

ANALIZA ZMIAN POWIERZCHNI JEZIORA ARALSKIEGO W LATACH 1989-2023 NA PODSTAWIE SZEREGÓW CZASOWYCH WYBRANYCH WSKAŹNIKÓW SPEKTRALNYCH

ANALYSIS OF CHANGES IN THE AREA OF THE ARAL SEA IN THE YEARS 1989-2023 BASED ON TIME SERIES OF SELECTED SPECTRAL INDICES

Kinga Kaluża - Wydział Geoinżynierii, Górnictwa i Geologii, Politechnika Wrocławska

DOI:10.5604/01.3001.0055.5141

Streszczenie

Zmiany klimatyczne oraz działalność antropogeniczna negatywnie wpływają na wody powierzchniowe, często prowadząc do zmniejszania się powierzchni zbiorników wodnych. Jednym z najbardziej znanych przykładów tego zjawiska jest Jezioro Aralskie, które do lat 60-tych XX w. było czwartym co do wielkości jeziorem na świecie. Od tamtego czasu, w wyniku intensywnego wykorzystywania wód zasilających jezioro, jego powierzchnia zaczęła się systematycznie zmniejszać. Obecnie, do monitorowania zmian powierzchniowych jezior stosuje się technologię teledetekcji satelitarnej. Skutecznym narzędziem analizy są hydrologiczne wskaźniki spektralne, opracowane na podstawie wielospektralnych zobrażeń satelitarnych.

Celem niniejszego artykułu była długookresowa analiza zmian powierzchni południowej części Jeziora Aralskiego, określona na podstawie szeregów czasowych wybranych wskaźników spektralnych. W analizie wykorzystano trzy następujące hydrologiczne indeksy spektralne: Normalized Difference Water Index (NDWI), Modified Normalized Difference Water Index (MNDWI), Automated Water Extraction Index (AWEI). Pozyskane zobrażenia satelitarne misji Landsat umożliwiły również przeprowadzenie fotointerpretacji. Analiza uzyskanych wyników pozwoliła ocenić skalę i zakres zmian powierzchni jeziora, a także określić ich dynamikę. Ponadto, wskazano wskaźnik, który najdokładniej odzwierciedlił zmiany linii brzegowej zbiornika Aralskiego.

Słowa kluczowe: Jezioro Aralskie, wskaźniki spektralne, fotointerpretacja, analiza zmian powierzchni jeziora, szeregi czasowe, NDWI, MNDWI, AWEI

Abstract

Climate change and anthropogenic activity negatively affect surface waters, often leading to a reduction in the area of water bodies. One of the most well-known examples of this phenomenon is the Aral Sea, which until the 1960s was the fourth largest lake in the world. Since then, as a result of the intensive use of water feeding the lake, its surface area has been systematically decreasing. Currently, satellite remote sensing technology is used to monitor surface changes in lakes. An effective analytical tool is hydrological spectral indices, developed based on multispectral satellite imagery.

The aim of this article was to conduct a long-term analysis of changes in the surface area of the southern part of the Aral Sea, based on time series of selected spectral indices. The analysis utilized the following three hydrological spectral indices: Normalized Difference Water Index (NDWI), Modified Normalized Difference Water Index (MNDWI), and Automated Water Extraction Index (AWEI). Satellite imagery from the Landsat mission also enabled photointerpretation. The analysis of the obtained results allowed for the assessment of the scale and extent of changes in the lake's surface area, as well as the determination of their dynamics. Additionally, the study identified the index that most accurately reflected changes in the shoreline of the Aral Sea reservoir.

Keywords: Aral Sea, spectral indices, photointerpretation, analysis of lake surface changes, time series, NDWI, MNDWI, AWEI

Wprowadzenie

Jeziora pełnią istotną rolę nie tylko w cyklu hydrologicznym, lecz także stanowią kluczowy element ekosystemów i mają duże znaczenie dla działalności człowieka. W ostatnich latach obserwuje się niekorzystny wpływ zmian klimatycznych oraz działalności człowieka na wody powierzchniowe. Dzięki nowoczesnej technologii, jaką jest teledetekcja satelitarna, możliwa jest długookresowa analiza zmian linii brzegowej wód powierzchniowych. W tym celu stosowane są różnorodne metody detekcji obszarów wodnych, takie jak: segmentacja progowa, hydrologiczne wskaźniki spektralne czy iteracyjne algorytmy klasyfikacyjne [1].

