Przegląd Geograficzny
2018, 90, 1, s. 111–135
https://doi.org/10.7163/PrzG.2018.1.6

Instytut Geografii i Przestrzennego Zagospodarowania
Polska Akademia Nauk

https://www.igipz.pan.pl/przeglad-geograficzny.html

Hydrometeorologiczne uwarunkowania erozji wybrzeża klifowego wyspy Wolin

Hydro-meteorological conditions underpinning cliff-coast erosion on Wolin Island, Poland

Jacek Tylkowski

Uniwersytet im. Adama Mickiewicza
Instytut Geoekologii i Geoinformacji
ul. Krygowskiego 10, 61-680 Poznań
jatyl@amu.edu.pl

Zarys treści. Celem niniejszej pracy było określenie czasowej zmienności warunków hydrometeorologicznych, które w największym stopniu decydują o dynamice erozji wybrzeża klifowego wyspy Wolin. Warunki hydrometeorologiczne lat hydrologicznych 2009–2014 odniesiono do corocznych pomiarów cofania korony klifu. Wskazano występowanie szczególnie istotnych zdarzeń hydrometeorologicznych, które potencjalnie sprzyjały wystąpieniu procesów erozyjnych (np. ruchy masowe, spłukiwanie i erozja eoliczna). W pracy uwzględniono także geomorfologiczne skutki występowania dwóch ekstremalnych zdarzeń hydrometeorologicznych o wysokim potencjalne morfogenetycznym – głębokiego niżu Ksawery z grudnia 2013 r. (maksymalny poziom morza 612 cm) i ekstremalnego dwugodzinnego opadu atmosferycznego z 3 sierpnia 2014 r. (74 mm).

Słowa kluczowe: wybrzeże klifowe Bałtyku, wezbrania sztormowe, ekstrema meteorologiczne, erozja brzegu, wartości progowe.

Wstęp

Dla określenia funkcjonowania współczesnych geoekosystemów morskiej strefy brzegowej konieczne jest szczegółowe rozpoznanie warunków hydrometeorologicznych, które w największym stopniu wpływają na tendencje, cykliczność i sezonowość procesów geomorfologicznych. Geomorfologiczne przemiany wybrzeża klifowego wyspy Wolin uzależnione są głównie od dynamiki abrazji morskiej oraz erozji stokowej związanej przede wszystkim z ruchami masowymi i spłukiwaniem. Wysoki poziom morza występujący podczas wezbrań sztormowych oraz intensywne opady atmosferyczne doprowadzają do przekształceń wybrzeża klifowego, których przejawem jest m.in. cofanie korony klifu.

Wybrzeże klifowe jest szczególnie narażone na niszczenie podczas wysokiego poziomu morza i falowania sztormowego. Aktualnie obserwowany jest istotny

http://rcin.org.pl

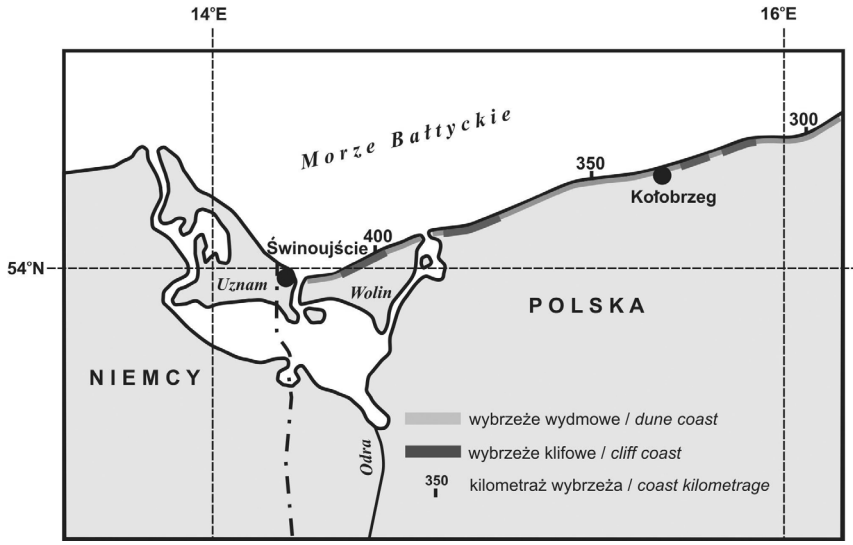
statystycznie trend wzrostu poziomu morza w polskiej strefie brzegowej Bałtyku. Analiza średniego poziomu morza w Świnoujściu dla 2. połowy XX wieku i 1. dekady XXI wieku wykazała wzrost poziomu morza o 1 mm/rok (Tylkowski, 2015). Dynamika podnoszenia się poziomu morza w strefie brzegowej Zatoki Pomorskiej nawiązuje do wzrostu globalnego średniego poziomu morza, który szacowany jest na 1 mm/rok (Harff i inni, 2007; Hünicke i inni, 2008; Milne i inni, 2009; Richter i inni, 2012). Hydrometeorologicznymi uwarunkowaniami determinującymi erozję wybrzeża klifowego wyspy Wolin zajmowali się m.in. J. Tylkowski (2012, 2013), J. Tylkowski i R. Kolander (2014), J. Tylkowski i M. Samołyk (2012) oraz B. Wiśniewski i T. Wolski (2011). Badania aktywności morfogenetycznej brzegu klifowego wyspy Wolin koncentrowały się głównie na określeniu sekularnego, długookresowego tempa abrazji klifów (Kostrzewski i Zwoliński, 1988; Kostrzewski i inni, 2015), jak i na występowaniu epizodycznych, ekstremalnych zdarzeń geomorfologicznych (Hojan, 2009; Kostrzewski, 1997; Kostrzewski i Zwoliński, 1998; Winowski, 2008, 2015).

