

Artur MŁODZIK¹, Kamil MIRONIK², Roman CIEŚLIŃSKI³

Uniwersytet Gdański

e-mail¹: arturro19@onet.pl

e-mail²: mirkamil@vp.pl

e-mail³: georc@univ.gda.pl

OCENA TEMPA I KIERUNKÓW ZARASTANIA JEZIOR PRZY WYKORZYSTANIU ZNORMALIZOWANEGO RÓŻNICOWEGO WSKAŹNIKA WEGETACJI NDVI NA PRZYKŁADZIE JEZIORA GARDNO

The assessment of rate and directions overgrowing lakes using a normalized differential NDVI vegetation index an example of Gardno Lake

Zarys treści: Rozwój roślinności wodnej w strefie litoralnej, znacząco zmienia charakter bezpośredniego otoczenia masy jeziornej. Jednakże, na proces zanikania wpływ ma nie tylko bujna sukcesja roślinności wodnej ale także dostawa materiału dennego, wprowadzanego przez cieki zasilające. Celem pracy jest oszacowanie tempa i wielkości zarastania zbiorników przybrzeżnych na przykładzie jeziora Gardno, w oparciu o znormalizowany indeks wegetacji NDVI. W ocenie zachodzących zmian, postępujących w poszczególnych sezonach letnich w obrębie niecki jeziornej, posłużono się dokładną analizą na podstawie zdjęć satelitarnych wykonywanych dla lat 2000-2014. Główną intencją autorów, było opracowanie odpowiedniej metody pozwalającej określić zasięg ekspansji roślinności wodnej w jeziorze. Wstępne wyniki, zestawiono z wartościami średnich miesięcznych temperatur powietrza oraz średnich miesięcznych sum opadów atmosferycznych pochodzących z bazy danych EarthExplorer na stacji zlokalizowanej w Łebie. Następnie, wykonano szczegółową analizę mającą na celu wykazanie zależności między efektywnym zarastaniem a oddziaływaniem lokalnych warunków meteorologicznych, takich jak temperatura powietrza czy warunki pluwalne. Zaobserwowane zmiany stale powiększającej się strefy litoralnej, pozwalają przypuszczać o postępującym procesie zanikania jeziora Gardno. Oszacowano, iż w ciągu roku roślinność porastająca brzegi jeziora Gardno, ulega zwiększeniu o około 0,5 ha, jednakże przyrost charakteryzuje się, raz większym raz mniejszym stopniem podczas każdego sezonu wegetacyjnego.

Abstract: The development of aquatic vegetation in the littoral zone significantly change the nature of the immediate surroundings of the lake basin. However, the process of disappearance is affected not only by the lush succession of water vegetation, but also by the supply of bottom material, introduced by watercourses. The aim of the study is estimate the rate of overgrowth coastal reservoirs on example of Gardno lake, based on the normalized differential NDVI vegetation index. The assessment of the changes, taking place in the individual summer seasons within the lake basin, a thorough analysis based on satellite imagery performed for 2000-2014. The main aim, was to develop an appropriate method to determine the extent of expansion of water vegetation on the example of a selected lake. Preliminary results, compiled with monthly average air temperatures and monthly mean precipitation totals, performed relationships between effective overgrowth and local meteorological conditions. The observed changes, in the ever-growing littoral zone allow, us to suppose that the Gardno lake was going to disappear.

Słowa kluczowe: zarastanie, indeks NDVI, wegetacja, bufor, ekspansja

Key words: overgrowth, NDVI index, vegetation, buffer, expansion

Wpłynęło: 18.07.2017

Zaakceptowano: 11.12.2019

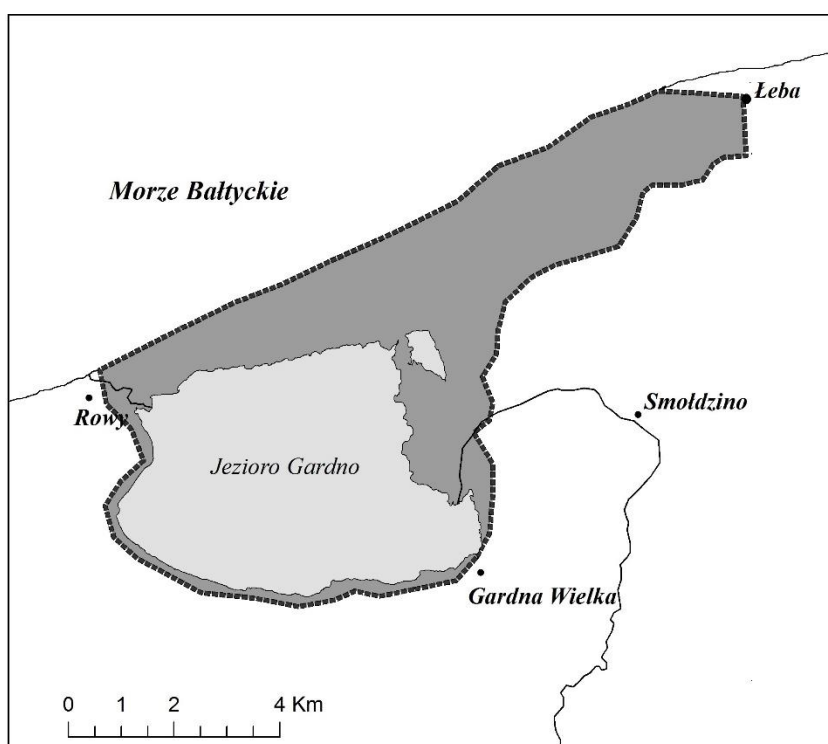
Zalecany sposób cytowania/ Cite as: Młodzik A., Mironik K., Cieśliński R., 2019, Ocena tempa i kierunków zarastania jezior przy wykorzystaniu znormalizowanego różnicowego wskaźnika wegetacji NDVI na przykładzie jeziora Gardno, *Prace i Studia Geograficzne*, 64.3, Wydział Geografii i Studiów Regionalnych Uniwersytetu Warszawskiego, Warszawa, 145-160.

WSTĘP

Problematyka, związana ze stopniowym zanikiem powierzchni ekosystemów jeziornych, podlega ciągłym zmianom ze względu na wzrost tempa transgresji roślinności litoralnej. Z uwagi na trudności w empirycznym monitoringu zachodzących zmian, autorzy skupili się na zbadaniu opisywanego zjawiska zastępując tradycyjne podejście technikami geoinformatycznymi. Wobec powyższych założeń, celem głównym pracy jest przedstawienie tempa i wielkości zarastania jeziora przyziemnego, w oparciu o nowatorskie techniki pomiarowe w postaci zdjęć satelitarnych.

Jezioro Gardno, usytuowane jest w północnej części kraju, na obszarze Niziny Gardnieńsko-Łebskiej (ryc. 1). Główną rzeką zasilającą nieckę jeziora jest jedna z największych rzek przymorskich – Łupawa, która doprowadza do jeziora około 92% wód potamicznych. Specyfika jego położenia w obrębie strefy brzegowej południowego Bałtyku, wpływa na indywidualny charakter na tle pozostałych zbiorników, zlokalizowanych nieco bardziej w głębi lądu. Determinowane jest to poprzez wzajemne oddziaływanie dwóch środowisk, wodnego (morskiego) i lądowego.

Według podziału Polski na regiony fizyczno-geograficzne Kondrackiego (2000), misa jeziora Gardno leży w zasięgu dwóch mezoreginów: w większości w granicach Wybrzeża Słowińskiego (313.41) oraz niewielka część południowo-wschodnia w obrębie Wysoczyzny Damnickiej (313.44) (Kondracki 2000).



Ryc. 1. Lokalizacja obszaru badań na tle zachodniej części Niziny Gardnieńsko-Łebskiej

Fig. 1. Location of the research area on the western part of the Gardno-Łebska Lowland

Źródło: opracowanie własne.
Source: author's own elaboration.

Jednym z elementów, wpływających na zanik powierzchni jezior w Polsce jest proces zarastania. Ważną kwestią przyspieszającą taki stan rzeczy, są między innymi lokalne uwarunkowania.

