49 | 8.56 | 9.05 | 0.49 |
| 02c | 713537.54 | 305333.16 | 3.87 | 3.33 | -0.54 |

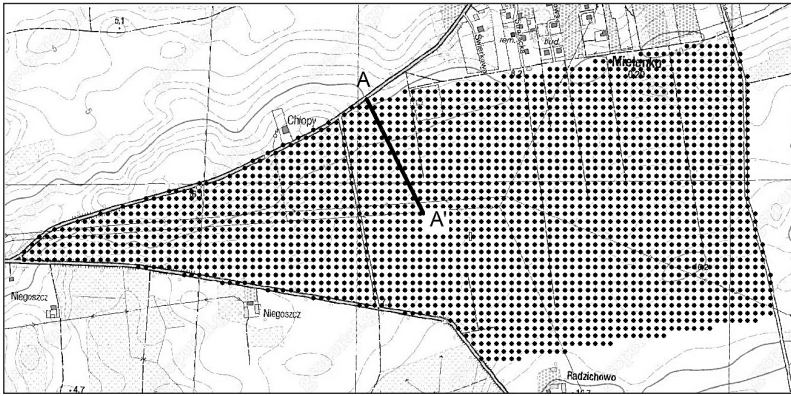
Oceny dokładności NMRT dokonano w oparciu o punkty kontrolne zmierzone w terenie, a średni błąd dokładności pozyskania NMRT wynosi $m_z = \pm 0,26$ m.

Na podstawie utworzonego NMRT przy pomocy własnego oprogramowania oraz darmowego środowiska Octave wyznaczono metodą MNK model płaszczyzny aproksymacyjnej powierzchni topograficznej dla wybranego obszaru testowego. Płaszczyzna wyrażona wzorem w postaci ogólnej $Z_i = Ax_i + By_i + C$ uzyskała następujące wartości współczynników:

$$A = 0,006; B = -0,003; C = 266,899$$

Po ustawieniu kierunku największego spadku ($A = 158^\circ$) numeryczny model w postaci regularnej był przetransformowany w model półregularny w postaci przekrojów

równoległych do kierunku największego spadku. Jeden z przekrojów (AA' na rysunku 5) jest typowym przekrojem charakteryzującym występującą w obszarze rzeźbę terenu.



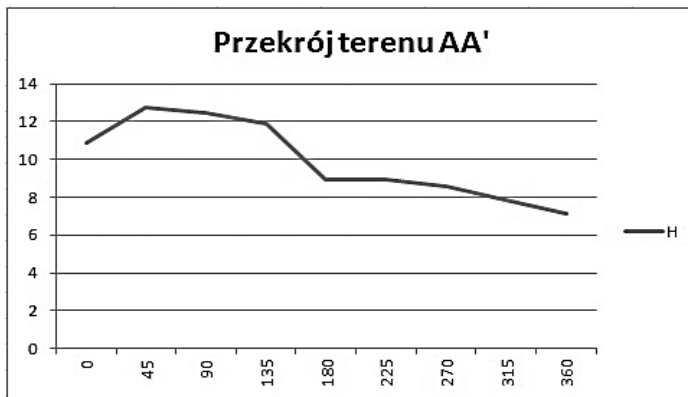
Rys. 5. Typowy przekroju badanego terenu

Fig. 5. DTM cross sections in accordance with direction of gradient

Wygenerowane w ten sposób profile pozwalają:

- ustalić stan rozwoju stoków na danym obszarze,
- rozróżnić stoki w stanie stabilności i niestabilności,
- wyznaczyć obszary zagrożone na podtopienie i zanieczyszczenia.

Jak widać na ilustracji kształt stoku jest zbliżony do kształtu stoku w stanie stabilnym o czym świadczy występowanie kumulacji materiału ziemnego tworzącego naturalną barierę dla wód spływowych.

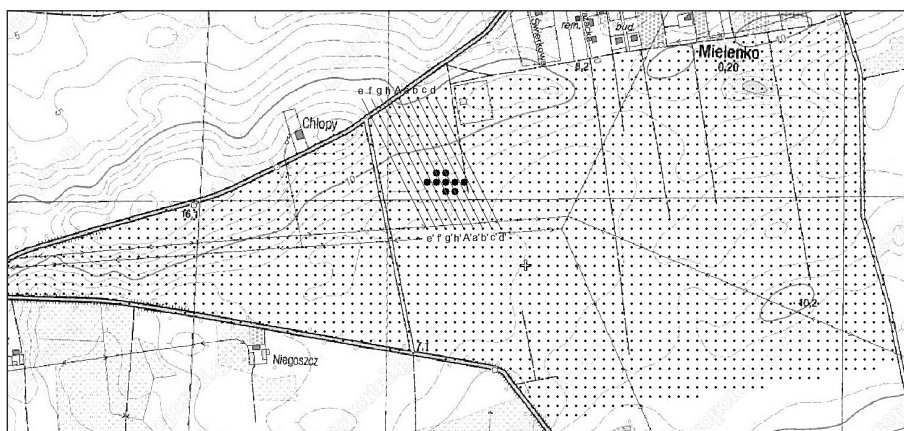


Rys. 6. Przekrój AA'