Obszar badań, materiał i metody

Obszarem badań jest aktywne morfogenetycznie, północne wybrzeże klifowe wyspy Wolin. Wyspa Wolin zajmuje powierzchnię 265 km^2 i według regionalizacji fizycznogeograficznej Polski J. Kondrackiego (2000) należy do Pobrzeża Szczecińskiego. Jądro wyspy Wolin tworzą plejstoceńskie wzgórza moren czołowych (do 115 m n.p.m.), kończące się na północy stromą falezą. Obszar badań obejmuje strefę wysokiego, aktywnego brzegu klifowego wyspy o długości 15 km, rozciągającego się od Międzywodzia do Międzyzdrojów (ryc. 1).

W tej strefie brzegowej, na odcinku od Grodna do Białej Góry, wykonywane są coroczne pomiary tempa cofania korony klifu. Badany odcinek brzegu klifowego występuje w obrębie najwyższej jednostki fizycznogeograficznej wyspy, którą jest Wolińska Morena Czołowa. Podcięcie abrazyjne tej moreny w obrębie obszaru badań tworzy najwyższe w Polsce klify, które są bardzo zróżnicowane pod względem morfologiczno-litologicznym. Wolińska Morena Czołowa jest najważniejszym typem rzeźby wyspy Wolin o glacitektonicznym charakterze (Krygowski, 1959), a główna oś morfologiczna moreny ma kierunek NE-SW (Kostrzewski i Zwoliński, 1988). Na klifach wolińskich prowadzone były szczegółowe badania litostratygraficzne (Borówka i inni, 1982, 1999). Na badanym odcinku klify osiągają maksymalną wysokość 95 m. Zbudowane są z szarych i brązowych glin morenowych, fluwioglacjalnych utworów piaszczysto-żwirowych i eolicznych piasków pokrywowych. Gliny szare (do 40 m miąższości) zaliczono do zlodowacenia środkowopolskiego, a gliny brązowe (do 3 m miąższości) uznano za osad zlodowacenia bałtyckiego (Kostrzewski i Krygowski, 1967). Seria eolicznych piasków pokrywowych o zróżnicowanej miąższości (od 2 do 15 m), w miejscach o największej miąż-

http://rcin.org.pl



Ryc. 1. Lokalizacja obszaru badań – wybrzeże klifowe wyspy Wolin (397–412 km)
Location of the research area – the cliff coast of Wolin Island (at km 397–412)
Opracowanie własne, podobnie pozostałe ryciny i tabele / *Author's own elaboration, as well as other figures and tables.*

szości rozdzielona jest dwoma horyzontami gleb kopalnych (Borówka i inni, 1982). W stropowej części piasków pokrywowych występują rytmiczne przewarstwienia osadów organicznych i mineralnych, związanych z rozwojem nasp przyklifowych (Prusinkiewicz, 1971). Zróżnicowanie litologiczne utworów budujących klify i wiążący się z tym typ geodynamiczny wybrzeża mają ważne znaczenie dla wykształcenia form i współczesnej ewolucji rzeźby. Klify wolińskie reprezentują wszystkie typy geodynamiczne wydzielone przez W. Subotowicza (1982): klif gliniasty – typ obrywowy, klif piaszczysty – typ osypiskowy, klif piaszczysto-gliniasty – typ osuwiskowo-spływowy. Roślinność występująca na klifie świadczy o jego aktualnym stanie morfogenetycznym. Odcinki klifowe aktywne morfogenetycznie są pozbawione roślinności lub występuje na nich roślinność pionierska. Na zboczach gliniastych występują wtedy zbiorowiska *Poo-Tussilaginetum farfarae*, stanowiące pionierskie siedliska kępy z podbiałem, ostrożniem, skrzypem (klif gliniasty). Na żywym klifie piaszczystym występują zbiorowiska *Trifolio-Anthylidetum maritimae* z przelotem, koniczyną i trzcinnikiem piaskowym (Łabuz, 2012). Natomiast na stabilnych, słabo aktywnych morfogenetycznie klifach, występuje głównie buczyna storczykowa (*Carici-Fagetum balticum*) (Piotrowska, 1994). Trwała, zwarta roślinność na klifie ogranicza intensywność procesów erozji stokowej (np. spłukiwania), jednakże nie stanowi ona zabezpieczenia przed intensywną abrazją morską, której skutkiem są np. ruchy masowe. Znaczna deniwelacja terenu wolińskich klifów oraz ich duże zróżnicowanie morfolitologiczne sprzyjają intensywnym procesom erozyjnym, zwłaszcza podczas występowania ekstremalnych wezbrań sztormowych (fot. 1).

http://rcin.org.pl

Fot. 1. Wybrzeże klifowe wyspy Wolin (odcinek Gosań-Świdna Kępa) w warunkach sztormowych (4 stycznia 2017 r., godz. 15, niż Alex, poziom morza 628 cm) (Fot. J. Tylkowski, M. Winowski)
The cliff coast on Wolin Island (Gosań-Świdna Kępa section) in storm-surge conditions (on 4 January 2017 at 15:00, Alex low, sea level 628 cm)