Przykładem takich działań, jest ingerencja człowieka poprzez stosowanie zabiegów melioracyjnych na danym terenie. Jezioro Gardno znajduje się na obszarze, gdzie były przeprowadzane melioracje w postaci gęstej sieci rowów i kanałów. Zanikanie jezior uzależnione jest także warunkami zlewni. Wpływ na to mają: niewielkie zasoby wodne, czego skutkiem jest podatność na zanieczyszczenia, zbyt niska wymiana wód oraz duża dostawa osadów dennych, powodująca użyznienie wód w substancję biogeniczną (Choiński i Ptak 2008).

Odsłonięte zatoki oraz brzegi po nawietrznej stronie zbiornika wodnego są strefami, gdzie najlepiej rozwija się roślinność wodna. Łatwo jest rozpoznać, charakterystyczne skupienia roślinności porastającej brzegi jezior, ponieważ najczęściej przybierają one formę półkolistych struktur. Podatność jezior na zanikanie, wiąże się przede wszystkim z postępującym procesem eutrofizacji, ale także ze zmianą właściwości fizyczno – chemicznych wód. Degradacja zbiorników wodnych, spowodowana jest głównie wysoce zaawansowanym poziomem rolnictwa w zlewniach bezpośrednich, czego skutkiem jest nadmierne nawożenie pól uprawnych (Choiński i Ptak 2008).

Jezioro Gardno cechuje się jedną z większych powierzchni na tle pozostałej grupy jezior przybrzeżnych Polski, której wielkość wynosi 2 337,5 ha. Głębokość maksymalna wynosząca 2,6 m wskazuje, iż jest to bardzo płytki zbiornik. Powierzchnia zlewni całkowitej wynosi 964,4 km², a średni dopływ roczny 8,40 m³·s⁻¹. Ilość zmagazynowanej wody w niecce jeziornej szacuje się na około 30 950 tys. m³, zaś wskaźnik wymiany wody osiąga wartość 8,6 na rok (Jańczak 1997; Ciesliński 2011).

DANE I METODY

Główne prace, oparte zostały na kwerendzie materiałów źródłowych potrzebnych do opracowania tempa i kierunków zarastania jeziora. W tym celu, posłużono się przede wszystkim zdjęciami satelitarnymi z lat 2000 – 2014, które pozyskano z programu satelity Landsat 7. Całościowa chronologia wykorzystanego materiału zawarta jest w tabeli 1. Biorąc pod uwagę metadane, skoncentrowano się na kanałach czerwonym (RED) i bliskiej podczerwieni (NIR). Dodatkowym źródłem danych była rastrowa mapa topograficzna, z której skupiono się na wizualnych aspektach map. Rozstęp między datami pozyskanych obrazów wynika, z możliwie najmniejszego w porównaniu do reszty zdjęć z danego rocznika, wskaźnika *cloud cover*.

Tabela 1. Zestawienie użytych zdjęć satelitarnych z dokładną datą ich wykonania

Table 1. List of used satellite images with the date of their implementation

ROK/ YEAR	2000	2001	2002	2003	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014
DATA/ DATE	15.07	19.08	22.08	28.05	08.06	13.07	14.06	19.07	03.06	9.08	11.07	12.06	01.08	17.06	22.07

Źródło: opracowanie własne.

Source: author's own elaboration.

W pracy wykorzystano również znormalizowany różnicowy wskaźnik wegetacji NDVI (ang. *Normalized Differential Vegetation Index*). Wskaźnik po raz pierwszy użył J. W. Rouse'a w badaniach przeprowadzanych w 1973 roku w Stanach Zjednoczonych. Jest on wykorzystywany do badania i wykrywania obszarów wegetacji roślin, jak również jej stanu kondycyjnego (<https://fotoparty.pl/oferta/teledetekcja/ndvi/>).

NDVI obliczać należy ze wzoru:

$$\frac{NIR-RED}{NIR+RED} = NDVI \text{ (Rouse 1978)}$$

gdzie:

NIR - Wartość pikseli kanału bliskiej podczerwieni

RED - Wartość pikseli kanału czerwonego

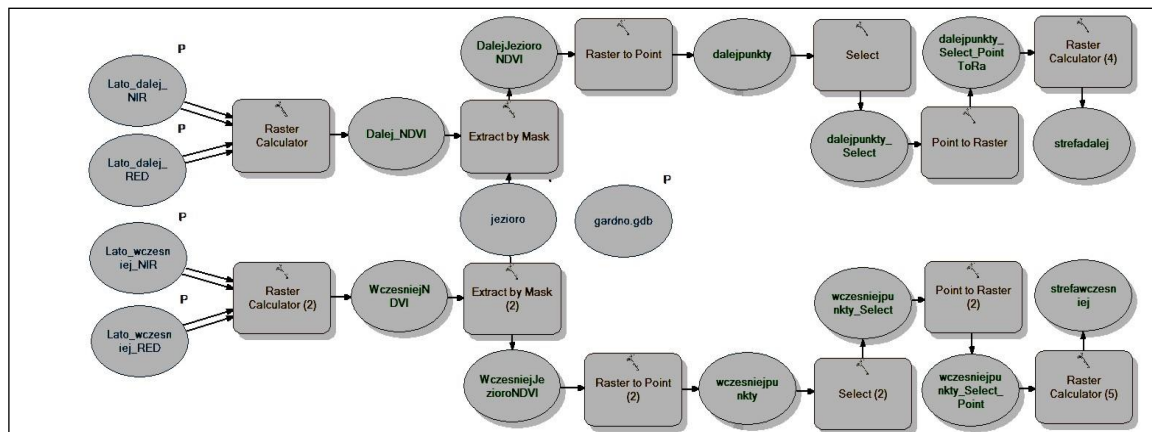
NDVI - Znormalizowany różnicowy wskaźnik wegetacji

Warto nadmienić, iż w niniejszym opracowaniu pominięto kwestię kalibracji urządzeń, poprzez wykorzystanie jedynie danych pochodzących z jednego satelity o jednakowych parametrach (Landsat 7), jednak przy dostępie do danych pochodzących z różnych satelitów, kalibracja jest jak najbardziej możliwa.

Wskaźnik ten przyjmuje wartości od -1 do 1 przy czym wyższe wartości (domyślnie jaśniejsze obszary) wyróżniają roślinność cechującą się lepszą kondycją. Spowodowane jest to różnicą w odbiciu promieniowania ze światła podczerwonego i czerwonego przez rośliny we wczesnym jak i końcowym etapie rozwoju. Odbicie światła podczerwonego oraz czerwonego przez rośliny we wczesnym etapie rozwoju w obrębie powierzchni jeziora będzie dalej nazywane zarastaniem efektywnym.

W przypadku użytej metody niezbędne stało się wykonanie przy pomocy „model buildera”, zaimplementowanego w oprogramowaniu ArcGis 10.2, modelu wykonującego analizę NDVI dla wybranego jeziora w określonym czasie. Do analizy wymagane jest posiadanie zdjęć satelitarnych z okresów letnich poszczególnych lat (dane satelitarne do opracowania zaczerpnięto z <https://earthexplorer.usgs.gov/>) oraz warstwy wektorowej badanego jeziora.

Analiza wykonana jest równolegle dla dwóch wybranych okresów, w celu umożliwienia użytkownikowi ustalenia dowolnego kroku czasowego badań. Narzędzie to wykorzystuje dane z kanałów spektralnych czerwonego oraz bliskiej podczerwieni do stworzenia rastrowej mapy indeksu wegetacji NDVI na obszarze badanego jeziora. Wynikiem jest raster z wyznaczonymi strefami efektywnego zarastania, utożsamiany ze strefą aktywnej, która wpływa w sposób bezpośredni na zmniejszanie się powierzchni jezior. Roślinność, która mimo faktycznego istnienia nie weszła w skład analizy, nie posiada znamion efektywnej wegetacji. Innym powodem jest fakt iż pokrywa ze zbyt małą powierzchnią aby istotnie zmienić wartość indeksu NDVI dla piksela o rozdzielczości 19m x 19m (odpowiadający jednemu punktowi na rycinach), na który pozwala owa metoda. Narzędzie wykorzystuje elementy zamiany rastra na warstwę punktową. Doświadczony użytkownik ma możliwość eksploracji danych i ustawia wielkość indeksu NDVI, od którego liczone jest zarastanie. Z uwagi na klimat, możliwy zły stan roślinności wodnej oraz wpływ otaczającej wody dla poniższej analizy przyjęto wartość nieznacznie poniżej formalnego zera (-0.07) (Mironik 2016). Zbiór narzędzi (przy stosowanych do oprogramowania ArcGIS 10.3), użytych w celu uzyskania wyników szczegółowo objaśnia (ryc. 2).