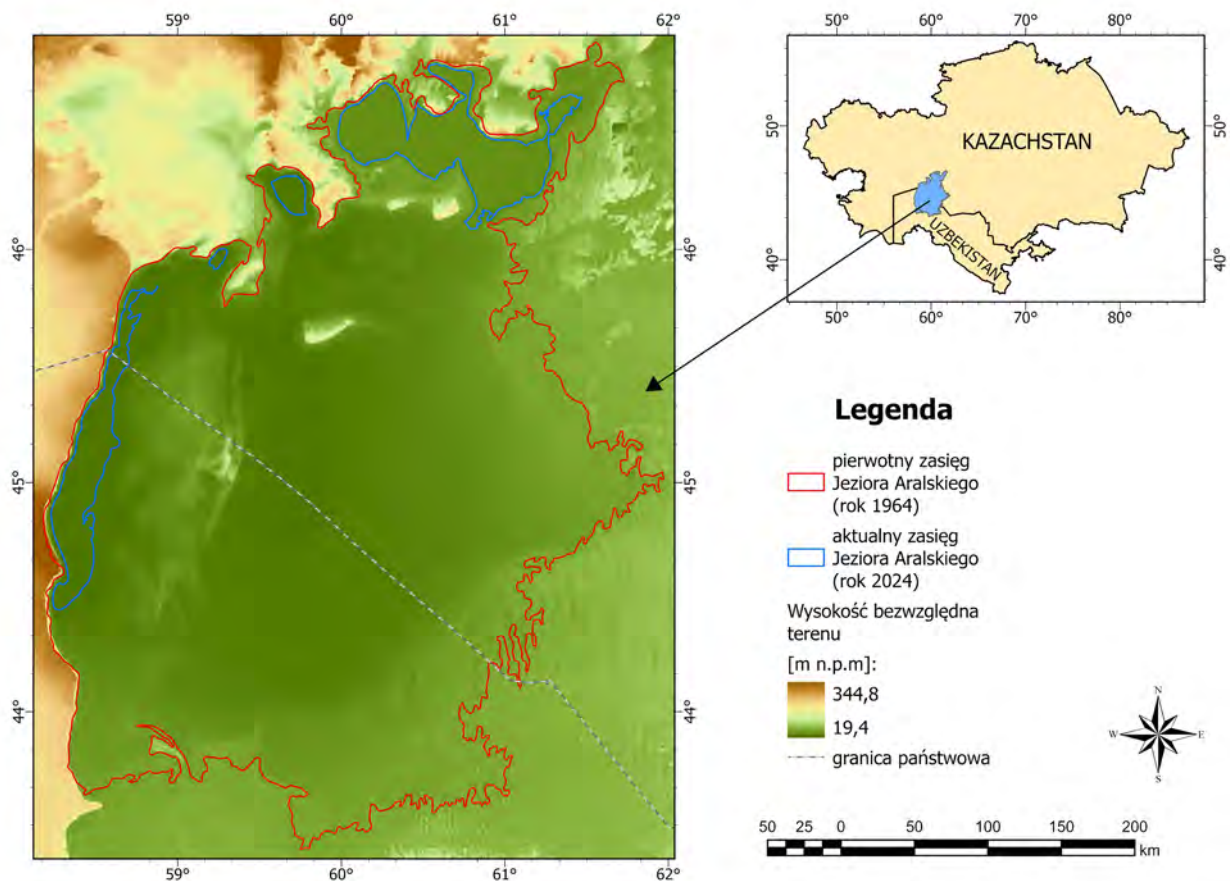
Według United States Geological Survey (USGS) teledetekcja to metoda zajmująca się wykrywaniem i monitorowaniem zjawisk zachodzących na powierzchni Ziemi poprzez pomiar odbitego lub emitowanego promieniowania. Specjalne sensory umieszczone na satelitach umożliwiają zdalne pozyskiwanie informacji o elementach środowiska znajdujących się na powierzchni planety [2]. Wyróżnia się dwa rodzaje teledetekcji: aktywną i pasywną. Różnicę pomiędzy nimi wyjaśnili Zhang i inni [3], którzy wskazali, że metody pasywne opierają się na rejestrowaniu promieniowania odbitego od powierzchni Ziemi, a metody aktywne emitują własne fale elektromagnetyczne i odbierają sygnał odbity od powierzchni. Jak podkreśla Hejmanowska i Wężyk [4], do obserwacji Ziemi wykorzystywane są najczęściej dane w postaci obrazów wielospektralnych, które reprezentują ten sam obszar w różnych zakresach widma elektromagnetycznego.

Dzięki odpowiedzi spektralnej zapisanej w obrazach możliwe jest opracowanie indeksów spektralnych, stanowiących jedną z technik detekcji i przestrzenno-czasowych analiz stanu form pokrycia terenu.

Redukcja zasięgu przestrzennego wód powierzchniowych jest obecnie głównym przedmiotem badań. Hydrologiczne wskaźniki spektralne są podstawą wielu badań dotyczących detekcji wód powierzchniowych. Jednym z przykładów ich zastosowania jest publikacja [5], której celem była ocena zmian powierzchni wody i temperatury Jeziora Aralskiego na przestrzeni 31 lat (1986–2017). Do realizacji badań wykorzystano m.in. indeks spektralny Normalized Difference Water Index (NDWI) wyznaczony w oparciu o zobrażenia satelitarne misji Landsat TM/ETM+/OLI. Uzyskane wyniki ukazują, że w analizowanym okresie jezioro utraciło ok. 78% swojego pierwotnego zasięgu, a jego temperatura wzrosła o ok. 11°C. Podobne badania zostały przedstawione w artykule [6]. Naukowcy, za pomocą tych samych danych i metod, prezentują wpływ opadów deszczu na zmianę powierzchni jeziora Urmia w Iranie. W artykułach [6], [7] i [8] zbiorniki wodne wyodrębniono, wykorzystując indeksy spektralne: NDWI, Modified Normalized Difference Water Index (MNDWI) oraz Water Ratio Index (WRI). Do ich opracowania również wykorzystano dane programu Landsat.