W opracowaniu dla lat hydrologicznych 2009–2014 przedstawiono zróżnicowanie przebiegu głównych uwarunkowań hydrometeorologicznych, które decydują o intensywności cofania się nadmorskich klifów wyspy Wolin. Charakterystykę warunków hydrometeorologicznych dokonano w ujęciu lat hydrologicznych, gdyż w umiarkowanej strefie morfoklimatycznej woda jest głównym i najważniejszym czynnikiem decydującym o aktualnym stanie i przemianach środowiska przyrodniczego. W pracy dokonano analizy czasowej zmienności średniego i maksymalnego poziomu morza na podstawie dobowych danych ze stacji mareograficznej w Świnoujściu. Dane poziomu morza otrzymano z Instytutu Meteorologii i Gospodarki Wodnej. W opracowaniu przedstawiono także charakterystykę roczną, półroczną i miesięczną elementów pogody, które mają największy wpływ na erozję brzegu klifowego, np. opadów atmosferycznych, pokrywy śnieżnej, warunków termicznych i anemometrycznych. Dobowe dane meteorologiczne pochodzą z pomiarów własnych, ze stacji meteorologicznej w Białej Górze, należącej do Uniwersytetu im. Adama Mickiewicza w Poznaniu. Stacja w Białej Górze umiejscowiona jest na wysokości 70 m n.p.m. i jest jedyną stacją meteorologiczną w Polsce położoną na koronie wybrzeża klifowego. Pozostałe nadmorskie stacje meteorologiczne prowadzą badania w strefie wybrzeża wydmowego. Warunki hydrometeorolo-

http://rcin.org.pl

giczne badanego okresu odniesiono do corocznych pomiarów cofania korony klifu. Badania tempa cofania korony klifu wykonywano za pomocą geodezyjnych pomiarów GPS RTK co 1 m, na 5 odcinkach testowych o zróżnicowanych warunkach morfolitologicznych (tab. 1).

Tabela 1. Charakterystyka morfolitologiczna odcinków o zróżnicowanej dynamice cofania się klifu
Morpholithological characteristics of cliff-top recession rates

Odcinek badawczy *Research section*	Długość odcinka [m] *Section length [m]*	Wysokość klifu [m] *Cliff height [m]*	Ekspozycja [°] *Exposure [°]*	Litologia *Lithology*
I	250	15	350	Piaski fluwioglacjalne i eoliczne na warstwie gliny
II	210	20	340	Warstwa gliny przykryta piaskami fluwioglacjalnymi
III	400	35–60	323	Warstwa gliny przykryta piaskami fluwioglacjalnymi i eolicznymi, w środkowym fragmencie dominacja utworów piaszczystych
IV	200	50	312	Piaski fluwioglacjalne i eoliczne
V	280	30–40	315	Warstwa gliny przykryta piaskami fluwioglacjalnymi i eolicznymi, w stropowym fragmencie dominacja utworów piaszczystych

Wyniki

Wyspa Wolin, w szczególności jej morska strefa brzegowa, wyróżnia się na tle kraju występowaniem klimatu umiarkowanego ciepłego o największych wpływach morskich. Odziaływanie morza znajduje odzwierciedlenie w małej amplitudzie i relatywnie niskich wartościach ekstremalnych warunków termicznych i opadowych. Średnia roczna temperatura powietrza za lata hydrologiczne 2009–2014 wyniosła 9,1°C (tab. 2). Najchłodniejszy w analizowanym okresie był 2010 r. ze średnią temperaturą powietrza 8,4°C, a najcieplejszy 2014 r. – 10,4°C. W półroczu chłodnym średnia temperatura powietrza wyniosła 3,1°C i była prawie 5 razy niższa niż w półroczu ciepłym (15,1°C). Absolutną minimalną temperaturę powietrza wynoszącą -18,7°C odnotowano 6 lutego 2012 r. Natomiast najwyższa temperatura powietrza wystąpiła 29 czerwca 2012 r. i wyniosła 35,8°C. Strefa nadmorska charakteryzuje się zatem, w porównaniu z pozostałą częścią kraju, względnie niską absolutną amplitudą temperatury powietrza, wynoszącą 54,5°C.

Pod względem warunków opadowych badany obszar charakteryzuje się przeciętną na tle kraju atmosferyczną dostawą wody, która wyniosła średnio 622,6 mm/rok. Zakres zmienności rocznej sumy opadów wynosił od 526,0 mm

http://rcin.org.pl

w 2013 r. do 830,5 mm w 2011 r. W analizowanym okresie prawie dwukrotnie więcej opadów występowało w półroczu ciepłym (401,9 mm) niż w okresie od listopada do kwietnia (220,7 mm) (tab. 3). W ciągu roku notowano przeciętnie 151 dni z opadem atmosferycznym, jednakże najczęściej były to opady o małej wydajności. Nie stwierdzono występowania opadów ulewnych ≥100 mm/dobę i opadów rozlewnych ≥200 mm/3 dni. Opady o dobowej sumie <1 mm stanowiły 21% całkowitej frekwencji opadów. Opady dobowe <10 mm stanowiły aż 89% przypadków. Opadów atmosferycznych o wyższej wydajności było bardzo mało: ≥10 mm – 10%, ≥50 mm – 0,2%. Najwyższą dobową sumę opadów o wartości 74,0 mm stwierdzono 3 sierpnia 2014 r. Pokrywa śnieżna na badanym obszarze, jako źródło dostawy i retencji wody, odgrywa niewielką rolę. Średnio w roku występuje przez 46 dni, ale jej miąższość jest mała (11 cm). Maksymalna miąższość pokrywy śnieżnej wynosiła 50 cm w dniu 13 lutego 2010 r. Zima w 2010 i 2013 r. była wyjątkowa, gdyż pokrywa śnieżna występowała długo, prawie 3 miesiące.