Ryc. 2. Model ukazujący analizę wyznaczenia stref efektywnego zarastania

Fig. 2. Analysis model used to design effective overgrowing zone

Źródło: opracowanie własne.
Source: author's own elaboration.

Należy pamiętać, iż analiza ta z uwagi na rozdzielczość rastra wynikowego, najlepsze rezultaty osiąga w miejscach intensywnego zarastania, co utożsamiane jest z buforem 100 m od brzegu jeziora w przypadku jeziora Gardno. Taka metoda ma zastosowanie jedynie na głębokościach do 2 m pod lustrem wody ze względu na głębokość penetracji promieniowania czerwonego oraz podczerwonego w głąb powierzchni wody. Pomimo niewielkiego wpływu roślinności zanurzonej na wartości indeksu NDVI w przypadku badań o charakterze obszarowym, należy mieć na uwadze możliwe oddziaływanie na wartości indeksu w jednostce powierzchni. Wyjątek może stanowić roślinność pływająca.

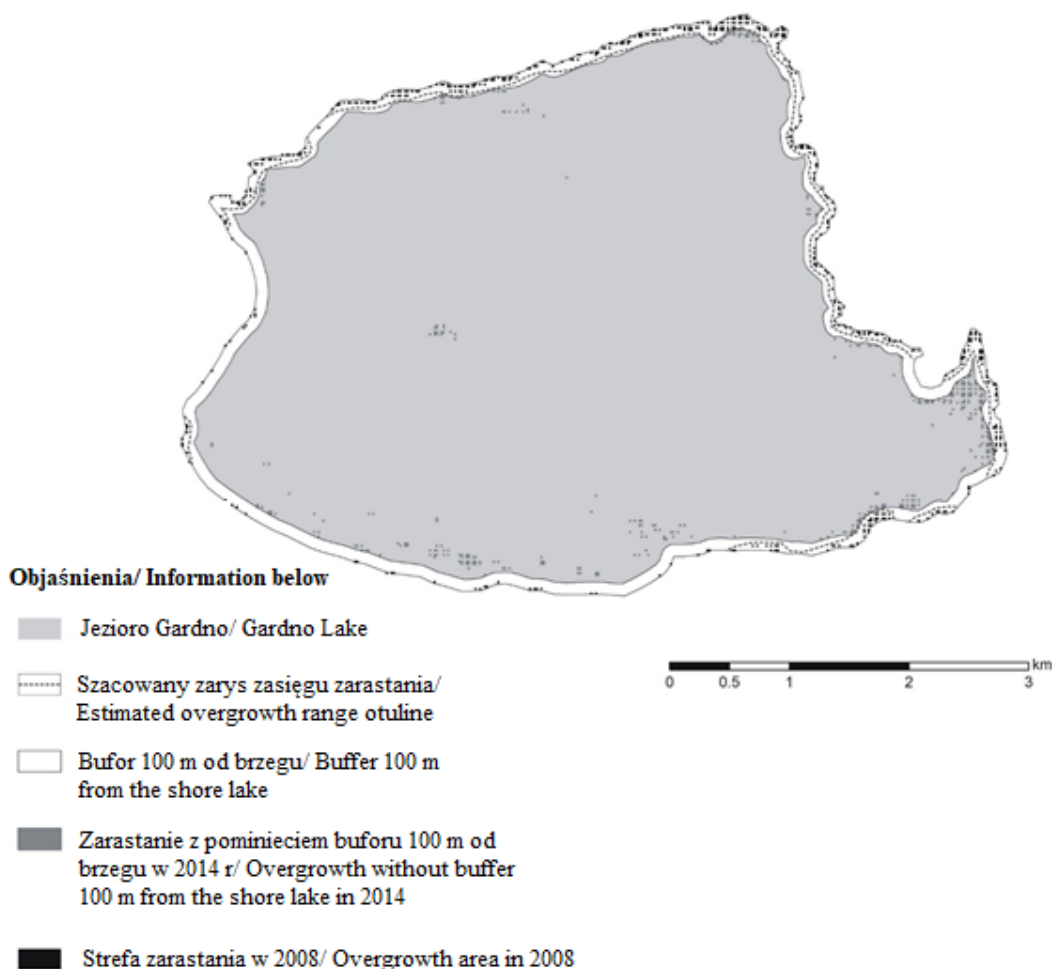
Charakterystykę uzyskanych wyników oparto również o dane temperatury powietrza oraz wielkości opadu atmosferycznego dla lat 2000 – 2014 ze stacji zlokalizowanej w Łebie. Dostępność wybranych charakterystyk meteorologicznych możliwa była przy użyciu informacji ze strony internetowej tutiempo (<https://en.tutiempo.net/climate/poland.html>). Aby wyznaczyć czynnik decydujący o rozwoju lub regresji powierzchni efektywnego zarastania uśredniono wartości temperatury oraz opadu dla okresów zimowych oraz letnich. Okres zimowy obejmuje miesiące od listopada do kwietnia. Analogicznie okres letni odnosi się do miesięcy począwszy od maja do października. Następnie wykonano analizę korelacji liniowej Pearsona między powierzchnią efektywnego zarastania, a w/w czynnikami meteorologicznymi, co pozwoli na odkrycie istniejących analogii.

W Polsce wykorzystanie indeksu NDVI dotyczyło w zasadzie rozpoznawania użytków zielonych (Kosiński, Kozłowska 2003; Kosiński, Hoffmann-Niedek 2008), w tym oceny warunków wodnych - uwilgotnienie (Kozłowska i in. 2004) oraz analizy zmian określonych siedlisk i zbiorowisk, a także monitorowania zmian środowiska przyrodniczego (Głowienka, Michałowska 2007) oraz wykorzystania w pracach klimatologicznych (Walawender 2009). W przypadku elementu zarastania jezior indeks ten w zasadzie nie był użyty. Podobna sytuacja jest w przypadku literatury obcojęzycznej, gdzie dominują prace związane z wykorzystaniem do celów określania zmian środowiska przyrodniczego (DeFries, Townshend 1994; Carlson, Ripley 1997; Chen i in. 2004). Pojedyncze prace analizujące NDVI w aspekcie zarastania jezior przedstawiono szczegółowo w dyskusji.

WYNIKI

Badanie obszarów aktywnego zarastania przeprowadzono w strefie 100 m od brzegu jeziora dla lat 2000-2014. Za pomocą NDVI można również przeprowadzić badanie roślinności poza strefą bufora (w rozumieniu obszaru położonego ponad 100 m od brzegu). Istnieje jednak ryzyko, obarczone błędem ze względu na rozmywanie się wartości indeksu NDVI roślinności oraz otaczającej wody, co wymusza obniżenie wartości granicznej indeksu, od której obliczana będzie strefa efektywnego zarastania. Istotną rolę odgrywa tu 19 m rozdzielczości rastra wynikowego. Dla poniższej analizy wynosiła ona (-0.42) i została wykonana w celu wizualizacji dla roku 2014.