Obszar badań

Jezioro Aralskie położone jest w Azji Środkowej, na pograniczu południowego Kazachstanu i północnego



Rys. 1. Lokalizacja obszaru badań. Opracowanie własne na podstawie [12] oraz [13]
Fig. 1. Location of the study area. Own elaboration based on [12] and [13]

Uzbekistanu. Jest to jezioro endoreiczne, zasilane przez dwie rzeki: Amu- daryę oraz Syr- daryę, które czerpią wody z topniejących lodowców, występujących w pobliskich górach Tienszan i Pamir. Basen jeziora obejmujący obszar ok. 2,2 mln km² znajduje się na pustynnym obszarze Niziny Turańskiej, gdzie dominują pustynie: Kara-kum oraz Kyzyl-kum. Występujący tam klimat kontynentalny skrajnie suchy strefy umiarkowanej sprzyja występowaniu chłodnych zim oraz gorących okresów letnich. Średnie temperatury powietrza w styczniu wahają się od -12°C do 0°C, a maksymalne temperatury osiągane w lipcu mogą wynosić ok. 30°C [9].

Poziom wody w Jeziorze Aralskim w 1961 roku wynosił około 52,71 m, a jego powierzchnia przekraczała 65 000 km². Od tego czasu intensywny pobór wód z rzek dopływowych na cele rolnicze doprowadził do redukcji zasięgu przestrzennego i objętości jeziora. W wyniku tych zmian zbiornik wodny stopniowo podzielił się na cztery niezależne akweny [10]. Badania przeprowadzone przez agencję rządową National Aeronautics and Space Administration (NASA) [11] wskazują, że w 2023 roku powierzchnia jeziora zmniejszyła się do ok. 10% swojej pierwotnej wielkości. W odpowiedzi na zachodzące zmiany, władze lokalne i organizacje światowe podjęły różne działania i programy mające na celu zahamowanie tego procesu.

Rysunek 1 ukazuje lokalizację zbiornika wodnego wraz z jego zasięgiem przestrzennym przed rozpoczęciem wysychania oraz w 2023 roku.

Dane

W celu przeprowadzenia analizy zmian powierzchni Jeziora Aralskiego pozyskano 62 wielospektralne zobrażenia satelitarne programu Landsat zapisane

Tab. 1. Charakterystyka pozyskanych zobrażeń satelitarnych
Tab. 1. Characteristics of the acquired satellite imagery

Misja	Rok	Ilość zobrażeń	Zakres czasowy	Zakres zachmurzenia [%]	Typ produktu danych	Sensor
Landsat-5	1989	5	12 - 21.06.1989	0,00	Level-2	TM
	1991	5	20.06 - 04.07.1991	0,00 - 7,00		
	1993	6	03 - 28.08.1993	0,00 - 3,00		
	1995	4	02 - 25.08.1995	0,00 - 1,00		
	1997	4	02 - 27.06.1997	1,00 - 2,00		
	1999	3	20.08 - 05.09.1999	0,00 - 2,00		
	2001	3	28.05 - 06.06.2001	0,00 - 8,00		
	2007	4	01 - 26.08.2007	0,00 - 6,00		
	2009	4	03 - 12.06.2009	0,00 - 3,00		
Misja	Rok	Ilość zobrażeń	Zakres czasowy	Zakres zachmurzenia [%]	Typ produktu danych	Sensor
Landsat-8	2013	4	14 - 23.06.2013	0,00 - 1,16	Level-2	OLI
	2015	4	20 - 29.06.2015	0,00 - 1,64		
	2017	4	05 - 28.08.2017	0,00		
	2019	4	18 - 27.08.2019	0,00 - 1,66		
	2021	4	16 - 23.08.2021	0,00 - 0,12		
	2023	4	13 - 22.08.2023	0,00		

w formacie rastrowym (*.tif). Dane te są ogólnodostępne dla użytkowników na platformie internetowej Earth Explorer [14]. Aż 38 obrazów pochodzi z misji Landsat-5, a pozostałe z misji Landsat-8. Dane pozyskano dla okresu 1989-2023, pobierając obrazy z dwuletnim interwałem czasowym. Brak danych w latach 2003, 2005 oraz 2011 wynika z niedostępności zobrażeń lub ich wysokiego stopnia zachmurzenia. Dla każdego roku pozyskano inną ilość zobrażeń (od 3 do 6), tak aby zapewnić pokrycie całego obszaru badań. W celu przeprowadzenia analizy zebrano dane o jak najniższym zachmurzeniu. Ponadto, starano się zachować jak najkrótszy odstęp czasowy pomiędzy zobrażowaniami pochodzącymi z jednego roku. Czynniki meteorologiczne, takie jak np. opady atmosferyczne, mogłyby w tym przypadku wpłynąć na zasięg badanego zbiornika, powodując rozbieżność w wynikach. Charakterystykę pozyskanych zobrażeń satelitarnych przedstawia tabela 1.

Metodyka

Wszystkie etapy niniejszej analizy przeprowadzono w programie ArcGIS Pro (wersja 3.1.1) od producenta Esri. Produktami wejściowymi były wybrane zobrażenia misji Landsat, do których należały: multispektralne zobrażenia satelitarne, zobrażenia zarejestrowane w pasmach GREEN, NIR, SWIR1 (fale zarejestrowane w zakresie od 1550 do 1750 nm dla misji Landsat-5 i w zakresie od 1570 do 1650 nm dla misji Landsat-8) oraz SWIR2 (fale zarejestrowane w zakresie od 2080 do 2350 nm dla misji Landsat-5 i w zakresie od 2110 do 2290 nm dla misji Landsat-8).