Tabela 2. Charakterystyka roczna warunków hydrometeorologicznych w strefie wybrzeża klifowego wyspy Wolin w okresie XI 2009 – X 2014
A characterisation of annual hydro-meteorological conditions along the cliff coast of Wolin Island in the November 2009 – October 2014 period

Uwarunkowania *Conditions*	Rok hydrologiczny / *Hydrological year*						
	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2009–2014
Uwarunkowania meteorologiczne / *Meteorological conditions*							
Temperatura powietrza – średnia [°C] *Air temperature – average*	9,2	8,4	8,8	9,3	8,8	10,4	9,1
Temperatura powietrza – maksymalna [°C] *Air temperature – maximum*	29,3	35,2	31,7	35,8	33,5	32,8	35,8
Temperatura powietrza – minimalna [°C] *Air temperature – minimum*	–6,9	–15,9	–13,3	–18,7	–9,8	–16,5	–18,7
Opady atmosferyczne – średnia suma [mm] *Precipitation – total average*	546,4	664,4	830,5	575,5	526	592,9	622,6
Opady atmosferyczne – maksymalne dobowe [mm] *Precipitation – maximum daily*	30,6	43,5	52,1	44,8	21,9	74	74
Opady atmosferyczne – liczba dni *Precipitation – number of days*	154	141	132	169	167	145	151
Pokrywa śnieżna – średnia miąższość [mm] *Snow cover– average thickness*	8	20	18	5	9	4	11

http://rcin.org.pl

Uwarunkowania *Conditions*	Rok hydrologiczny / *Hydrological year*						
	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2009–2014
Uwarunkowania meteorologiczne / *Meteorological conditions*							
Pokrywa śnieżna – maksymalna dobowa [mm] *Snow cover – maximum daily*	20	50	31	12	25	8	50
Pokrywa śnieżna – liczba dni *Snow cover – number of days*	26	83	42	19	90	15	46
Prędkość wiatru – maks. średnia dobowa [m s^{-1}] *Wind speed* *– the maximum daily average*	9,9	9,1	10,9	10	6,8	13,6	13,6
Usłonecznienie – suma roczna [godz.] *Insolation – total annual [h]* (2013–2014)	–	–	–	–	1768	1824	1796
Wilgotność względna powietrza – średnia [%] *Relative air humidity – average*	81,8	82,1	80,6	78,4	79,2	79,1	80,2
Ciśnienie atmosferyczne – średnie [hPa] *Atmospheric pressure – average*	1006	1004,2	1006,1	1006,3	1005,7	1005,6	1005,6
Temperatura gruntu 5 cm – średnia [°C] *Ground temperature 5 cm* *– average*	5,3	4,7	4,7	5,4	8,9	3,5	5,4
Uwarunkowania morskie / *Sea conditions*							
Poziom morza – średni [cm] *Sea level – average*	504	502	510	514	504	506	507
Poziom morza – maksymalny [cm] *Sea level – maximum*	621	598	632	642	580	612	642
Poziom morza – minimalny [cm] *Sea level – minimum*	434	382	418	418	402	421	382

http://rcin.org.pl

Tabela 3. Charakterystyka półroczna warunków hydrometeorologicznych w strefie wybrzeża klifowego wyspy Wolin w okresie XI 2009 – X 2014
A characterisation of half-annual hydro-meteorological conditions along the cliff coast of Wolin Island in the November 2009 – October 2014 period

Uwarunkowania *Conditions*	Rok hydrologiczny / *Hydrological year*					
	Półrocze chłodne (XI–IV) Cold half-year (XI–IV)			Półrocze ciepłe (V–X) *Warm half-year (V–X)*		
	Średnia *Average*	Maksimum *Maximum*	Minimum *Minimum*	Średnia *Average*	Maksimum *Maximum*	Minimum *Minimum*
Uwarunkowania meteorologiczne / *Meteorological conditions*						
Temperatura powietrza – średnia [°C] *Air temperature – average*	3,1	5,0	1,9	15,1	15,8	14,6
Temperatura powietrza – maksymalna [°C] *Air temperature – maximum*	5,6	7,6	4,2	19,1	19,7	18,3
Temperatura powietrza – minimalna [°C] *Air temperature – minimum*	0,6	2,6	-0,4	11,8	12,4	11,3
Opady atmosferyczne – średnia suma [mm] *Precipitation – total average*	220,7	268,6	163,9	401,9	562,2	257,4
Opady atmosferyczne – maksymalne dobowe [mm] *Precipitation – maximum daily*	2,9	25,6	0,1	5,4	74,0	0,1
Opady atmosferyczne – liczba dni *Precipitation – number of days*	77,0	99,0	62,0	75,0	92,0	61,0
Pokrywa śnieżna – średnia miąższość [mm] *Snow cover – average thickness*	13	20	4	2	9	0
Pokrywa śnieżna – maksymalna dobowa [mm] *Snow cover – maximum daily*	13	50	0	2	13	0
Pokrywa śnieżna – liczba dni *Snow cover – number of days*	46	90	15	1	7	0
Prędkość wiatru – maks. średnia dobowa [m s^{-1}] *Wind speed – the maximum daily average*	3,0	13,6	0	2,4	9,9	0
Usłonecznienie – suma dobowa [min.] *Insolation – total daily [min]* (2013–2014)	171,1	782,0	0	417,4	833,0	0
Wilgotność względna powietrza – średnia [%] *Relative air humidity – average*	83,9	100,0	35,4	76,5	100,0	43,1
Ciśnienie atmosferyczne – średnie [hPa] *Atmospheric pressure – average*	1005,0	1035,1	956,7	1006,3	1026,0	973,8
Temperatura gruntu 5 cm – średnia [°C] *Ground temperature 5 cm – average*	0,5	14,7	-20,0	11,5	26,1	-2,4
Uwarunkowania morskie / *Sea conditions*						
Poziom morza – średni [cm] *Sea level – average*	505	624	433	509	594	456
Poziom morza – maksymalny [cm] *Sea level – maximum*	516	642	453	517	621	465
Poziom morza – minimalny [cm] *Sea level – minimum*	493	605	382	501	573	402

