

Od zobrazowania do modelu dna. Wyznaczanie batymetrii satelitarnej w środowisku GIS

Alternatywa dla tradycyjnych pomiarów głębokości

Szacuje się, że wciąż ponad 70% dna oceanicznego pozostaje niezbadane. Tradycyjne metody pomiarowe, oparte o urządzenia hydrograficzne bazujące na detekcji głębokości za pomocą fali akustycznej, są niezwykle drogie i czasochłonne. Dodatkowym ograniczeniem jest brak możliwości mapowania obszarów trudnodostępnych. Rozwiązaniem tego problemu, zyskującym popularność w środowisku hydrografów, jest batymetria satelitarna (*SDB – Satellite-Derived Bathymetry*). Jest to technologia, która pozwala na wykorzystanie wielospektralnych zdjęć satelitarnych w celu wyznaczenia głębokości badanego dna, w oparciu o ich właściwości radiometryczne. Satelity optyczne robią zdjęcia wysokiej rozdzielczości, rejestrując światło słoneczne odbite od dna. Ponieważ woda w różny sposób pochłania fale elektromagnetyczne o różnych długościach, istnieją algorytmy, które pomagają analizować te różnice na zdjęciach, a następnie, w nawiązaniu do danych referencyjnych, z dużą dokładnością obliczyć głębokość.

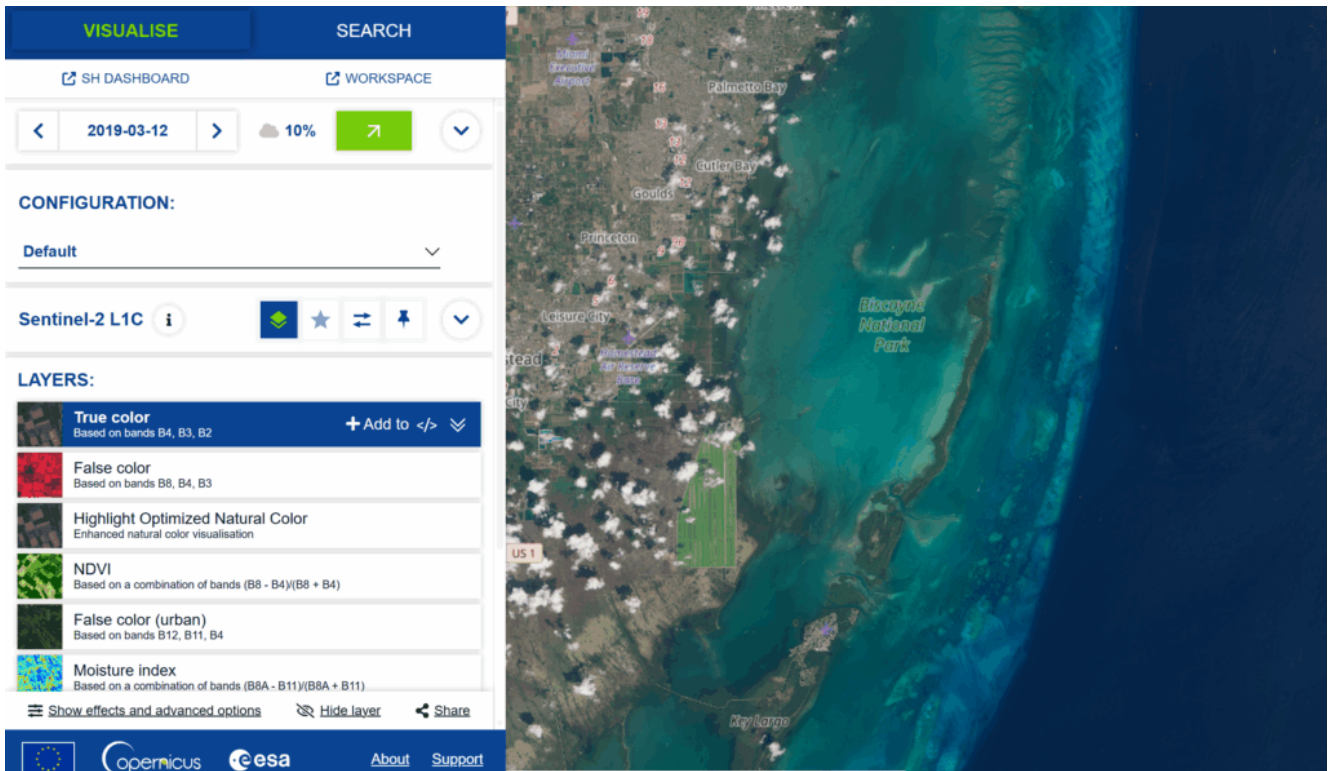
Wybór badanego obszaru

Sukces technik batymetrii satelitarnej w dużej mierze zależy od warunków środowiskowych. Technologia ta wymaga do działania tzw. wód optycznie płytkich, czyli krystalicznie czystych akwenów z jasnym, zróżnicowanym pod względem rzeźby terenu dnem, które dobrze odbija światło słoneczne. Z tego względu

jako obszar doświadczalny dla analizy w środowisku GIS wybrano przybrzeżne wody południowej Florydy, przy Parku Narodowym Biscayne. Region ten charakteryzuje się niskim zmętnieniem wody i dużą przejrzystością.