Metodyka badań składała się z czterech podstawowych etapów. Pierwszy etap prac skupiał się na przygotowaniu mozaik w celu uzyskania jednego obrazu reprezentującego

Tab. 2. Korekcja wartości gamma

Tab. 2. Gamma value correction

Misja	Rok	Zobrazowanie	Domyślne wartości gamma			Nowe wartości gamma		
Landsat-5	1991	2	1,8	1,8	1,8	1,3	1,5	1,8
		5	1,6	1,6	1,6	1,6	1,9	1,6
	1993	5	1,7	1,7	1,7	1,5	1,9	1,5
	1997	1	1,5	1,5	1,5	1,5	1,8	1,5
	2007	3	1,6	1,6	1,6	1,5	1,5	1,5

obszar analizy. Uprzednio dokonano jednak korekcji wartości gamma wybranych zobrazowań, w celu podkreślenie kontrastu umiarkowanych wartości pikseli. Tabela 2 reprezentuje domyślne oraz zmienione wartości gamma.

Tak przygotowane obrazy multispektralne oraz obrazy zarejestrowane w pojedynczych pasmach połączono w jeden spójny obraz. Przygotowane mozaiki rastrowe przycięto do wspólnego obszaru, stanowiącego poligon badawczy o powierzchni 63 250 km².

Następnie, za pomocą wzoru (1), dokonano konwersji zakresu wartości refleksyjności, zarejestrowanej w poszczególnych zakresach fali elektromagnetycznej, do przedziału 0-1 [14]. Uzyskane wyniki wykorzystano przy wyznaczaniu jednego z trzech wskaźników spektralnych, jakim był AWEI.

$$p_{\lambda} = M_p * Q_{cal} + A_p \quad (1)$$

gdzie:

p_{λ} – wartość współczynnika odbicia przy powierzchni Ziemi (eng. Bottom-of-Atmosphere, BOA), wyrażona w zakresie wartości 0 – 1,

M_p – współczynnik skali = 0,0000275,

A_p – wartość przesunięcia = -0,2,

Q_{cal} – wartość współczynnika odbicia przy powierzchni Ziemi (eng. Bottom-of-Atmosphere, BOA), wyrażona w zakresie wartości 0 – 65535 [14].

Wyniki wstępnego przetwarzania pozwoliły na przeprowadzenie fotointerpretacji, która polega na ręcznym wskazaniu zakresu występowania form pokrycia terenu na podstawie subiektywnej oceny autora. W celu poprawnego określenia zasięgu zbiornika zastosowano kompozycję barwną w barwach sfalszowanych, podkreślającą wodę, uzyskaną dzięki połączeniu pasm NIR, SWIR1 i RED. Następnie określono zasięg jeziora i występujące na nim wyspy, których eliminacja pozwoliła na uzyskanie powierzchni zbiornika wodnego w poszczególnych latach.

Kluczowym etapem było wyznaczenie powierzchni zbiornika wodnego z wykorzystaniem hydrologicznych wskaźników spektralnych. Do tego celu zastosowano złączone i przycięte zobrazowania stanowiące ostateczny produkt wstępnego przetwarzania danych.

Pierwszym obliczonym wskaźnikiem był NDWI. McFeerers w publikacji [15] przedstawia ten parametr jako metodę, ułatwiającą ekstrakcję otwartych wód, poprzez eliminację pozostałych form pokrycia terenu. Indeks oparty jest na wskaźniku Normalized Difference Vegetation

Index (NDVI), który służy do ekstrakcji roślinności. Do wyznaczenia jego wartości autor zaproponował wykorzystanie kanału zielonego (GREEN) oraz bliskiej podczerwieni (NIR), a indeks został opisany wzorem (2):

$$NDWI = \frac{(GREEN - NIR)}{(GREEN + NIR)} \quad (2)$$

gdzie:

GREEN – zobrazowania zarejestrowane w zakresie zielonym (Landsat – 5: pasmo 2, Landsat – 8: pasmo 3),

NIR – zobrazowania zarejestrowane w zakresie bliskiej podczerwieni (Landsat – 5: pasmo 4, Landsat – 8: pasmo 5) [16], [17].

Drugi wyznaczony wskaźnik jakim był MNDWI stanowi modyfikację NDWI zaproponowaną przez Xu w artykule [18]. Autor dokonuje przekształcenia podstawowego wzoru poprzez zastąpienie pasma bliskiej podczerwieni (NIR) pasmem podczerwieni krótkofalowej (SWIR1). Nowy wskaźnik jest skuteczniejszy do ekstrakcji wód powierzchniowych, ponieważ skutecznie redukuje lub usuwa szum zabudowanego lądu, roślinności i gleby. Wskaźnik MNDWI opisany jest wzorem (3).

$$MNDWI = \frac{(GREEN - SWIR1)}{(GREEN + SWIR1)} \quad (3)$$

gdzie:

GREEN – zobrazowania zarejestrowane w zakresie zielonym (Landsat – 5: pasmo 2, Landsat – 8: pasmo 3),

SWIR1 – zobrazowania zarejestrowane w zakresie podczerwieni krótkofalowej (Landsat – 5: pasmo 5, Landsat – 8: pasmo 6) [16], [17].

Powyższe równanie matematyczne (2) i (3) stanowią znormalizowaną różnicę dwóch kanałów. Z tego też powodu wartości wskaźnika wynoszą od -1 do 1, a wielkości dodatnie wskazują na występowanie zbiornika wodnego [15].