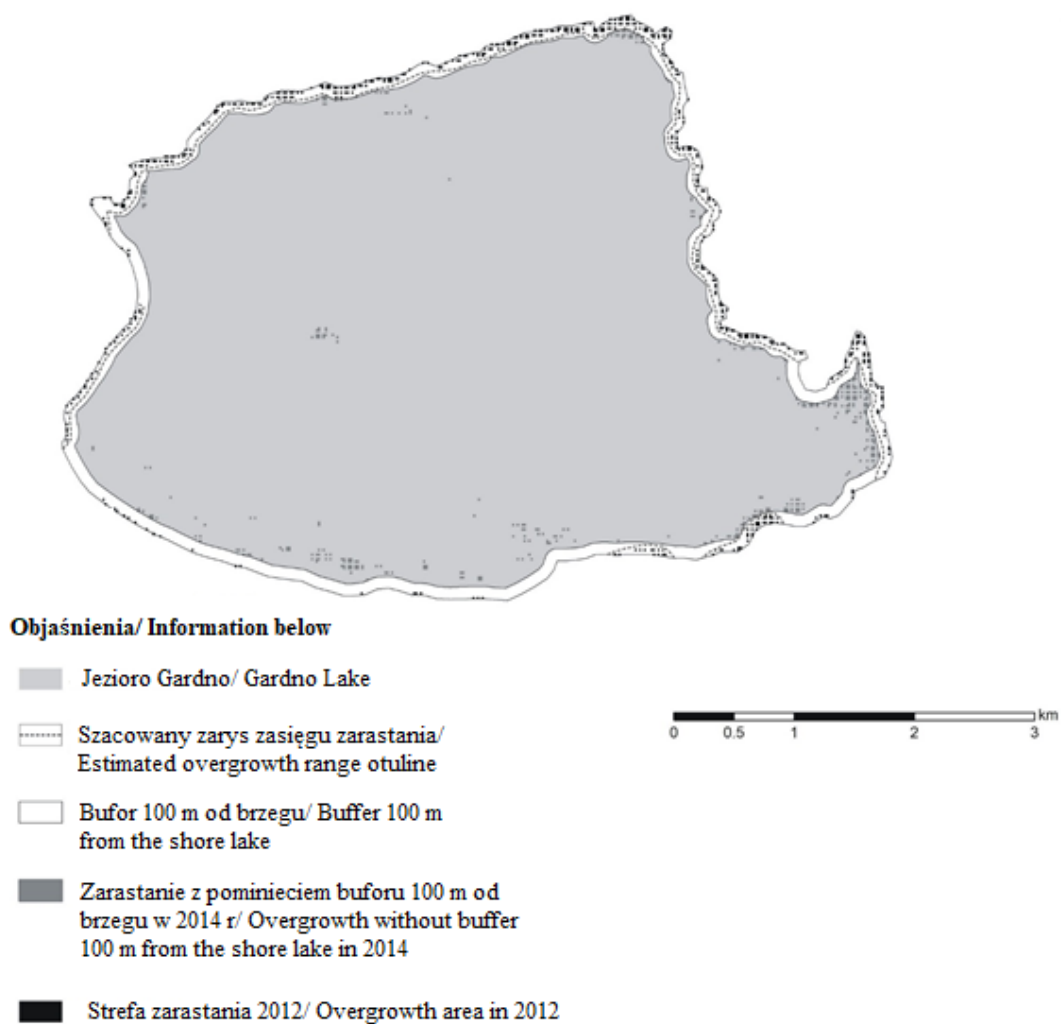
Rezultatem wykonanych czynności są mapy gdzie najbardziej widoczne jest efektywne zarastanie jeziora Gardno w latach 2000-2014. Zasięg zarastania ukazany na rycinach ma charakter jedynie poglądowy. Latami, w których proces ten był widoczny najintensywniej (>15 ha), są 2008, 2012 czy też 2014 (ryc. 3-5). W roku 2014 jego powierzchnia była największa i wynosiła 18.09 ha w obrębie strefy 100 m od linii brzegowej.



Ryc. 3. Zmiany zarastania efektywnego dla jeziora Gardno w roku 2008

Fig. 3. Changes in effective overgrowth for Gardno Lake in 2008

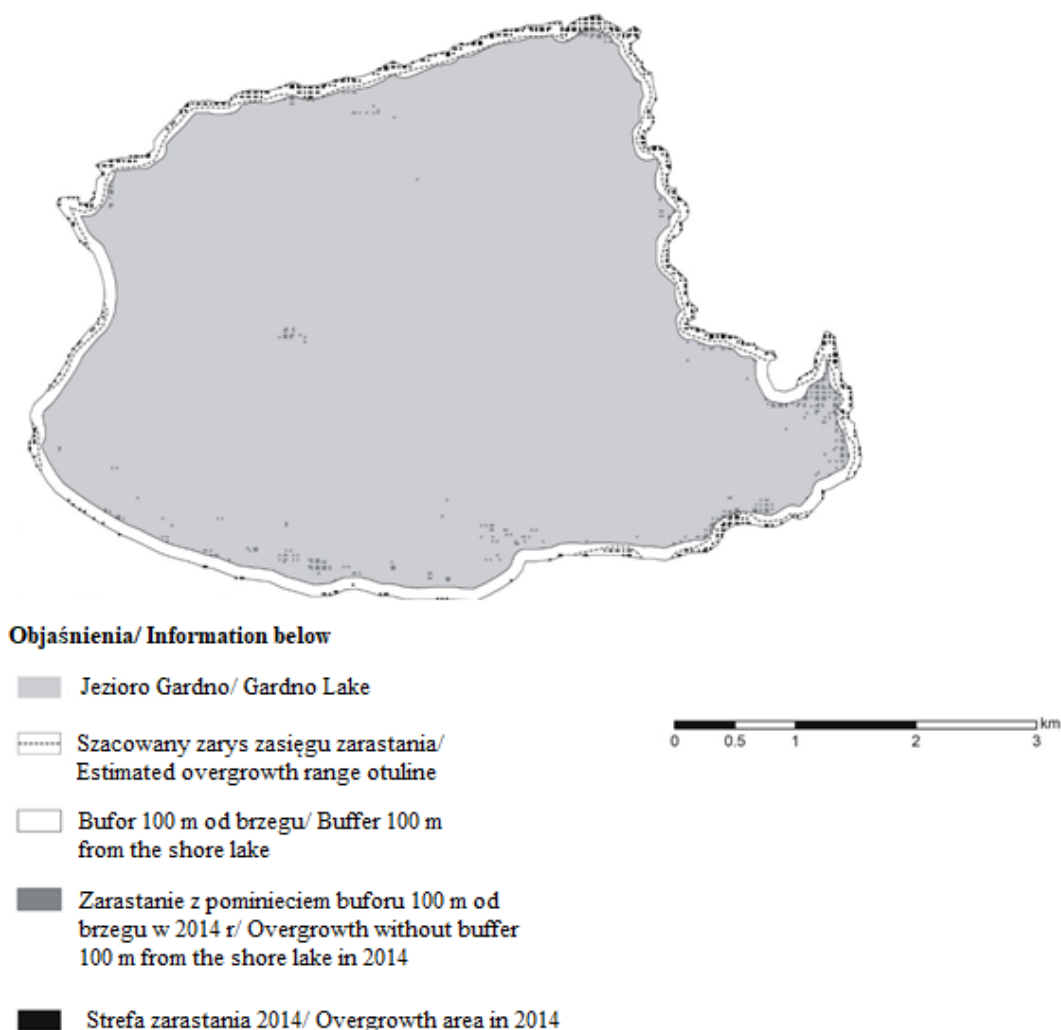
Źródło: opracowanie własne.
Source: author's own elaboration.



Ryc. 4. Zmiany zarastania efektywnego dla jeziora Gardno w roku 2012

Fig. 4. Changes in effective overgrowth for Gardno Lake in 2012

Źródło: opracowanie własne.
Source: author's own elaboration.