Wykorzystane dane i ich źródła

Aby przeprowadzić skuteczną estymację głębokości, proces badawczy wymagał zintegrowania dwóch różnych zestawów danych w postaci obrazów satelitarnych oraz precyzyjnych pomiarów referencyjnych. Punktem wyjścia dla analizy były wielospektralne zobrazowania z misji kosmicznej **Sentinel-2**, pozyskane w ramach europejskiego programu Copernicus (Rys. 1). Do projektu wyselekcjonowano produkt o poziomie przetworzenia Level-2A. Oznacza to, że dane zostały już poddane zaawansowanej korekcji atmosferycznej. Pozwoliło to na znaczne usprawnienie całego procesu analitycznego w środowisku ArcGIS Pro, bez konieczności stosowania zewnętrznego oprogramowania do niwelowania wpływu atmosfery na radiometrię obrazu. Rozdzielczość przestrzenna wynosząca 10 metrów pozwala na uchwycenie szczegółowej morfologii dna, a częsty czas rewizyty (5 dni) gwarantuje dostęp do aktualnych i bezchmurnych obrazów, co jest kluczowe przy tej metodzie. Do obliczeń wykorzystano kanały spektralne niebieski i zielony z zakresu światła widzialnego, które charakteryzują się największą zdolnością przenikania w głąb toni wodnej, oraz kanał z zakresu bliskiej podczerwieni, niezbędny do ekstrakcji obszarów wody.



Rys. 1 – Interfejs portalu Copernicus Data Space Ecosystem, z którego pozyskano zobrazowanie Sentinel-2

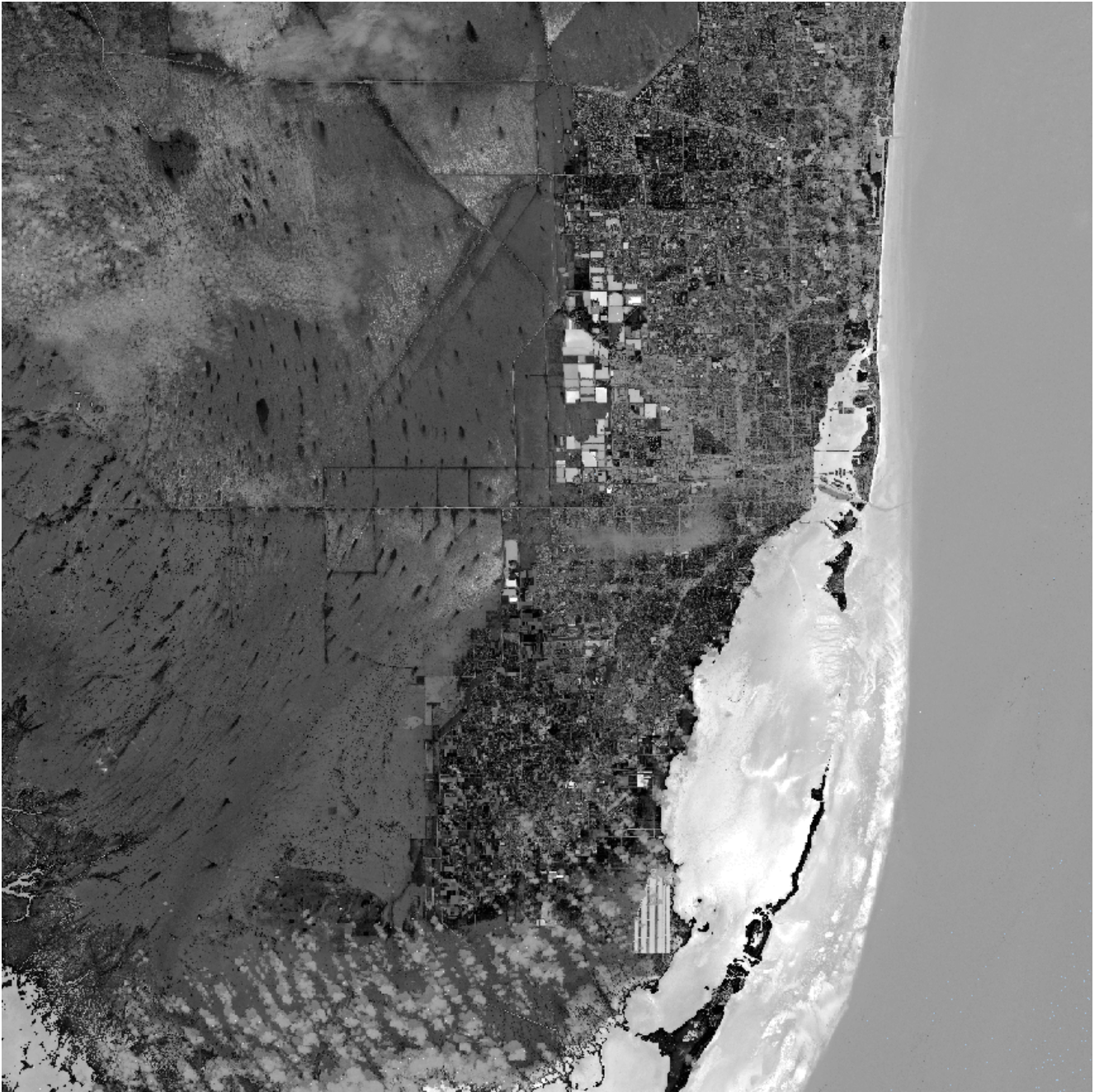
Zestawem danych referencyjnych w niniejszym opracowaniu był wysokorozdzielczy numeryczny model dna udostępniony przez amerykańską agencję **NOAA** (*National Oceanic and Atmospheric Administration*). Model ten został opracowany z wykorzystaniem technologii lotniczego skaningu batymetrycznego (LiDAR). Zastosowanie tych precyzyjnych pomiarów w procesie określania korelacji batymetryczno-radiometrycznych jest dwutorowe. W pierwszej fazie pełniły one funkcję danych kalibracyjnych dla modelu empirycznego, umożliwiając matematyczną transformację bezwymiarowych wskaźników satelitarnych na rzeczywiste wartości głębokości wyrażone w metrach. W końcowym etapie analizy stanowiły one z kolei obiektywny materiał do walidacji wyników oraz przeprowadzenia szczegółowej oceny błędów przestrzennych wygenerowanej mapy SDB.