Trzecim zastosowanym hydrologicznym wskaźnikiem spektralnym był AWEI_{nsh}, przedstawiony przez Feyisa i innych w publikacji [19]. Indeks ten opracowano w celu eliminacji pikseli o pokryciu terenu innym niż wody powierzchniowe. Stosowany jest on głównie, gdy na zobrazowaniach satelitarnych nie występują cienie np. cienie chmur. Indeks został obliczony na podstawie poniższego wzoru (4), gdzie wartości dodatnie wskazują na występowanie wodnych.

(4)

$$AWEI_{nsh} = 4 * (GREEN - SWIR1) - (0,25 * NIR + 2,75 * SWIR2)$$

gdzie:

GREEN – zobrażenia zarejestrowane w zakresie zielonym (Landsat – 5: pasmo 2, Landsat – 8: pasmo 3),

SWIR1 – zobrażenia zarejestrowane w zakresie podczerwieni krótkofalowej (Landsat – 5: pasmo 5, Landsat – 8: pasmo 6),

NIR – zobrażenia zarejestrowane w zakresie bliskiej podczerwieni (Landsat – 5: pasmo 4, Landsat – 8: pasmo 5),

SWIR2 – zobrażenia zarejestrowane w zakresie zielonym (Landsat – 5: pasmo 7, Landsat – 8: pasmo 7) [16], [17].

W celu eliminacji zbiorników wodnych występujących w pobliżu Jeziora Aralskiego oraz chmur, przycięto uzyskane pliki do najbliższego sąsiedztwa jeziora. Następnie wyznaczono wielkości progu oddzielającego obszary reprezentujące wodę od lądu, do czego wykorzystano histogramy opracowane na podstawie uzyskanych wartości wskaźników. Uzyskane wartości przedstawiono w tabeli 3.

Tab. 3. Wyznaczone wartości progów
Tab. 3. Threshold values determined

Wskaźnik spektralny	Wartość progu
<i>NDWI</i>	-0,017
<i>MNDWI</i>	0,011
<i>AWEI_{nsh}</i>	-0,125

Ostatni krok obejmował obliczenie powierzchni zbiornika wodnego. W tym celu określono ilość pikseli reprezentujących obszary wodne, a na ich podstawie wyznaczono powierzchnię jeziora, wykorzystując poniższy wzór (5):

$$P = L_p * W [m^2] \quad (5)$$

gdzie:

P – powierzchnia zbiornika wodnego,

L_p – liczba pikseli reprezentujących obszary wodne,

W – rozdzielczość przestrzenna zobrażenia, wynosząca 30 m x 30 m.

Wyniki

W niniejszym rozdziale przedstawiono zmiany powierzchni Jeziora Aralskiego w latach 1989–2023 na podstawie przeprowadzonych badań. Podczas analizy uzyskano cztery niezależne zestawienia ukazujące główny trend zmian wielkości jeziora, które przedstawiono w tabeli 4.

Analiza przedstawionych powyżej wartości jednoznacznie wskazuje, że w latach 1989–2023 powierzchnia Jeziora Aralskiego wykazywała trend spadkowy. Wartości uzyskane dla każdej metody są zbliżone i na ich podstawie można stwierdzić, że południowa część jeziora w ciągu 34 lat zmniejszyła się aż o 94%.

Porównanie szeregów czasowych umożliwiło wyodrębnienie okresów, w których doszło do największych i najmniejszych zmian powierzchniowych zbiornika. W analizowanym okresie wyróżnić można cztery etapy zmian powierzchni Jeziora Aralskiego. W latach 1989–1995 zaobserwowano nieregularne, lecz intensywne tempo spadku. Od roku 1995 do 2009 utrzymywał się stały trend spadkowy, wskazujący na długotrwałą redukcję powierzchni jeziora. Największy spadek odnotowano jednak w latach 2001–2007 oraz 2017–2019. Charakterystyczne wahania powierzchni obserwowane są dla okresu 2009–2019, gdzie wielkość jeziora naprzemiennie wzrastała i malała. W latach 2009–2013 oraz 2015–2017 zaobserwowano krótkotrwały wzrost powierzchni zbiornika, jednak nie wpłynął on na ogólny charakter zmian. Ostatnie lata analizy wykazują natomiast, że tempo spadku powierzchni zbiornika znacznie się zmniejszyło, a trend zmian stał się ponownie stabilny.

Wyniki uzyskane na podstawie hydrologicznych wskaźników spektralnych są do siebie zbliżone, a zaobserwowane różnice nie mają wpływu na główny przebieg trendu. Przeprowadzony proces fotointerpretacji pozwolił na uzyskanie wyników zbliżonych do wartości wskaźników spektralnych. Wyjątkiem były jedynie lata 2013 i 2017, kiedy to zaobserwowano wzrost zasięgu powierzchniowego zbiornika.

W artykule wskazano indeks spektralny, który najdokładniej odzwierciedlił zmiany linii brzegowej zbiornika wodnego. W tym celu dokonano analizy trendu zmian powierzchniowych zbiornika dla każdego ze wskaźników oraz określono liczbę pikseli odstających. Ocena rocznych wahań powierzchni jeziora wykazała, że największą stabilnością wykazał się wskaźnik MNDWI, co jest szczególnie widoczne w latach 1997–2009. Ponadto liczba pikseli odstających potwierdziła to założenie, ponieważ dla wybranego wskaźnika w całym okresie analizy wyniosła ona 176708. Na drugim miejscu znajdował się wskaźnik NDWI (252048), a największymi błędami obciążony był indeks *AWEI_{nsh}* (528716).