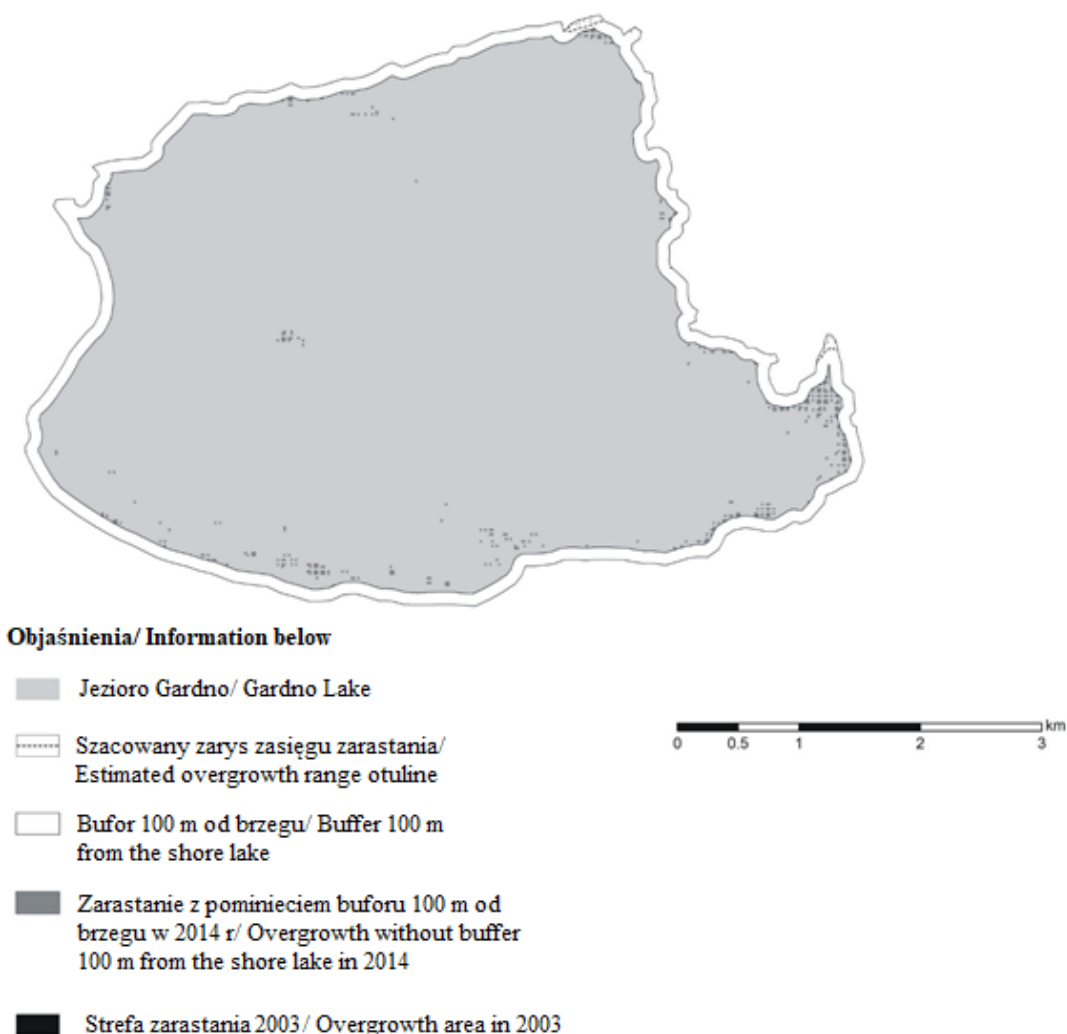


Ryc. 5. Zmiany zarastania efektywnego dla jeziora Gardno w roku 2014

Fig. 5. Changes in effective overgrowth for Gardno Lake in 2014

Źródło: opracowanie własne.
Source: author's own elaboration.

Najsłabiej zjawisko to było widoczne w latach 2001, 2003 oraz 2011. Warta odnotowania jest wielkość osiągnięta w roku 2003 wynosząca zaledwie 0.6 ha, będąca najniższą zanotowaną wartością w obrębie całego 15-lecia (ryc. 6). Dodatkowo, uzyskane wyniki zestawiono także w formie tabelarycznej (tab. 2).



Ryc. 6. Zmiany zarastania efektywnego dla jeziora Gardno w roku 2000

Fig. 6. Changes in effective overgrowth for Gardno Lake in 2000

Źródło: opracowanie własne.

Source: author's own elaboration.

Porównując rozkład obszaru efektywnego zarastania, wyraźnie zaznaczają się trzy strefy intensyfikacji tego procesu. Pierwszą z nich jest strefa południowego brzegu akwenu z nieznaczną dominacją w obrębie jej wschodniej części. Powodem wzmożonej ekspansji roślinności w tym obszarze może być oddziaływanie znajdujących się na południu polderów. Kolejną strefą jest najbardziej na wschód wysunięta część linii brzegowej jeziora Gardno. Przyczyną zintensyfikowania procesów w owym miejscu jest najprawdopodobniej obecny tam dopływ potamiczny, ze szczególnym uwzględnieniem największego dopływu do jeziora rzeką Łupawą. Dodatkowo należy stwierdzić, że Łupawa dostarcza do jeziora Gardno 3,73 tys. ton materiału rocznie, co daje wypłylenie rzędu 0,06 mm rocznie (Balicki 1980). Według K. Tobolskiego i in. (1997) jezioro Gardno wskutek zamulania materiałem niesionym przez rzekę Łupawę w ciągu ostatnich 60 lat, zmniejszyło swoją powierzchnię o około 100 ha, co stanowi 4% lustra wody. Ostatnią wyraźną strefą jest położony na północy obszar brzegowy jeziora. Efektem tego stanu rzeczy wydaje się być proces lądowania obszaru między wydmi a jeziorem zlokalizowanym na północy. Zmiany w poszczególnych jeziorach wynikają często

z wypływania na skutek przesuwania się pasa mierzejowego (Hildebrandt-Radke 1999) graniczącego z jeziorami od strony północnej. Według J. Miszalskiego (1973) tempo zmian linii brzegowej jeziora Łebsko w latach 1891–1965 wyniosło od 0,5 do 1,2 m rok⁻¹. Można zatem założyć, że tempo zmian linii brzegowej jeziora Gardno będzie zbliżone do tego dla jeziora Łebsko.

Tabela 2. Powierzchnia efektywnego zarastania w poszczególnych latach

Table 2. Area of effective overgrowing in particular years

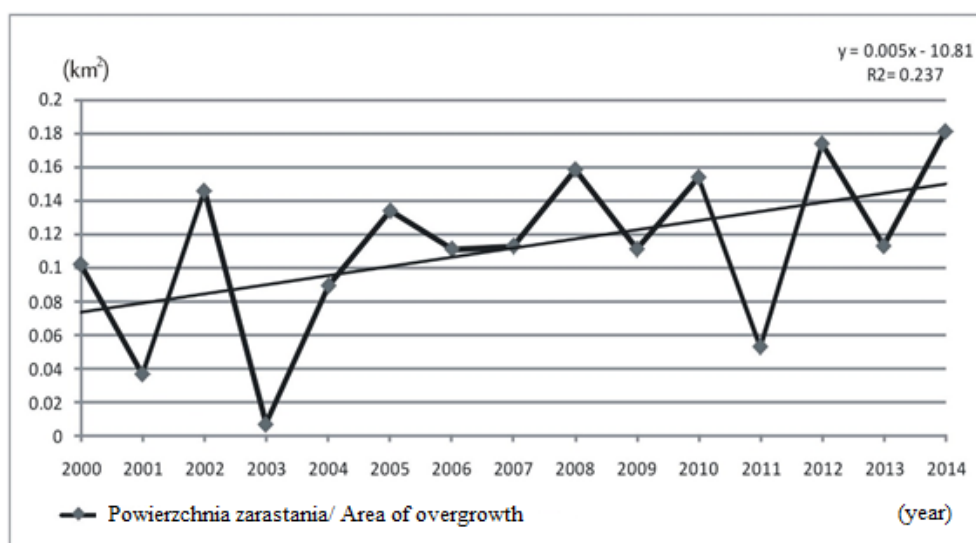
Rok/ Year	Powierzchnia [ha]/ Area of overgrowth [ha]	Procentowe zmiany w stosunku do roku 2000/ Percentage changes to relations to year 2000
2000	10,18	0,00%
2001	3,65	-64,15%
2002	14,55	42,93%
2003	0,61	-94,01%
2004	8,92	-12,38%
2005	13,36	31,24%
2006	11,12	9,23%
2007	11,23	10,31%
2008	15,81	55,30%
2009	11,05	8,55%
2010	15,38	51,08%
2011	5,24	-48,53%
2012	17,29	69,84%
2013	11,23	10,31%
2014	18,09	77,70%

Źródło: opracowanie własne.

Source: author's own elaboration.