Fig. 6. Cross section AA'

Określenie zasięgu terenów podmokłych i ich dokładnych granic na podstawie analiz przekrojów jest procesem prostym i może być wykonane zarówno w sposób

ręczny (z wykorzystaniem narzędzi GIS) jak i automatyczne za pomocą własnego oprogramowania.



Rys. 7. Obszar możliwego występowania podmokłości (czarne punkty) określony na podstawie przekrojów AA' – hh'

Fig. 7. Area with possible occurrence of waterlogged (black dots) determined from cross-sections AA' – hh'

PODSUMOWANIE I WNIOSKI

Opracowane metody w porównaniu z tradycyjnymi są mniej pracochłonne, bardziej efektywne ekonomiczne i charakteryzują się wysoką dokładnością. Przedstawiona metoda umożliwia określenie granic terenów podmokłych. Na tych terenach powinny być prowadzone kompleksowe analizy pod kątem budowy geologicznej, składu glebowego oraz struktury zagospodarowania (rodzaj upraw, przeznaczenie terenu). Konieczne jest również pobranie próbek gruntu przeznaczonych do badań biochemicznych pod kątem występowania substancji szkodliwych. Wyniki tych analiz dostarczą informacji na temat możliwości zagospodarowania terenu i związanego z tym sposobu kształtowania krajobrazu.

Badanie prowadzono w ramach tematu rozwojowego Nr 504.01.37 Katedry Geoinformatyki Politechniki Koszalińskiej.

LITERATURA

1. Dewdariani A.C. Itogi nauki. Seria geograficzekaia. Geomorfologia. Izd. Winiti AH CCCP, Moskwa 1966.
2. Hiscock K. Hydrogeology, Principles and Practice. Blackwell Publishing, Malden, USA, Oxford, UK 2005, s. 389.

3. Kozioł K. Zastosowanie wybranych atrybutów NMT w przybliżonym określeniu granic wysokościowych pięter roślinnych na przykładzie nadleśnictwa Piwniczna. *Archiwum Fotogrametrii Kartografii i Teledetekcji*, Vol. 20, Warszawa 2009, s. 215-226.
4. Li Z., Zhu Q., Gold C. *Digital Terrain Modeling. Principles and Methodology*. CRC Press. London, UK 2005.
5. Mioduszewski W. *Ochrona i kształtowanie zasobów wodnych krajobrazie rolniczym*. Wyd. IMUZ, Falenty 1999.
6. Oberski T., Zarnowski A. *Pozyskiwanie naturalnych zbiorników wodnych na podstawie numerycznego modelu rzeźby terenu i narzędzi GIS. Infrastruktura i ekologia obszarów wiejskich*, Kraków 2012, s. 151-164.

ANALYSIS OF THE INFLUENCE OF LANDFORMS ON LANDSCAPE MOLDING AND LAND MANAGEMENT

Summary

Landscaping has a major impact on the natural phenomena that occur on the surface of the Earth. Directive 2000/60/EC of the European Parliament and of the Council of Europe (23/10/2000) prescribes an obligation of sustainable management of water resources, including by protecting them against deterioration of water, aquatic and terrestrial ecosystems and wetlands dependent on water. Origins of wetlands and natural water reservoirs associated with the structure and the type of soil, topography, the surface flow of water in the hydrological cycle and the groundwater that emanates as a stream water under sloping impermeable layer. The Szwedow-Birghman equation describes the function of gravity relating flow of terrain which is density-plastic soil on slope surface. The movement of soil on sloping angle stops after reaching the final state. The final state will profile $H = H_0$ that shows the terrain in stability condition. Over time, the shape of any profile will become regular independent of its original condition, and in its lower part forms a zone of accumulation, which under certain conditions, hydrological and soil will be a natural barrier for surface and underground water. The aim of this study was to develop methods to assess the stability of the terrain using modern methods of photogrammetry and geospatial and gain areas at risk of flooding acquisition and pollution associated with the flow of surface water and groundwater.

Keywords: environmental protection, water pollution, soil pollution, land use, GIS, DTM, photogrammetric methods.