Rezultaty uzyskane w ramach fotointerpretacji porównano z najdokładniejszym wskaźnikiem spektralnym. Ogólna zmiana powierzchni pomiędzy obiema metodami wynosi zaledwie 20,60 km² i jest ona najniższą spośród zestawień wskaźników spektralnych i fotointerpretacji. Wielkość procentowa jest natomiast najwyższa i wynosi 0,05%. Analizując powierzchnie w poszczególnych latach, można zaobserwować znaczne rozbieżności, które wahają się od -884,41 km² w 2001 roku do 17,80 km² w 2009 roku. Warto zauważyć, że wraz ze zmniejszaniem się powierzchni zbiornika wodnego, różnica pomiędzy poszczególnymi wynikami także zazwyczaj malała, co wskazuje, że dokładność poszczególnych metod zależy od wielkości obszaru opracowania.

Uzupełnieniem powyższego opisu jest kompozycja mapowa opracowana na podstawie najdokładniejszego wskaźnika spektralnego. Rysunek 2 reprezentuje zasięg linii brzegowej Jeziora Aralskiego w pierwszym i ostatnim roku analizy, a także w roku 2007. Wizualna reprezentacja wskazuje, że proces wysychania dotyczył głównie wschodniego i północnego obszaru zbiornika wodnego. W wyniku postępujących zmian, z jeziora o znacznym obszarze i nieregularnym kształcie, pozostał jedynie podłużny i wąski fragment akwenu wraz z dwoma oddzielnymi zbiornikami.

Tab. 4. Powierzchnia Jeziora Aralskiego w latach 1989-2023

Tab. 4. Surface area of the Aral Sea in the years 1989–2023

Rok	Metoda			
	NDWI	MNDWI	AWEI _{nsh}	Fotointerpretacja
	Powierzchnia [km ²]			
1989	38101,41	38339,59	38273,73	38297,91
1991	34794,52	34632,83	34879,12	35107,94
1993	32941,91	33226,6	33099,04	33172,04
1995	31648,93	32147,83	32076,46	32212,08
1997	28518,18	28962,66	28767,16	28744,38
1999	25643,01	25130,4	26049,61	25929,22
2001	21724,14	21471,93	22495,84	22356,33
2007	10066,05	9962,26	10061,41	9996,79
2009	6888,95	6839,86	6875,76	6822,06
2013	7202,37	7477,59	7426,65	7352,33
2015	6145,54	6026,98	6324,4	6311,94
2017	8381,3	9084,21	9053,05	9295,5
2019	2955,82	3040,52	2999,14	2978,45
2021	2585,53	2576,53	2604,02	2599,11
2023	2258,43	2298,28	2285,36	2276,66
Zmiana powierzchni	-35843	-36041,3	-35988,4	-36021,25
Zmiana powierzchni [%]	-94,07%	-94,01%	-94,03%	-94,06%

Wizualna interpretacja uzyskanych wyników oraz różnice wielkości powierzchni przedawnione w tabeli 4 pozwalają ocenić charakterystykę poszczególnych metod detekcji wód. Zróżnicowania wyników spowodowane są głównie odmiennym sposobem klasyfikacji płytkich obszarów przez poszczególne metody. Wskaźniki MNDWI i NDWI często błędnie zaliczały je do klasy ląd. Ponadto, indeksy te nie oddzielały jednoznacznie pikseli mieszanych, które reprezentowały linię brzegową jeziora. Wskaźnik AWEI_{nsh} lepiej identyfikował płytkie wody i poprawnie je klasyfikował. Dodatkowo, jednoznacznie oddzielał on obszar zetknięcia się wód z lądem, wykazując tym samym największą zgodność z wynikami fotointerpretacji.

Dyskusja

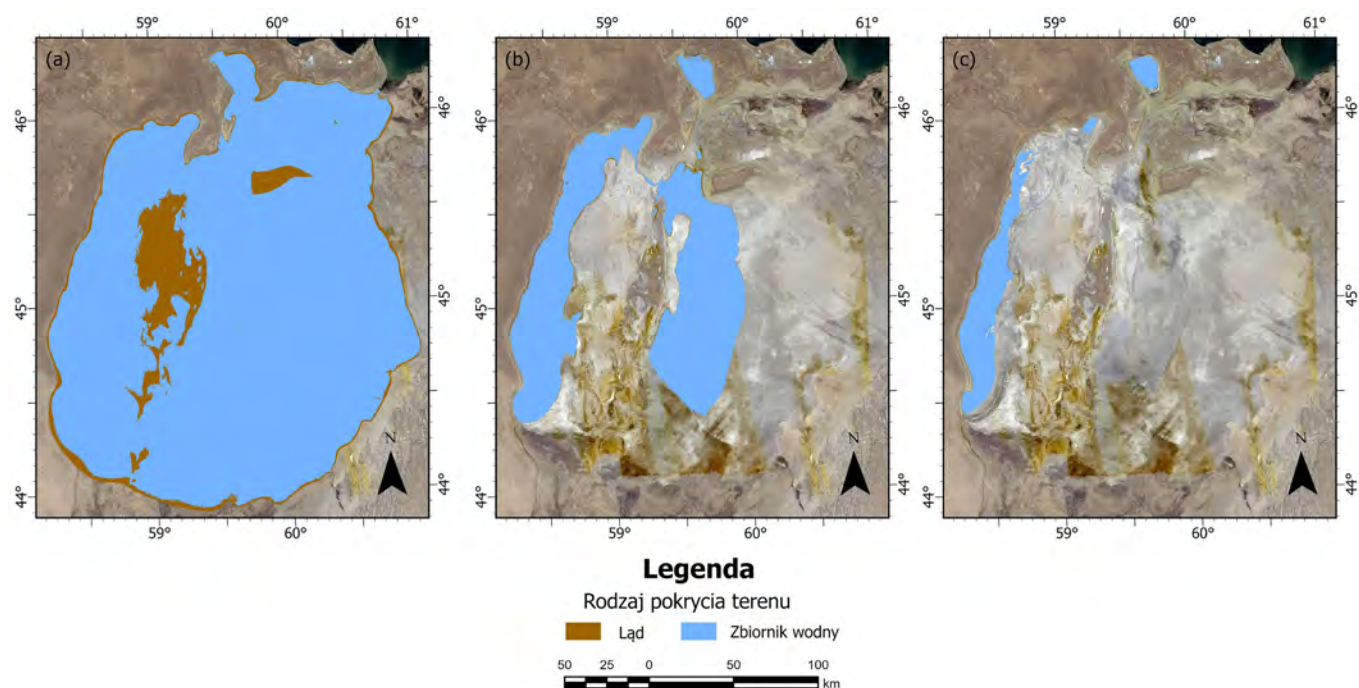
W celu weryfikacji uzyskanych wyników porównano je z opublikowanymi dotychczas badaniami dotyczącymi Jeziora Aralskiego. Ze względu na brak pełnej zgodności analizowanych okresów, do porównań wykorzystane dane zbliżone względem dat lub wybrane przedziały czasowe. Dodatkowo, w analizie uwzględniono wyłącznie południową część jeziora, podczas gdy większość badań wykorzystywało zwykle całą powierzchnię.