http://rcin.org.pl

Wybrzeże morskie charakteryzuje się wyższą, zwłaszcza w porównaniu ze strefą Niżu Polskiego, prędkością wiatru, czego przejawem jest wysoka wartość maksymalnej średniej dobowej prędkości wiatru wynosząca 13,6 ms^{-1}. Najwyższe prędkości wiatru notowano w sztormowym okresie zimowym, od listopada do kwietnia, z kulminacją 26,6 ms^{-1} w dniu 6 grudnia 2013 r. Na funkcjonowanie wybrzeża klifowego, oprócz warunków pogodowych, największy wpływ wywierają warunki morskie, zwłaszcza wezbrania sztormowe. Średni poziom morza w badanym okresie wynosił 507 cm. Najwyższy średni roczny poziom morza odnotowano w 2012 r. (514 cm), a najniższy w 2010 r. (502 cm). Wyższe wartości stwierdzono w okresie sztormowym, w półroczu chłodnym, kiedy średni poziom morza wynosił 508,8 cm. Był on o 4,3 cm wyższy niż w półroczu ciepłym. Maksymalny poziom morza o wartości 642 cm stwierdzono 14 stycznia 2012 r. i był on o 135 cm wyższy od średniego poziomu morza z okresu 2009–2014.

Pod względem właściwości termicznych najchłodniejszym miesiącem był styczeń, którego średnia temperatura powietrza wyniosła -0,8°C, a najcieplejszym lipiec, dla którego stwierdzono średnią wartość temperatury powietrza wynoszącą 19,3°C (tab. 4). Niekorzystne warunki termiczne dla procesów erozji stokowej występowały podczas przemarznięcia gruntu. W okresie od grudnia do lutego często występowało przemarznięcie gruntu, czego przejawem była ujemna temperatura gruntu na głębokości 5 cm. W tym okresie inicjacja ruchów masowych i spłukiwania w wyniku opadów atmosferycznych i roztopów śnieżnych była utrudniona. Jednakże podczas abrazyjnego podcięcia klifu przez falowanie morza mogło dochodzić do przemieszczania się mas skalnych w dół. Największa atmosferyczna dostawa wody występowała w okresie letnim, od czerwca do sierpnia. Najwyższa miesięczna wydajność opadów występowała w lipcu – 101,7 mm, a najniższa w kwietniu – 21,8 mm. Wysoka wydajność opadów w okresie letnim, niekiedy o znacznej dobowej wartości (maksimum 74 mm), była czynnikiem sprzyjającym występowaniu ruchów masowych i spłukiwania na klifie. Natomiast najbardziej sprzyjające warunki dla erozji eolicznej występowały w miesiącach zimowo-wiosennych, zwłaszcza w grudniu i kwietniu, kiedy notowano największą prędkość wiatru (maksymalna średnia dobowa >10 ms^{-1}). Szczególnie korzystne warunki dla abrazji klifów występowały w sezonie sztormowym, w miesiącach zimowych, od grudnia do lutego oraz w październiku. W tym czasie średni poziom morza był względnie wysoki, a maksymalny jego poziom przekroczył 600 cm (tab. 4). Wezbrania sztormowe występujące głównie w półroczu chłodnym sprzyjały występowaniu podcięć abrazyjnych na klifie i inicjacji ruchów masowych w postaci osuwisk i obrywów.

http://rcin.org.pl

Tabela 4. Zmienność miesięczna warunków hydrometeorologicznych w strefie wybrzeża klifowego wyspy Wolin w okresie XI 2009 – X 2014
Monthly variability in hydro-meteorological conditions along the cliff coast of Wolin Island in the November 2009 – October 2014 period