Kluczowym kryterium doboru obu zestawów danych była ich spójność czasowa. Strefa przybrzeżna to środowisko wysoce dynamiczne, w którym ukształtowanie dna ulega ciągłym przeobrażeniom pod wpływem falowania i prądów morskich. Aby zminimalizować błędy estymacji wynikające z tych naturalnych

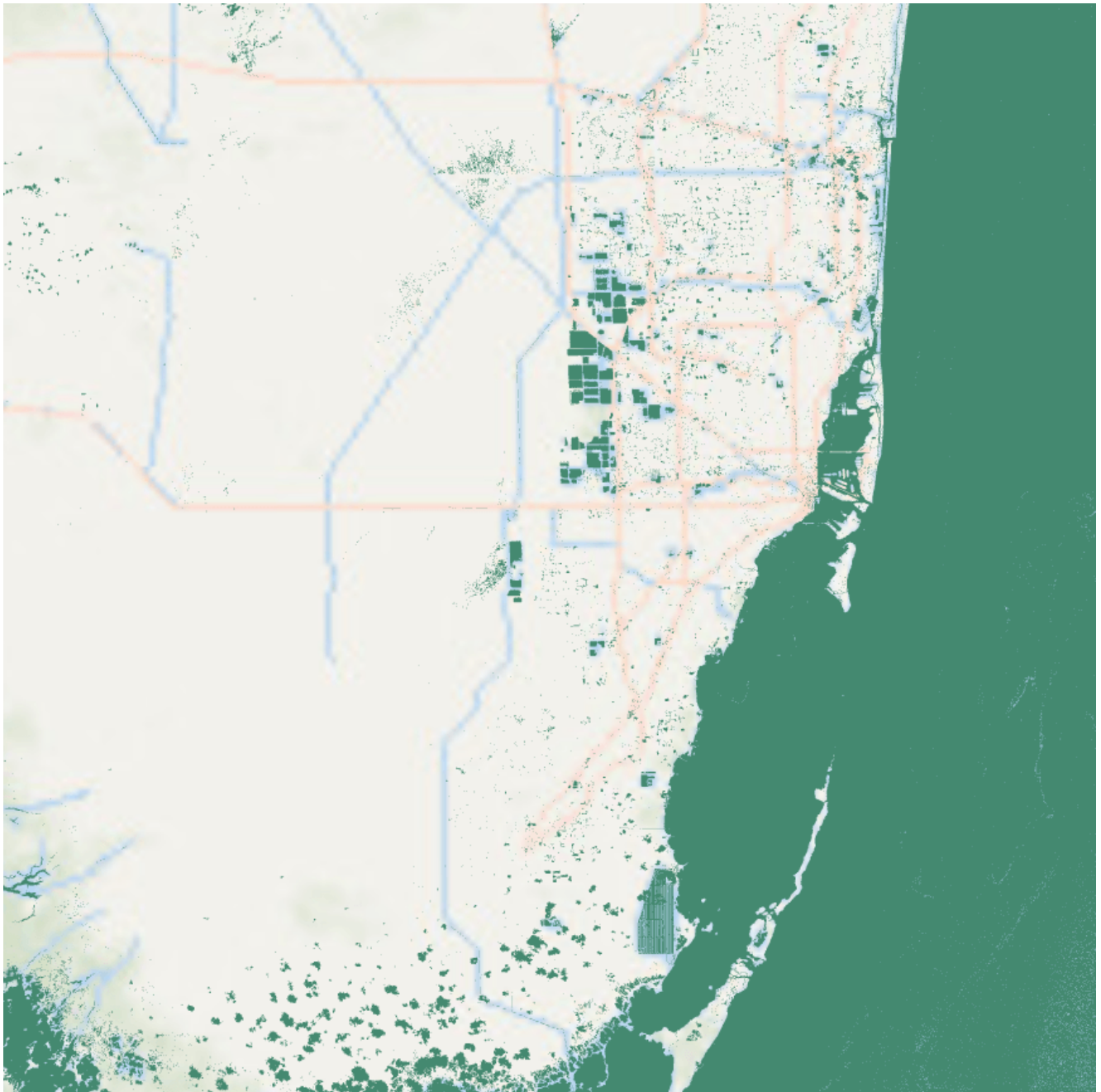
zmian, zobrazowania optyczne Sentinel-2 oraz referencyjne naloty LiDAR pochodzą z tego samego okresu badawczego. Zostały one pozyskane w marcu 2019 roku.