Wpływ na wypływanie misy jeziora Gardno jak już wcześniej wspomniano ma przede wszystkim silne zarastanie. Do zarastania przyczyniają się głównie trzcinowe szuwały, które powodują cofanie się zasięgu wody w tempie 0,3–3,0 m rok⁻¹ (Piotrowska 1997). Według A. Choińskiego i A. Kanieckiego (2003), szuwały trzcinowe zajmują na obszarze jeziora Gardno pas o szerokości dochodzącej nawet do kilkuset metrów, zaś powierzchniowo 4,1% zwierciadła wody Gardna. W okresie 1912–1959 powierzchnia jeziora Gardno zmniejszyła się o 32 ha. Szacowana powierzchnia zarastania obecnie wynosi 4%. W ciągu ostatnich 50 lat, objętość jeziora zmniejszyła się w związku z tym o 6 mln m³ (Schechtl 1984), co stanowi około 16% jego powierzchni.

Rozkład zmienności zarastania efektywnego na jeziorze Gardno jest zróżnicowany. Wyraźnie zaznaczają się lata ze wzmożoną intensywnością procesu oraz lata wyraźnego jego spadku intensywności. Biorąc pod uwagę 15-lecie, proces wykazuje tendencję wzrostową. Trend liniowy wykonany na podstawie istniejących danych potwierdza powolny wzrost powierzchni zarastania jeziora Gardno, co jest naturalnym procesem cechującym wszystkie jeziora w obecnym klimacie. Równanie linii trendu ($y = 0,005x - 10,81$) dla powierzchni wyrażonej w km² powoduje, iż funkcja opisana tym wzorem ze względu na pierwszy parametr wskazuje na wzrost powierzchni zarastania efektywnego z czasem (ryc. 7).



Ryc. 7. Zmiany powierzchni efektywnego zarastania wraz z trendem liniowym

Fig. 7. Changes in the area of effective overgrowth along with the linear trend

Źródło: opracowanie własne.
Source: author's own elaboration.

Analiza korelacji, między zmiennością powierzchni efektywnego zarastania a wielkościami opadów oraz temperatury, uśrednionymi dla okresów zimowych oraz letnich daje zróżnicowane rezultaty. Na potrzeby niniejszej pracy ustalono, iż wartością korelacji liniowej Pearsona, która daje przypuszczenia, iż związek między wyznaczonymi zmiennymi nie jest jedynie dziełem przypadku ($k \in <-1, -0.3> < 0.3, 1>$), osiągnięta została jedynie dla związku powierzchni efektywnego zarastania, a temperaturą w zimowym okresie roku hydrologicznego, bezpośrednio poprzedzającym okres wegetacyjny roślin. Zależność ta osiąga wartość około 0,407.

Biorąc pod uwagę poszczególne miesiące, największa korelacja została osiągnięta dla badanego związku w miesiącach grudniu oraz marcu, w którym korelacja wyniosła odpowiednio 0,465 oraz 0,403. Taki stan rzeczy może być powodowany przemarzaniem roślin w okresie zimowym oraz znacznym ich wychładzaniem na początku okresu wegetacyjnego, co może wpływać na spowalnianie rozwoju flory w następującym okresie letnim. Warty odnotowania jest fakt możliwych nieznacznych różnic w wartościach korelacji, z powodu braku danych temperatury dla marca 2007 roku na stronach Tuttempo. Wyniki te prezentuje tabela 3. oraz rycina 8.

Tabela 3. Rozkład korelacji liniowej Pearsona dla temperatury oraz opadu w okresach letnich oraz zimowych w odniesieniu do powierzchni efektywnego zarastania

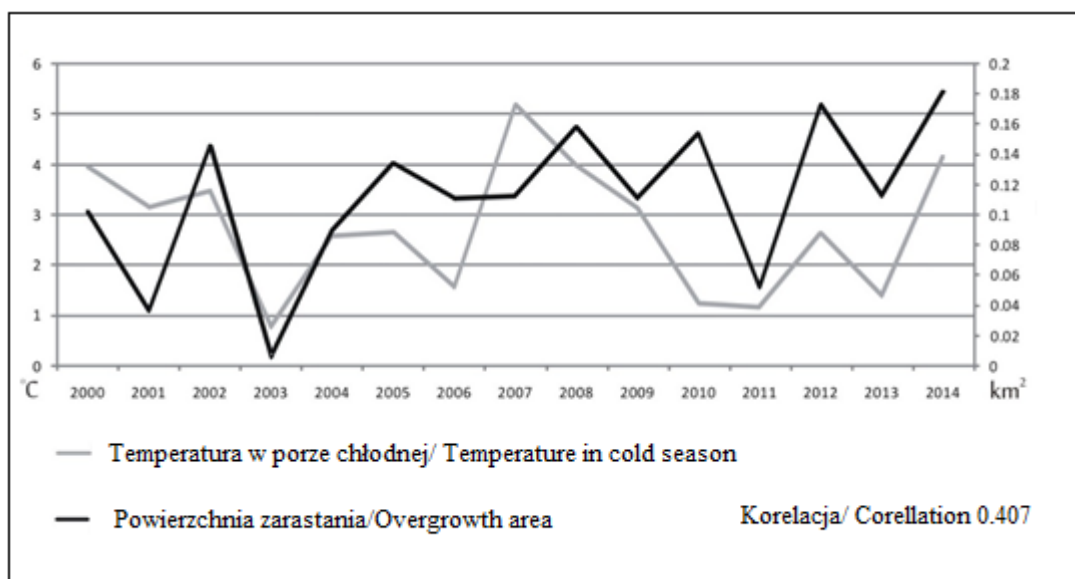
Table 3. Pearson's linear correlation coefficient for temperature and precipitation in warm and cold periods with respect to effective overgrowth

	T* (okres zimowy/ cold season)	T (okres letni/ warm season)	PP** (okres zimowy/old season)	PP (okres letni/ warm season)
Korelacja/ Corellation	0,407	0,039	0,097	-0,105

*Temperatura/ Temperature [°C]

**Opad/ Precipitation [mm]

Źródło: opracowanie własne.
Source: author's own elaboration.



Ryc. 8. Zmiana powierzchni efektywnego zarastania oraz zmiany temperatury w zimowym okresie poprzedzającym wegetację roślinności

Fig. 8. Change in the surface of effective overgrowth and temperature changes in the cool period preceding the growing season

Źródło: opracowanie własne.
Source: author's own elaboration.

DYSKUSJA

W dotychczasowej literaturze polskiej, dotyczącej zarastania zbiorników wodnych, najczęściej stosuje się tradycyjne metody określenia ekspansji roślinności wodnej. Oprócz pomiarów wykonywanych w terenie, bardzo często autorzy prac dokonują weryfikacji kartograficznej w celu jak najbardziej dokładnego prześledzenia zmian na przestrzeni lat. A. Choiński (2007) oszacował, iż żywotność jezior zlokalizowanych na Niziu Polskim wynosi od kilkuset do 2 tysięcy lat. Istnieją przypadki przejawiające się znacznie szybszym procesem zaniku niecki jeziornej, trwającej nawet kilkadziesiąt lat. Według A. Nowackiej i M. Ptaka (2007) w ciągu ostatnich 100 lat na Pojezierzu Wielkopolsko – Kujawskim liczba jezior zmniejszyła się pod wpływem zarastania o 23%. Metodyka związana z określeniem wielkości i tempa procesu zaniku, jest dość często przytaczana w polskiej literaturze. W swoich badaniach A. Choiński i M. Ptak (2008), skupił się na zastosowaniu metody pozwalającej określić przebieg zaniku jezior zlokalizowanych na terenie Wielkopolski w porównaniu z innymi regionami Polski. W tym celu dokonał analizy powierzchni jezior oraz wypłymania masy jeziornej, na skutek dostawy osadów dennych. Metoda jaką obrał autor opracowania związana, była z weryfikacją materiałów kartograficznych, jednocześnie autor opracowania wskazuje na dokładność zastosowanej metody oraz duży nakład pracy i kosztów związanych z podejmowaną tematyką badawczą. Wynikiem przeprowadzonych analiz, jest oszacowanie iż w ciągu 50 lat, powierzchnia jezior poddanych weryfikacji, uległa znacznemu zmniejszeniu w porównaniu z powierzchnią jezior zlokalizowanych na pojezierzach Pomorskim i Mazurskim, gdzie zanik nie postępował tak dynamicznie, jak w przypadku Pojezierza Wielkopolsko – Kujawskiego (Choiński, Ptak 2008).