Uwarunkowania *Conditions*	Rok hydrologiczny – miesiące/*Hydrological year – months*											
	XI	XII	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X
Uwarunkowania meteorologiczne / *Meteorological conditions*												
Temperatura powietrza – średnia dobowa [°C] *Air temperature – average daily*	5,6	0,8	-0,8	0,0	3,7	9,1	12,7	15,9	19,3	18,3	14,9	9,7
Temperatura powietrza – maksymalna dobowa [°C] *Air temperature – maximum daily*	22,8	11,7	22,8	11,0	21,4	25,2	29,2	35,8	35,2	33,5	33,5	23,3
Temperatura powietrza – minimalna dobowa [°C] *Air temperature – minimum daily*	-7,8	-1,1	-16,5	-18,7	-8,6	-3,4	0,5	6,8	6,4	8,3	5,3	0,6
Opady atmosferyczne – średnia [mm] *Precipitation – total average*	54,8	44,1	42,5	30,1	27,4	21,8	50,6	65,1	101,7	91,1	37,1	56,2
Opady atmosferyczne – maksymalne dobowe [mm] *Precipitation – maximum daily*	25,6	17,6	15,4	16,1	15,4	23,3	25,5	26,3	52,1	74,0	22,2	22,8
Opady atmosferyczne – liczba dni *Precipitation – number of days*	15	17	15	13	9	8	12	12	12	13	11	15
Pokrywa śnieżna – średnia miąższość [mm] *Snow cover – average thickness*	7	12	11	18	9	9	0	0	0	0	0	0
Pokrywa śnieżna – maksymalna dobowa [mm] *Snow cover – maximum daily*	10	31	35	50	19	13	0	0	0	0	0	0
Pokrywa śnieżna – liczba dni *Snow cover – number of days*	1	12	13	14	5	1	0	0	0	0	0	0
Prędkość wiatru [m s^{-1}] – maks. średnia dobowa *Wind speed – the maximum daily average*	9,6	13,6	10,0	9,5	9,9	10,9	7,8	9,9	8,0	6,3	6,3	8,0
Usłonecznienie – średnia [godz.] *Insolation – total [h]* (2013–2014)	73	45	55	135	325	399	425	507	556	484	340	188

http://rcin.org.pl

Uwarunkowania *Conditions*	Rok hydrologiczny – miesiące/*Hydrological year – months*											
	XI	XII	I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X
Uwarunkowania meteorologiczne / *Meteorological conditions*												
Wilgotność względna powietrza – średnia [%] *Relative air humidity – average*	89	91	88	85	79	71	74	75	75	75	77	84
Ciśnienie atmosferyczne – średnie [hPa] *Atmospheric pressure – average*	1003	1003	1006	1005	1008	1006	1007	1006	1005	1006	1007	1007
Temperatura gruntu 5 cm – średnia [°C] *Ground temperature 5 cm – average*	3,6	-1,1	-2,8	-1,8	0,9	5,0	8,6	12,1	15,6	15,1	11,2	6,4
Uwarunkowania morskie / *Sea conditions*												
Poziom morza – średni [cm] *Sea level – average*	511	513	507	495	499	502	502	509	511	510	513	508
Poziom morza – maksymalny [cm] *Sea level – maximum*	595	623	642	632	583	598	568	568	557	546	589	621
Poziom morza – minimalny [cm] *Sea level – minimum*	428	418	382	418	428	461	404	474	448	472	462	402

W odniesieniu do dobowych danych hydrometeorologicznych z okresu XI 2008 – X 2014 wyznaczono ekstremalne wartości progowe dla poziomu morza i wybranych elementów pogody. Przyjęta klasyfikacja kwantylowa (percentyle 1 i 99 oraz 5 i 95) wyznacza wartości progowe występowania ekstremalnych zdarzeń hydrometeorologicznych w strefie wybrzeża klifowego wyspy Wolin. Wyznaczone wartości za pomocą percentyla 5 i 95 traktować można jako zdarzenia ekstremalne. Natomiast wartości percentyli 1 i 99 stanowią wartości progowe ekstremalnie wyjątkowych zdarzeń hydrometeorologicznych. Zastosowana metodyka określenia wartości progowych zdarzeń ekstremalnych za pomocą klasyfikacji kwantylowej (Czernecki i Miętus, 2011) jest najbardziej korzystna dla stosunkowo krótkich serii pomiarowych. W przypadku dłuższych ciągów danych możliwe będzie zastosowanie kryterium probabilistycznego (Jania i Zwoliński, 2011). Intensyfikacji erozji klifów sprzyjają ekstremalnie wyjątkowe zdarzenia związane głównie z wydajnymi opadami atmosferycznymi i wysokim poziomem morza. Zatem do erozji klifów może dochodzić podczas zdarzeń hydrometeorologicznych o wartości progowej 99 percentyla, którą stanowi dla dobowej sumy opadów atmosferycznych wartość 28,4 mm, a dla maksymalnego poziomu morza wartość 585 cm (tab. 5).

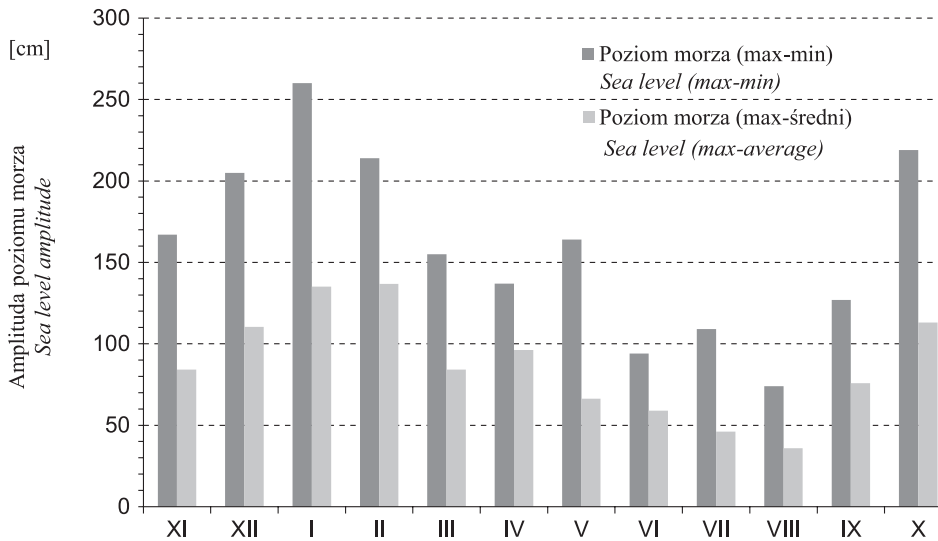
http://rcin.org.pl

Tabela 5. Ekstremalne wartości uwarunkowań hydrometeorologicznych w strefie wybrzeża klifowego wyspy Wolin
Extreme values for hydro-meteorological conditions along the cliff coast of Wolin Island