Pierwszą pozycją literaturową, w oparciu o którą dokonano oceny dokładności przeprowadzonych analiz, były badania ukazane w [5]. Na podstawie wyników uzyskanych przez autorów określono, że w latach 1989–2017 zbiornik wodny zmniejszył się o 75,71%. Wyniki najdokładniejszego wskaźnika spektralnego ukazują, że na przestrzeni 28

lat jezioro zmniejszyło się o 76,31%. Różnica pomiędzy wartościami wynosi jedynie 0,6%, a zatem można potwierdzić, iż uzyskane w pracy wartości liczbowe są podobne do tych przedstawionych w artykule.

Bai i inni w publikacji [1] ukazują, że Jezioro Aralskie w latach 1990-1999 zmniejszyło swój zasięg przestrzenny o 28,18%, a w latach 2000-2007 było to 49,57%. Według przeprowadzonych analiz na podstawie wskaźnika MNDWI określono, że powierzchnia zbiornika wodnego w pierwszym okresie zmalała 27,44%, a w drugim było to 60,36%. Porównanie to ukazuje, że wielkości zmiany zbiornika wodnego w poszczególnych latach różnią się od siebie. W latach 1990-1999 uzyskana rozbieżność jest niewielka i wynosi zaledwie 0,74%. W latach 2000-2007 zaobserwowano jednak znaczącą różnicę, równą 10,79%, która może być spowodowana czynnikami meteorologicznymi w dniu rejestracji zobrażenia lub na kilka dni przed tym zdarzeniem, takimi jak np. opady atmosferyczne, które znacznie wpływają na zasięg linii brzegowej zbiornika.

Trzecią ocenę dokładności przeprowadzono w oparciu o badania Kayiranga i innych [20]. Autorzy wykazali, że w latach 1986-2022 Jezioro Aralskie zmniejszyło się o ok. 89,03%. Przeprowadzona w niniejszej pracy analiza uwzględnia podobny czas, w którym określono zmiany powierzchni zbiornika wodnego. Uzyskane wyniki ukazują, że w latach 1989-2023 południowa część Jeziora Aralskiego otrzymana na podstawie wskaźnika MNDWI zmniejszyła się o 94,01%. Różnica pomiędzy wartościami wynosi 4,97% i może wynikać z braku pełnej zgodności pomiędzy analizowanymi okresami.



Rys. 2. Zasięg Jeziora Aralskiego uzyskany na podstawie wskaźnika MNDWI w: (a) 1989 r., (b) 2007 r. oraz (c) 2023 r., podkład mapowy – kompozycja RGB obrazowań z 2023 roku)

Fig. 2. Extent of the Aral Sea based on the MNDWI index in: (a) 1989, (b) 2007, and (c) 2023 (map background – RGB composite of 2023 imagery)

Podsumowanie

Analiza zmian powierzchni Jeziora Aralskiego na podstawie wybranych wskaźników spektralnych jakimi były NDWI, MNDWI oraz AWEI ukazuje, że w latach 1989-2023 zbiornik ten zmniejszył się o ok. 94%. Trend postępujących zmian był głównie spadkowy, choć niejednostajny. W latach 2009-2013 oraz 2015-2017 zaobserwowano wzrost powierzchni jeziora. Największy spadek zaobserwowano w latach 2017-2019, jednak po 2021 roku tempo procesu zmniejszyło się, co może mieć związek z podjętymi

działaniami rewitalizacyjnymi na tym obszarze.

Spośród zastosowanych wskaźników, największą dokładnością charakteryzował się MNDWI. Indeks ten najdokładniej odwzorował granice zbiornika, choć posiadał tendencję do klasyfikowania płytkich obszarów wodnych jako lądu.