Oddzielenie lądu od wody

Pierwszym krokiem w przygotowaniu zobrazowań do analizy batymetrycznej było stworzenie maski akwenu. W środowisku ArcGIS Pro wykorzystano w tym celu znormalizowany różnicowy wskaźnik wody – NDWI (*Normalized Difference Water Index*), który opiera się na relacji pasm zielonego oraz bliskiej podczerwieni. Operacja ta, wykonana przy użyciu narzędzia *Raster Calculator*, pozwoliła na automatyczne odizolowanie obszarów wodnych od lądu oraz roślinności przybrzeżnej, co było niezbędne do dalszego przetwarzania. Wartość $NDWI < 0$ oznacza ląd, a $NDWI > 0$ oznacza wodę (Rys. 2).







Rys. 2 – Etapy separacji lądu od wody w środowisku ArcGIS Pro: obliczenie wskaźnika NDWI, reklasyfikacja rastra oraz wygenerowanie maski akwenu dla analizowanego obszaru wybrzeża Florydy

Tak przygotowaną maskę wody wykorzystano do przycięcia zobrażeń satelitarnych w paśmie zielonym i niebieskim. W tym celu wykorzystano narzędzie *Extract by Mask*.

Wyznaczenie batymetrii algorytmem Stumpfa

Po skutecznym odizolowaniu obszaru wodnego, przystąpiono do estymacji głębokości

z wykorzystaniem algorytmu proporcji pasm (*Band Ratio Algorithm*), opracowanego przez Richarda Stumpfa. Metoda ta bazuje na fakcie, że światło niebieskie przenika przez słup wody efektywniej niż światło zielone. Zmiana stosunku odbicia w tych dwóch zakresach spektralnych wykazuje silną korelację z batymetrią, co czyni ten algorytm niezwykle skutecznym narzędziem

w płytkich wodach przybrzeżnych.

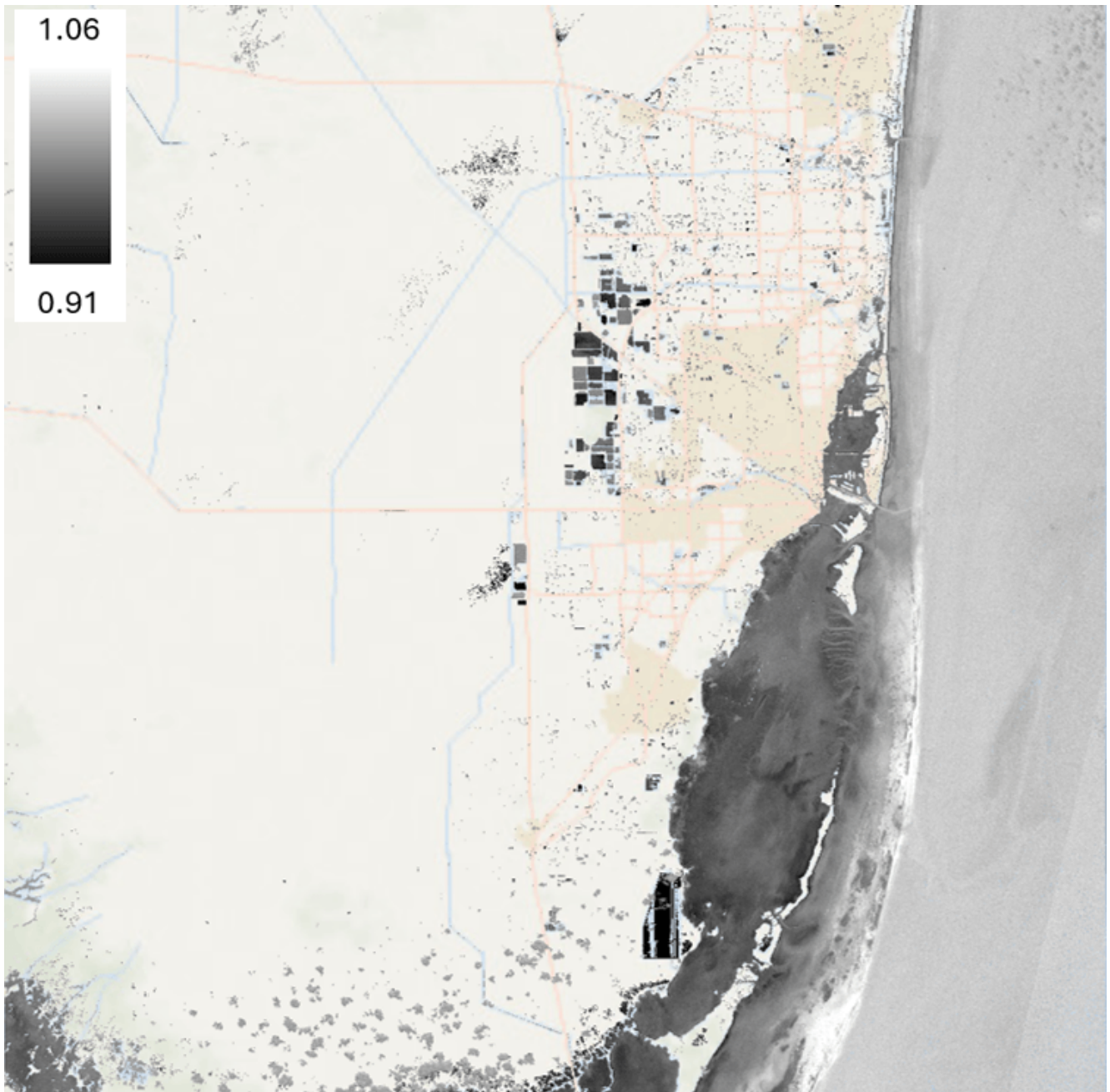
W środowisku ArcGIS Pro operacja ta została przeprowadzona w narzędziu *Raster Calculator*,

z użyciem formuły widocznej na Rys. 3.