Parametr *Parameter*	Temperatura powietrza – średnia [°C] *Air temperature – average [°C]*	Temperatura powietrza – maksymalna [°C] *Air temperature – maximum [°C]*	Temperatura powietrza – minimalna [°C] *Air temperature – minimum [°C]*	Opady atmosferyczne [mm] *Precipitation [mm]*	Pokrywa śnieżna [mm] *Snow cover [mm]*	Prędkość wiatru – maksymalna średnia dobowa [m s^{-1}] *Wind speed – the maximum daily average [m s^{-1}]*	Usłonecznienie [min] *Insolation [min]*	Wilgotność względna powietrza [%] *Relative air humidity [%]*	Ciśnienie atmosferyczne [hPa] *Atmospheric pressure [hPa]*	Temperatura gruntu 5 cm [°C] *Ground temperature 5 cm [° C]*	Poziom morza – średni [cm] *Sea level – average [cm]*	Poziom morza – maksymalny [cm] *Sea level – maximum [cm]*	Poziom morza – minimalny [cm] *Sea level – minimum [cm]*
Absolutne maksimum *Absolute maximum*	28,6	35,8	22,7	74,0	50,0	13,6	833	100	1035,1	26,1	624	642	605
Absolutne minimum *Absolute minimum*	-13,3	-11,2	-18,7	0,1	0,0	0,0	0	35	956,7	-20,0	433	453	382
Ekstremum 99 percentyl *Extreme 99 percentile*	23,2	30,6	18,6	28,4	47,3	7,9	824	100	1027,0	21,1	559	585	545
Ekstremum 1 percentyl *Extreme 1 percentile*	-8,6	-5,9	-12,1	0,1	0,9	0,0	0	47	982,3	-13,3	463	474	445
Ekstremum 95 percentyl *Extreme 95 percentile*	20,6	26,0	18,4	15,6	38,6	5,6	772	99	1019,3	17,2	537	554	525
Ekstremum 5 percentyl *Extreme 5 percentile*	-3,5	-1,4	-6,1	0,1	2,0	0,1	0	58	990,8	-6,7	475	486	461

http://rcin.org.pl

Intensyfikacja abrazji klifów determinowana jest hydrodynamiką morza. Im wyższy poziom morza i wyższa amplituda podnoszenia się jego poziomu tym występują bardziej korzystne warunki dla inicjacji abrazji klifów. Największą amplitudą poziomu morza charakteryzuje się okres sztormowy. Szczególnie wysoką amplitudę poziomu morza stwierdzono w styczniu, kiedy różnica między maksymalnym i minimalnym poziomem morza wyniosła 260 cm. Z kolei najmniejsze zmiany poziomu morza występowały w okresie letnim, zwłaszcza w sierpniu, kiedy różnica między maksymalnym i minimalnym poziomem morza wynosiła zaledwie 74 cm (ryc. 2). Relatywnie mała dynamika poziomu morza w sezonie letnim nie sprzyja występowaniu intensywnej abrazji i cofania wybrzeża klifowego.

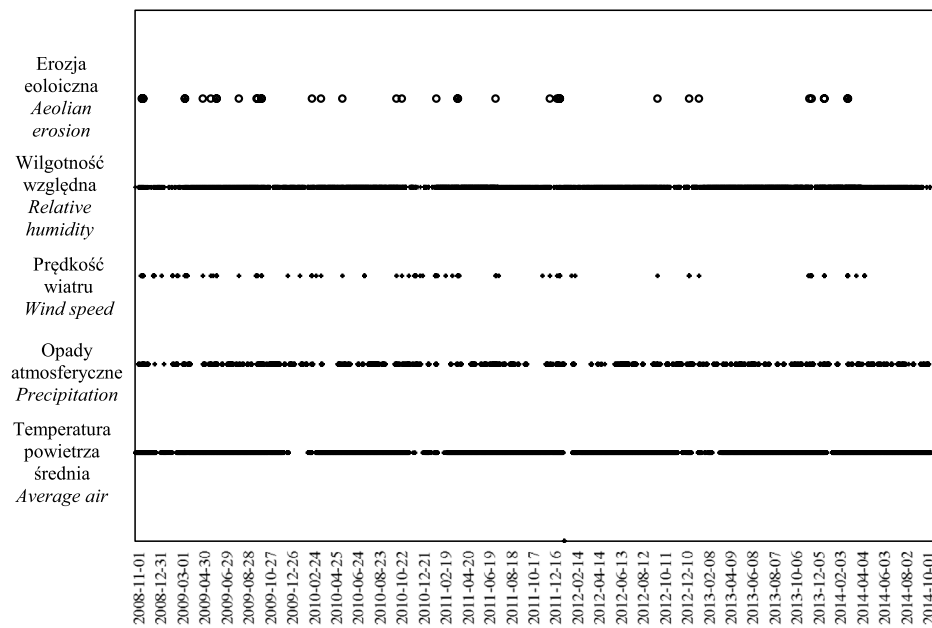


Ryc. 2. Maksymalna miesięczna amplituda poziomu morza Zatoki Pomorskiej (Świnoujście XI 2009 – X 2014)
Maximal monthly amplitudes of sea level in the Bay of Pomerania (Świnoujście, November 2009 – October 2014)