Powyższe wnioski uzasadnia obliczony przez V. Kowalczyk (1993), współczynnik zarastania jezior roślinnością litoralną wynoszący odpowiednio dla Pojezierza Wielkopolsko-Kujawskiego 7,3%, dla Pojezierza Mazurskiego 4%, z kolei dla Pojezierza Pomorskiego 2,8%. Autorzy opracowania wskazują, iż głównymi uwarunkowaniami wpływającymi na uzyskane wyniki mają: szeroko pojęta działalność człowieka przejawiająca się ingerencją w system hydrograficzny tamtejszych zlewni oraz intensywniejsza działalność rolnicza. Duża dostawa substancji biogenicznych i daleko posunięte prace melioracyjne, przyczyniają się do rozwoju roślinności wodnej, a co za tym idzie stopniowego zaniku powierzchni jeziora (Choiński, Ptak 2008).

Współcześnie dzięki stale rozwijającej się technologii, dającej coraz to nowe narzędzia można zbadać dane zjawisko zachodzące w środowisku przyrodniczym, niekoniecznie bazując na pracochłonnych pomiarach w terenie. Przykładami zastosowania nowoczesnych metod badawczych, przy wykorzystaniu analizy zdjęć satelitarnych, pochwalić się mogą nieliczni badacze w kraju jak i za granicą. Metoda ta, stanowi nowoczesne spojrzenie na procesy zachodzące w środowisku przyrodniczym, która obecnie staje się popularną techniką przeżywającą swój rozkwit.

Zespół estońskich badaczy z Uniwersytetu Nauk o Życiu w Tartu, przeprowadził badania, mające na celu określenie wielkości i tempa zarastania jeziora Vorts. Na podstawie zdjęć satelitarnych, dokonali analizy roślinności porastającej badany zbiornik, zlokalizowany w południowej części kraju. Jezioro Vorts, charakteryzuje się dużą powierzchnią około 27 000 ha, z kolei jego głębokość maksymalna wskazuje, iż jest to rodzaj płytkiego zbiornika, maksymalnie dochodząc do 6 m głębokości. Powierzchnia zlewni całkowitej jeziora wynosi 3 100 km², a głównym ciekim zasilającym jezioro jest Vaike Emajogi o długości 82 km. Otrzymane wyniki obserwacji, prowadzone w latach 1985 – 2007, wskazują o postępującym wzroście roślinności litoralnej do około 160 % w porównaniu do początkowych lat obserwacji. Roczny przyrost trzciny porastającej brzegi jeziora oszacowano na 2,2 m (Liira i in. 2010).

Podobną metodą określenia ekspansji roślinności wodnej, posłużyła się grupa amerykańskich badaczy, dokonując analizy na podstawie wskaźnika wegetacji, dodatkowo wzbogacając to zdjęciami z satelity Modis. Obiektem ich obserwacji było jezioro Maracaibo, usytuowane w północno – zachodniej części Wenezueli. Badany zbiornik, cechuje się bardzo dużą powierzchnią około 1 434 300 ha i odpowiednio dużą głębokością maksymalną dochodzącą do 250 m. Analizie poddano stale powiększającą się populację rzęsy, która intensywnie zaczęła rozrastać się od 2004 roku, z kolei obserwacje zapoczątkowano od 2003 i skończono w 2006 roku. Rezultatem prowadzonych obserwacji, jest zwiększenie się koncentracji rzęsy wodnej wynoszącej maksymalnie 11 % w porównaniu z pierwszym rokiem badań. Cechą charakterystyczną jeziora Maracaibo jest fakt, iż jest ono połączone z Morzem Karaibskim, a pomimo to masa wodna wypełniająca nieckę jeziorną jest słodka. Przyczyny stale powiększającej się populacji rzęsy, należy upatrywać poprzez zwiększoną dostawę substancji odżywczych oraz bardzo korzystne warunki klimatyczne, stanowiące jeden z najważniejszych mechanizmów przyspieszających jej wzrost (Kiage, Walker 2009).

Kolejnym przykładem badań, z zakresu zarastania jezior przez roślinność litoralną jest praca włoskich badaczy. W latach 1997 – 2005, przeprowadzili obserwację dwóch jezior zlokalizowanych w różnych częściach kraju. Pierwszym zbiornikiem poddanym analizie było jezioro Garda, usytuowane w północnych Włoszech. Jest to duże jezioro o powierzchni 37 000 ha i bardzo głębokie maksymalnie ma 346 m głębokości. Główną rzeką zasilającą jezioro Garda jest Sarca, o długości 78 km. Drugim zbiornikiem poddanym obserwacji było Jezioro Trazymeńskie, zlokalizowane w środkowych Włoszech, o powierzchni 12 800 ha i głębokości maksymalnej 8 m. Cechą charakterystyczną

badanych jezior, jest ich lokalizacja na terenach zabagnionych. Analiza wskaźnika wegetacji wykazała, iż udział roślinności litoralnej ulegał zmniejszeniu, przy jednoczesnym przesuwaniu się linii brzegowej zbiorników, na skutek powiększających się terenów podmokłych w pobliżu jezior. Nad jeziorem Garda zaobserwowano regresję roślinności wodnej z 3600 m² w roku 1997 do 3425 m² odnotowanych w roku 2005. Z kolei w przypadku Jeziora Trazymeńskiego, odnotowano zaskakujące wyniki, iż roślinność litoralna ulega zmniejszeniu od środka zbiornika o około 0,55 ha w ciągu każdego roku. Przyczyną otrzymanych rezultatów są specyficzne uwarunkowania hydrograficzne, decydujące o wielkości ekspansji trzciny porastającej badany zbiornik. Nadmiar wody pochodzących z pobliskich obszarów podmokłych zalewa skupiska trzciny doprowadzając do jej gnicia, co w efekcie skutkuje zmniejszeniem jej populacji w obrębie badanego jeziora (Bresciani i in. 2009).

Z kolei według badań E.S. Papastergiadou i in. (2008) przeprowadzonych dla jeziora Cheimaditida położonego w północnej Grecji, przy wykorzystaniu narzędzi GIS, obszary na których widoczne jest lustro wody narażone są na ekspansję trzcinowisk. W okresie około 50 lat, powierzchnia trzcinowisk wzrosła w jeziorze o 19%, gdy powierzchnia obszarów wodnych spadła o 99,5%. Wpływ na rozwój trzcinowisk może mieć niekontrolowany dopływ związków biogennych, a przede wszystkim związków azotowych (Mitch i Day Jr. 2006).

Reasumując, można stwierdzić iż coraz ważniejsza staje się ocena w jaki sposób zmiany środowiskowe wpływają na rozkład i dynamikę siedlisk roślinnych, aby umożliwić m.in. lepsze przewidywania skutków globalnego ocieplenia, zmniejszenia różnorodności biologicznej lub degradacji siedlisk. Zdolność do przewidywania reakcji ekologicznych często utrudniała ograniczona znajomość interakcji troficznych oraz ograniczoną informację o roślinności w skali czasowej i przestrzennej. Niedawno zmieniła się jednak sytuacja, co wynika z możliwości wykorzystania NDVI w badaniach ekologicznych (Pettorelli i in. 2005).

Porównując wpływ nadmiernego rozwoju roślinności na badane ekosystemy wodne, oszacowano iż jezioro Vorts (Estonia), uległo zmniejszeniu o około 7,3 % w ciągu 22 lat obserwacji, z kolei jezioro Maracaibo (Wenezuela) zmniejszyło swą powierzchnię o około 2,8 % w ciągu czterech lat. Badanie warunków wegetacji roślinności wodnej nad jeziorem Gardno, wskazuje iż badany zbiornik zmniejszył swoją powierzchnię o około 5,2 % w ciągu 15 lat obserwacji. Uzyskane wyniki zachęcają do dalszych badań nad poruszonym zagadnieniem i budzą chęć poznania w jaki sposób oraz w jak szybkim tempie reagują pozostałe zbiorniki w Polsce jak i na świecie.