$$\text{Ln}(1000 * \text{"B02_Woda"}) / \text{Ln}(1000 * \text{"B03_Woda"})$$

Rys. 3 – Formuła algorytmu Stumpfa

Zastosowanie stałej mnożnikowej miało na celu zapewnienie dodatnich wartości pikseli przed operacją logarytmowania naturalnego, co wyeliminowało błędy obliczeniowe związane z szumem atmosferycznym. Wynikiem tego etapu był raster pseudo-batymetrii, obrazujący względne zróżnicowanie rzeźby dna, który stanowił bazę do finalnej kalibracji na dane referencyjne LiDAR (Rys. 4)



Rys. 4 – Wynikowy raster pseudo-batymetrii obrazujący względne zróżnicowanie rzeźby dna w analizowanym rejonie

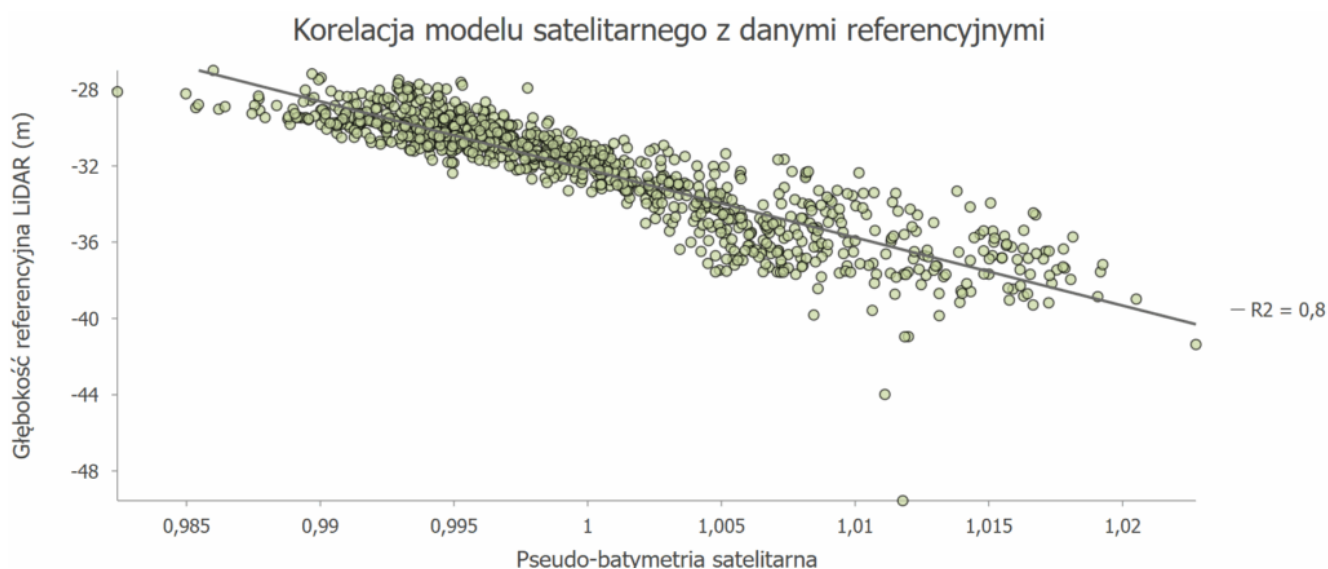
Kalibracja modelu i wyznaczenie rzeczywistych głębokości

Przed przystąpieniem do tego etapu, obszar analizy satelitarnej został przestrzennie ograniczony wyłącznie do zasięgu dostępnych danych referencyjnych. Wykorzystując ponownie narzędzie *Extract by Mask*, raster pseudo-batymetrii przycięto do granic modelu LiDAR pobranego z portalu NOAA.

Gwarantowało to, że dalsze obliczenia statystyczne będą prowadzone wyłącznie na wspólnym obszarze pokrycia dla obu zestawów danych.

Proces kalibracji modelu empirycznego i wyznaczenia rzeczywistych głębokości w środowisku ArcGIS zautomatyzowano poprzez wygenerowanie sieci 1000 losowych punktów referencyjnych w obszarze maski wodnej (*Create Random Points*). Następnie, korzystając z funkcji *Extract Multi Values to Points*, do tabeli atrybutów każdego z punktów przypisano wartość wyliczonej bezwymiarowego wskaźnika głębokości oraz odpowiadającą mu rzeczywistą głębokość z modelu LiDAR. Tak przygotowana, zintegrowana tabela atrybutów stanowiła bazę wyjściową do przeprowadzenia analizy regresji liniowej i wyznaczenia ostatecznego matematycznego wzoru przeliczeniowego.