Ocena dokładności wykazała natomiast, iż dla większości zbadanych okresów, wyniki uzyskane w ramach niniejszej analizy były zgodne z wartościami występującymi w opublikowanych dotychczas badaniach.

Literatura

- [1] J. Bai, X. Chen, J. Li, L. Yang, i H. Fang, „Changes in the area of inland lakes in arid regions of central Asia during the past 30 years”, *Environ Monit Assess*, t. 178, nr 1–4, s. 247–256, lip. 2011, doi: 10.1007/s10661-010-1686-y.
- [2] „What is remote sensing and what is it used for? | U.S. Geological Survey”. Dostęp: 16 czerwiec 2025. [Online]. Dostępne na: <https://www.usgs.gov/faqs/what-remote-sensing-and-what-it-used>
- [3] W. Zhang, B. Hu, i G. S. Brown, „Automatic Surface Water Mapping Using Polarimetric SAR Data for Long-Term Change Detection”, *Water*, t. 12, nr 3, Art. nr 3, mar. 2020, doi: 10.3390/w12030872.
- [4] B. Hejmanowska i P. Wężyk, Red., *Dane satelitarne dla administracji publicznej*, Wydanie I. Gdańsk: Polska Agencja Kosmiczna, 2020.
- [5] S. I. Deliry, Z. Y. Avdan, N. T. Do, i U. Avdan, „Assessment of human-induced environmental disaster in the Aral Sea using Landsat satellite images”, *Environ Earth Sci*, t. 79, nr 20, s. 471, paź. 2020, doi: 10.1007/s12665-020-09220-y.
- [6] M. Sathianarayanan, „Assessment of surface water dynamics using multiple water indices around Adama Woreda, Ethiopia”, *ISPRS Ann. Photogramm. Remote Sens. Spatial Inf. Sci.*, t. IV–5, s. 181–188, lis. 2018, doi: 10.5194/isprs-annals-IV-5-181-2018.
- [7] V. Deoli, D. Kumar, i A. Kuriqi, „Detection of Water Spread Area Changes in Eutrophic Lake Using Landsat Data”, *Sensors*, t. 22, nr 18, s. 6827, wrz. 2022, doi: 10.3390/s22186827.
- [8] N. Roy Mukherjee i C. Samuel, „Assessment of the Temporal Variations of Surface Water Bodies in and around Chennai using Landsat Imagery”, *Indian Journal of Science and Technology*, t. 9, nr 18, maj 2016, doi: 10.17485/ijst/2016/v9i18/92089.
- [9] P. Micklin, N. V. Aladin, i I. Plotnikov, Red., *The Aral Sea: The Devastation and Partial Rehabilitation of a Great Lake*. Berlin, Heidelberg: Springer, 2014. doi: 10.1007/978-3-642-02356-9.
- [10] H. Shen, J. Abuduwaili, L. Ma, i A. Samat, „Remote sensing-based land surface change identification and prediction in the Aral Sea bed, Central Asia”, *Int. J. Environ. Sci. Technol.*, t. 16, nr 4, s. 2031–2046, kwi. 2019, doi: 10.1007/s13762-018-1801-0.
- [11] „Dunes and Desert Replace the Aral Sea”. Dostęp: 16 czerwiec 2025. [Online]. Dostępne na: <https://earthobservatory.nasa.gov/images/152887/dunes-and-desert-replace-the-aral-sea>
- [12] „Marine Regions · Aral Sea (SeaVoX SeaArea - sub-region)”. Dostęp: 29 listopad 2024. [Online]. Dostępne na: <https://www.marineregions.org/gazetteer.php?p=details&id=24176>
- [13] „OpenTopography - Find Topography Data”. Dostęp: 5 grudzień 2024. [Online]. Dostępne na: <https://portal.opentopography.org/datasets>
- [14] „Landsat Collection 2 Surface Reflectance | U.S. Geological Survey”. Dostęp: 17 czerwiec 2025. [Online]. Dostępne na: <https://www.usgs.gov/landsat-missions/landsat-collection-2-surface-reflectance>
- [15] S. K. McFeeters, „The use of the Normalized Difference Water Index (NDWI) in the delineation of open water features”, *International Journal of Remote Sensing*, t. 17, nr 7, s. 1425–1432, maj 1996, doi: 10.1080/01431169608948714.
- [16] „Landsat 5 | U.S. Geological Survey”. Dostęp: 27 grudzień 2024. [Online]. Dostępne na: <https://www.usgs.gov/landsat-missions/landsat-5>
- [17] „Landsat 8 | U.S. Geological Survey”. Dostęp: 27 grudzień 2024. [Online]. Dostępne na: <https://www.usgs.gov/landsat-missions/landsat-8>
- [18] H. Xu, „Modification of Normalized Difference Water Index (NDWI) to Enhance Open Water Features in Remotely Sensed Imagery”, *International Journal of Remote Sensing*, t. 27, s. 3025–3033, lip. 2006, doi: 10.1080/01431160600589179.
- [19] G. L. Feyisa, H. Meilby, R. Fensholt, i S. R. Proud, „Automated Water Extraction Index: A new technique for surface water mapping using Landsat imagery”, *Remote Sensing of Environment*, t. 140, s. 23–35, 2014, doi: 10.1016/j.rse.2013.08.029.
- [20] A. Kayiranga i in., „Anthropogenic activities and the influence of desertification processes on the water cycle and water use in the Aral Sea basin”, *Journal of Hydrology: Regional Studies*, t. 51, s. 101598, luty 2024, doi: 10.1016/j.ejrh.2023.101598.