PODSUMOWANIE

Zaproponowana metoda może posłużyć do badań wielkości i tempa zarastania efektywnego jeziora na przestrzeni analizowanego obszaru i w pewnych okolicznościach może zastąpić drogie i czasochłonne badania w terenie. W obecnej analizie wykorzystano 15 zdjęć satelitarnych w okresie 15 lat, jednak narzędzie pozwala z dużym powodzeniem zagęścić krok czasowy, co pozwoli śledzić bieżący rozwój roślinności. W przypadku opisywanego jeziora Gardno, powierzchnia efektywnego zarastania wzrosła o 7,91 ha w latach 2000 - 2014, jednak proces ten nie ma charakteru płynnego. Najsilniej zjawisko to odznacza się w południowej, północnej oraz wschodniej części jeziora w obrębie strefy brzegowej. Wielkość powierzchni zarastania efektywnego zależy przede wszystkim od temperatury w okresie zimowym poprzedzającym badany okres wegetacyjny. Mimo, iż metoda ta daje wymierne rezultaty w obrębie 100 m od linii brzegowej, tak jak w przypadku każdej metody

komputerowej, w celu uzyskania większej pewności wykonanych analiz, należałoby przeprowadzić dodatkowo badania terenowe.

Literatura

- Balicki H., 1980, Szkic hydrograficzny zlewni jeziora Gardno, *Wiad. IMiGW*, 4, 8-10.
- Bresciani M., Stroppiana D., Fila G., Montagna M., Giardino C., 2009, Monitoring reed vegetation in environmentally sensitive areas in Italy, *Rivista Italiana di Terelirevamento*, 41 (2), 125-137.
- Carlson T.N., Ripley D.A., 1997, On the relation between NDVI, fractional vegetation cover, and leaf area index, *Remote Sensing of Environment*, 62 (3), 241-252.
- Chen J., Jönsson P., Tamura M., Gu Z., Matsushita B., Eklundh L., 2004, A simple method for reconstructing a high-quality NDVI time-series data set based on the Savitzky–Golay filter, *Remote Sensing of Environment*, 91 (3), 332-344.
- Choiński A., 2007, *Limnologia fizyczna Polski*, Wydawnictwo Naukowe UAM, Poznań.
- Choiński A., Kaniecki A., 2003, *Plan ochrony Słowińskiego Parku Narodowego*, Poznań (maszynopis).
- Choiński A., Ptak M., 2008, Zanikanie jezior w Wielkopolsce na tle Polski, *Roczniki Gleboznawcze*, 59 (2), 25-31.
- Cieśliński R., 2011. *Geograficzne uwarunkowania zmienności hydrochemicznej jezior wybrzeża południowego Bałtyku*, Wyd. UG, Gdańsk.
- DeFries R.S., Townshend J.R.G., 1994, NDVI-derived land cover classifications at a global scale, *International Journal of Remote Sensing*, 15 (17), 3567-3586.
- Głowienka E., Michałowska K., 2007, Możliwość monitorowania zmian środowiska z użyciem narzędzi GIS na przykładzie Słowińskiego Parku Narodowego, *Archiwum Fotogrametrii, Kartografii i Teledetekcji*, 17, 241-249.
- Hildebrandt-Radke I., 1999, Bilans transportu eolicznego na plaży mierzei Gardnieńsko-Łebskiej [w:] K. Borówka, Z. Młynarczyk, A. Wojciechowski (red.), *Ewolucja geosystemów nadmorskich południowego Bałtyku*, Bogucki Wyd. Naukowe, Poznań-Szczecin, 79-86.
- Jańczak J., 1997, *Atlas jezior Polski. Jeziora zlewni rzek Przymorza i dorzecza dolnej Wisły*, Bogucki Wyd. Nauk., Poznań.
- Kiage L., Walker N., 2009, Using NDVI from MODIS to monitor duckweed bloom in lake Maracaibo: Venezuela, *Water Resources Management*, 6, 1125-1135.
- Kondracki J., 2000, *Geografia regionalna Polski*, PWN, Warszawa.
- Kosiński K., Hoffmann-Niedek A., 2008, Klasyfikacja obiektowa użytków zielonych z wykorzystaniem wieloletnich zmian NDVI i filtracji kierunkowych obrazu satelitarnego, *Archiwum Fotogrametrii, Kartografii i Teledetekcji*, 18, 273-282.
- Kosiński K., Kozłowska T., 2003, Zastosowanie wskaźnika NDVI i filtracji kierunkowej do rozpoznawania użytków zielonych oraz analizy zmian siedlisk i zbiorowisk łąkowych, *Archiwum Fotogrametrii, Kartografii i Teledetekcji*, 13, 387-395.
- Kowalczyk V., 1993, *Zróżnicowanie zarastania jezior w zlewniach w obrębie wydzielonych pojezierzy*
- Kozłowska T., Kosiński K., Kwiecień R., Ziaja W., 2004, Zastosowanie wskaźnika NDVI do wyróżniania łąk o różnym poziomie użytkowania i uwilgotnienia, *Woda-Środowisko-Obszary Wiejskie*, 4, 201-218.
- Liira J., Feldman T., Maemets H., Peterson U., 2010, Two decades of macrophyte expansion on the shores of a large shallow northern temperate lake – A retrospective series of satellite images, *Aquatic Botany*, 93, 207-215.
- Miszalski J., 1973, *Współczesne procesy eoliczne na Pobrzeżu Słowińskim. Studium Fotointerpretacyjne*, Dokumentacja Geogr. Inst. Geogr. PAN, 1-182.
- Mitsch W.J., Day Jr. J.W., 2006, Restoration of wetlands in the Mississippi–Ohio–Missouri (MOM) River Basin: Experience and needed research, *Ecological Engineering*, 26 (1), 55-69.

- Mironik K. 2016, Strefy zarastania roślinnością wodną w północno zachodnim basenie jeziora Łebsko z wykorzystaniem metod NDVI w latach 2002-2014, Katedra GIS UG (poster)
- Nowacka A., Ptak M., 2007, Zmiany powierzchni jezior na Pojezierzu Wielkopolsko-Kujawskim w XX w., *Badania fizjograficzne nad Polską Zachodnią, Seria A – Geografia Fizyczna*, 58, 149-157
- Papastergiadou E.S., Retalis A., Apostolakis A., Georgiadis Th., 2008, Environmental Monitoring of Spatio-temporal Changes Using Remote Sensing and GIS in a Mediterranean Wetland of Northern Greece, *Water Resources Management*, 22 (5), 579-594.
- Pettorelli N., Vik J. O., Mysterud A., Gaillard J. M., Tucker C. J., Stenseth N. C., 2005, Using the satellite-derived NDVI to assess ecological responses to environmental change, *Trends in Ecology & Evolution*, 20 (9), 503-510.
- Piotrowska H. (red.), 1997, *Przyroda Słowińskiego Parku Narodowego*, Bogucki Wyd. Naukowe, Poznań-Gdańsk.
- Rouse J.W., 1978, *Monitoring the vernal advancement and retrogradation (green wave effect) of natural vegetation*, Remote Sensing Center, Texas University.
- Schechtel A., 1984, *Plan urządzenia gospodarstwa leśnego na okres 1.01.1983 do 31.12.1992*, Słowiński Park Narodowy, I: część ogólna planu, Mscr., BULIGL oddział w Szczecinku.
- Tobolski K., Mocek A., Dzieciolowski W., 1997, *Gleby Słowińskiego Parku Narodowego w świetle historii roślinności i podłoża*, Homini, Bydgoszcz – Poznań.
- Walawender J., 2009, Wykorzystanie danych satelitarnych Landsat i technik GIS w badaniach warunków termicznych miasta (na przykładzie aglomeracji krakowskiej), *Prace Geograficzne*, 122, 81-98.
- Strony internetowe:
<http://fotoraporty.pl/oferta/teledetekcja/ndvi/>
<https://en.tutiempo.net/climate/poland.html>
<https://earthexplorer.usgs.gov/>