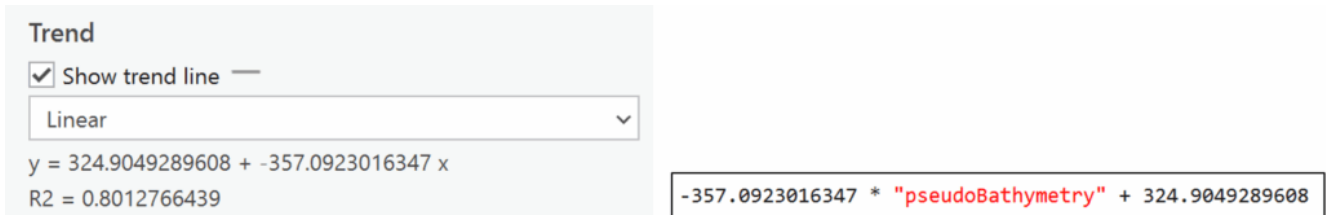
Aby zwizualizować korelację między dwiema zebranymi zmiennymi, we wbudowanym panelu *Create Chart* wygenerowano wykres rozrzutu (ang. *Scatter plot*) (Rys. 5). Narzędzie to automatycznie przeprowadziło analizę regresji liniowej, wyliczając parametry linii trendu. Uzyskany współczynnik determinacji R^2 na poziomie ok. 0,80 potwierdził wysoką skuteczność zastosowanego algorytmu, biorąc pod uwagę specyfikę teledetekcji obszarów przybrzeżnych.



Rys. 5 – Wykres rozrzutu obrazujący korelację modelu SDB z

danymi referencyjnymi

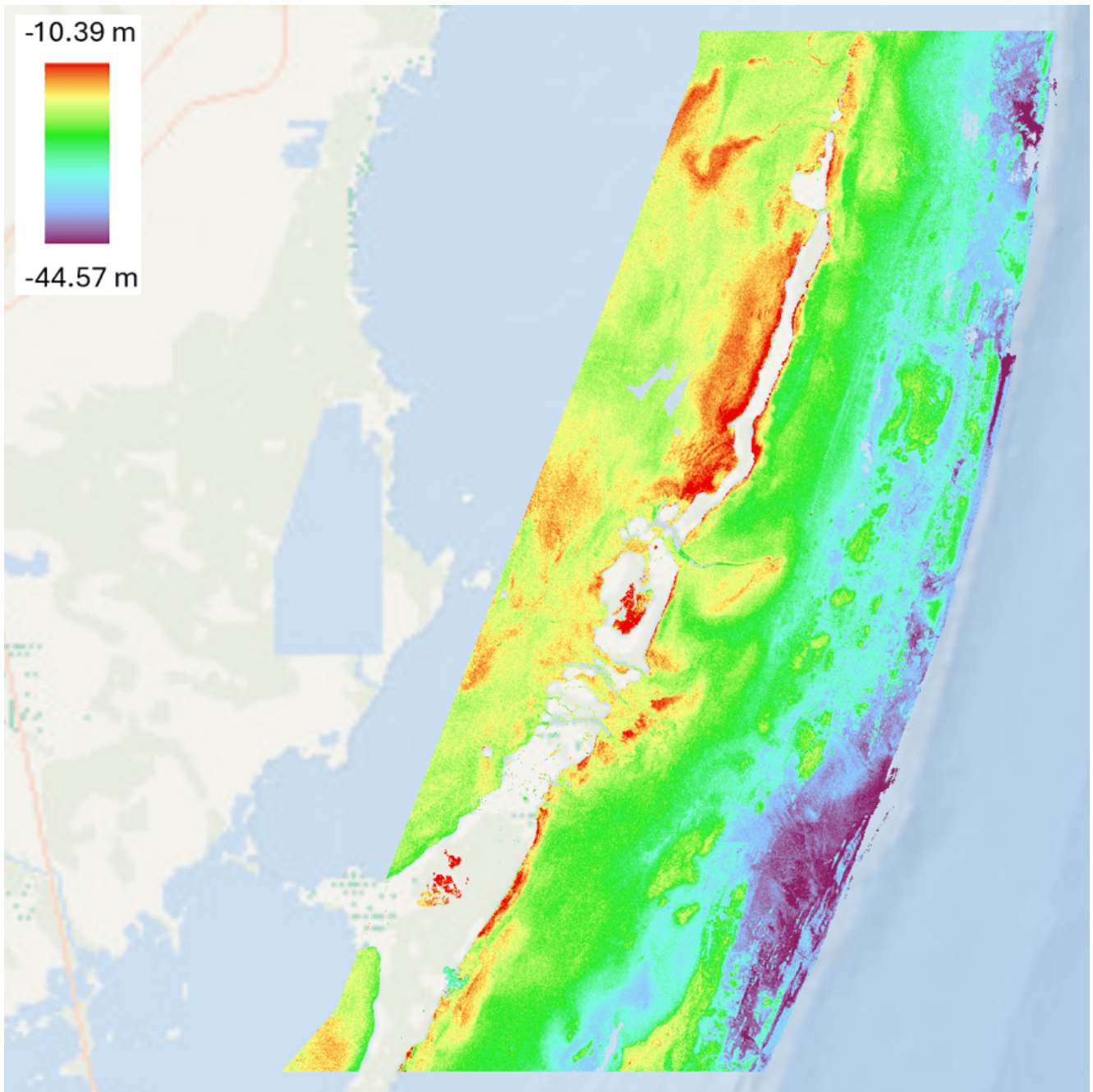
Wygenerowane przez program równanie regresji (Rys. 6) posłużyło jako gotowy wzór matematyczny, zaimplementowany w narzędziu *Raster Calculator*, co pozwoliło na przeliczenie bezwymiarowych wartości każdego piksela na rzeczywistą głębokość wyrażoną w metrach.



The image shows a software interface for a 'Trend' analysis. It includes a checkbox for 'Show trend line' which is checked. Below it is a dropdown menu set to 'Linear'. The regression equation is displayed as $y = 324.9049289608 + -357.0923016347 x$ with an $R^2 = 0.8012766439$. To the right, a separate box contains the implemented formula: $-357.0923016347 * \text{"pseudoBathymetry"} + 324.9049289608$.

Rys. 6 Równanie regresji i zaimplementowana formuła do obliczenia końcowych głębokości

Otrzymany wynik stanowił docelowy numeryczny model dna dla analizowanego akwenu (Rys. 7)



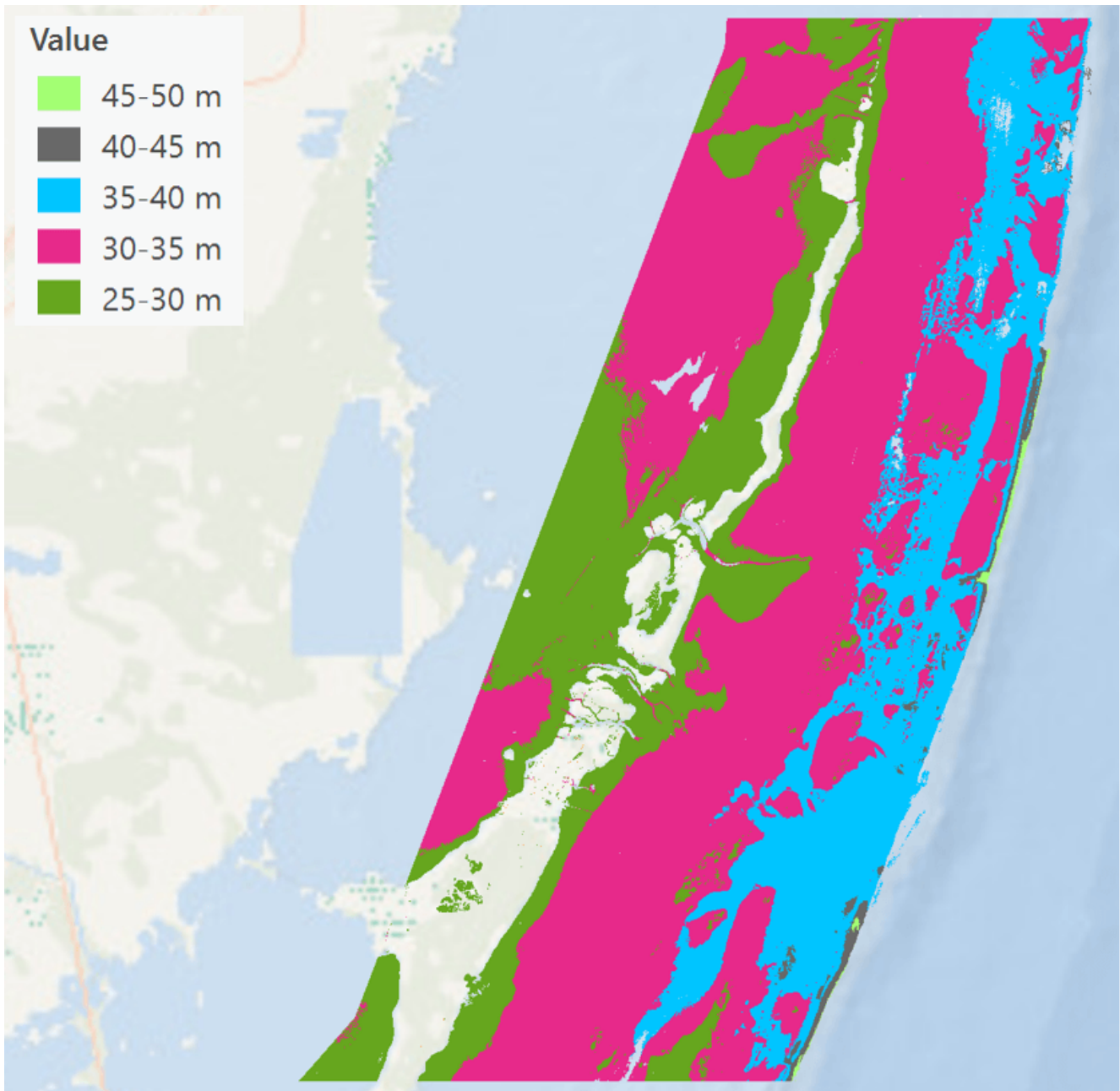
Rys. 7 – Finalny model batymetrii satelitarnej wybrzeża Florydy wygenerowany w oparciu o algorytm Stumpfa

Walidacja wyników i analiza błędów

Podstawą końcowej analizy było przeprowadzenie przestrzennej walidacji wyników SDB, zestawiając je z pobranymi danymi LiDAR. Za pomocą odpowiedniej formuły odjęto od siebie wartości obu rastrów, co pozwoliło na wygenerowanie modelu różnicowego. Zobrazowywał on przestrzenny rozkład błędów estymacji, wizualizując strefy niedoszacowania i

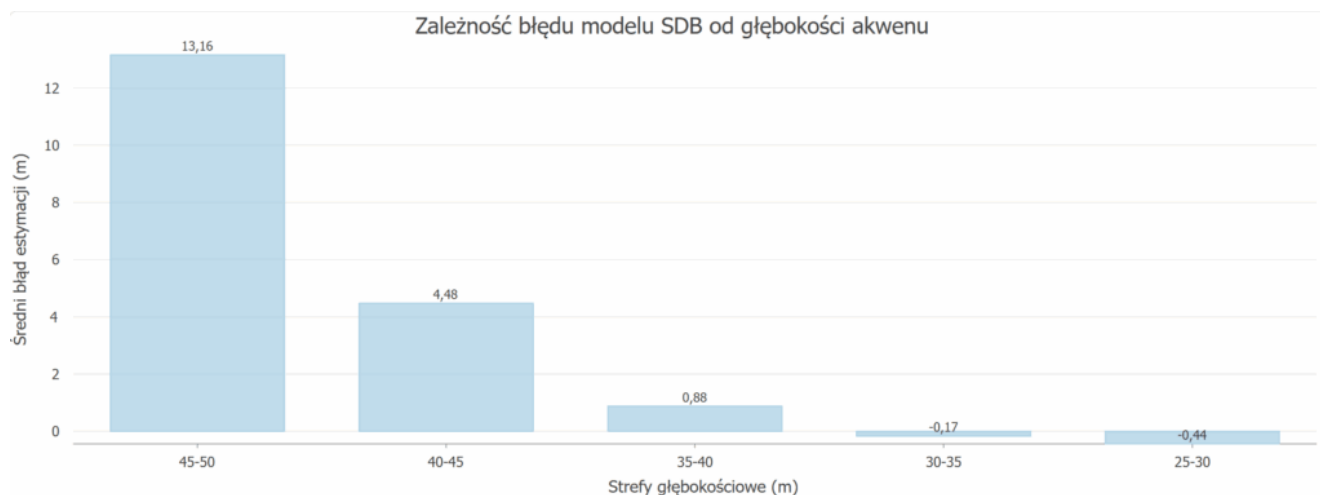
przeszacowania modelu. Analiza tego rozkładu potwierdziła, że błędy nie mają charakteru losowego, lecz są uwarunkowane fizyką środowiska. Największe przeszacowania zidentyfikowano w głębszych partiach akwenu, co stanowi bezpośredni dowód na spadek skuteczności algorytmu w wyniku zjawiska ekstynkcji światła.

Ponieważ skuteczność teledetekcyjnych metod obrazujących jest ściśle uzależniona od stopnia penetracji światła w toni wodnej, pogłębioną analizę błędów przeprowadzono w odniesieniu do konkretnych stref głębokościowych. Wykorzystując narzędzie *Reclassify*, model referencyjny podzielono na przedziały co 5 metrów (Rys. 8). Za pomocą analizy przestrzennej sprawdzono, w której strefie głębokościowej leży każdy z analizowanych punktów.



Rys. 8 – Podział modelu referencyjnego na 5-metrowe strefy głębokości

Tak przygotowane dane poddano agregacji przy użyciu narzędzia *Summary Statistics*. Pogrupowało ono punkty według przypisanych klas, a następnie wyliczyło dla każdej z nich średnią wartość błędu. Wyniki przedstawiono na poniższym wykresie (Rys. 9).



Rys. 9 – Zależność średniego błędu estymacji od głębokości akwenu. Wykres ukazuje wysoką dokładność modelu w wodach płytkich oraz drastyczny wzrost błędu w strefach najgłębszych

Podsumowanie

Przeprowadzona analiza na przykładzie wybrzeża Florydy potwierdza, że batymetria satelitarna może stanowić użyteczne uzupełnienie tradycyjnych metod hydrograficznych, zwłaszcza w trudnodostępnych strefach wód przybrzeżnych. Wykorzystanie środowiska GIS ułatwia organizację takich prac, pozwalając na przeprowadzenie wieloetapowego procesu analitycznego w obrębie jednego oprogramowania. Integracja darmowych zobrazowań Sentinel-2

z referencyjnymi pomiarami LiDAR w spójnym układzie współrzędnych umożliwia sprawną kalibrację oraz weryfikację korelacji radiometryczno-batymetrycznych. Należy wziąć jednak pod uwagę fizyczne ograniczenia teledetekcji optycznej wody. Przeprowadzona analiza wyraźnie ukazała ograniczenia wynikające z absorpcji fali elektromagnetycznej. Dokładność wyznaczania głębokości systematycznie spada w głębszych partiach akwenu. Mimo to, wykorzystanie dostępnych zestawów danych przestrzennych i podstawowych narzędzi analitycznych GIS pozwala na efektywne zarysowanie rzeźby płytkiego dna, co stanowi cenne źródło informacji we wstępnych fazach badań środowiskowych i planowania przestrzennego.