Na stan i geomorfologiczne zmiany wybrzeża klifowego istotne jest określenie rozkładu czasowego potencjalnie korzystnych warunków do występowania procesów eolicznych (ryc. 3). Bezpośrednie badania procesów eolicznych w strefie wybrzeża klifowego wyspy Wolin pozwoliły na określenie wartości progowych elementów pogody, które inicjują procesy eoliczne (m.in. erozję na stoku klifu i akumulację na koronie klifu). Na podstawie badań empirycznych zastosowano następujące kryteria meteorologiczne sprzyjające występowaniu procesów eolicznych: średnia dobowa prędkość wiatru >6 ms^{-1}, średnia dobowa temperatura powietrza >0°C, suma opadów atmosferycznych z 5 dni <6 mm, średnia dobowa wilgotność powietrza <95% (Hojan i Więcław, 2013, 2014). W badanym okresie występowało 39 dni, które spełniały wszystkie meteorologiczne kryteria

http://rcin.org.pl

inicjacji procesów eolicznych. Potencjalnie najwięcej dni sprzyjających występowaniu erozji eolicznej odnotowano w 2009 r., kiedy było aż 16 takich przypadków. W pozostałych latach takich dni było 3 razy mniej. Szczególnie niekorzystny dla procesów erozji eolicznej był 2014 r., kiedy stwierdzono zaledwie 2 takie dni. Najbardziej korzystne warunki meteorologiczne dla uruchomienia procesów eolicznych występowały w okresie jesienno-zimowym, kiedy występowały relatywnie wyższe prędkości wiatru i małe opady. Z kolei mała możliwość uruchomienia procesów erozji eolicznej występowała w sezonie wiosenno-letnim, kiedy prędkość wiatru była niższa, a opady atmosferyczne bardziej wydajne (ryc. 3).

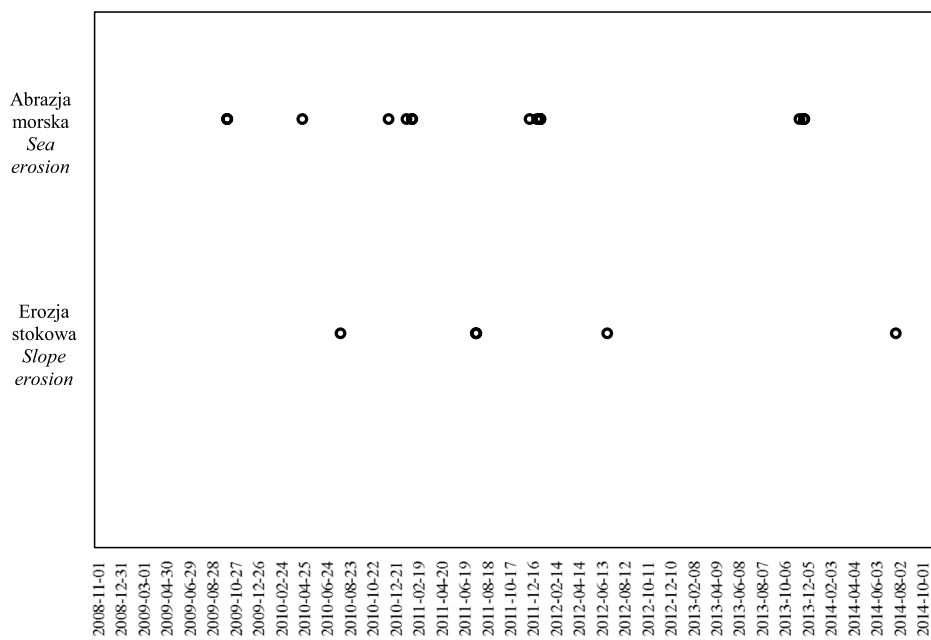


Ryc. 3. Zmienność czasowa meteorologicznych uwarunkowań potencjalnej erozji eolicznej na wybrzeżu klifowym wyspy Wolin w okresie XI 2009 – X 2014
Temporal variations in meteorological conditions affecting the potential occurrence of aeolian erosion along the Wolin Island cliff coast in the November 2009 – October 2014 period

O geomorfologicznych zmianach wybrzeża klifowego decydują przede wszystkim procesy erozyjne związane z występowaniem ruchów masowych, które generowane są głównie przez intensywne opady atmosferyczne i wysoki poziom morza (ryc. 4). Bezpośrednie badania ruchów masowych na wybrzeżu klifowego pozwoliły na określenie wartości progowych inicjacji procesów geomorfologicznych w odniesieniu do opadów atmosferycznych (opad w ciągu 2 dni >40 mm) i poziomu morza (>594 cm) (Winowski, 2015; Kostrzewski i inni, 2015). W badanym okresie jedynie przez 20 dni występowały korzystne warunki hydrometeorologiczne dla uruchomienia ruchów masowych. Stwierdzono 15 przypadków, kiedy

http://rcin.org.pl

istniały sprzyjające warunki dla abrazji wybrzeża. Wysoki, abrazyjny poziom morza występował głównie w latach 2012 (5 dni) i 2011 (4 dni). Natomiast w 2013 r. nie stwierdzono ani jednego dnia, kiedy istniały szczególnie korzystne warunki abrazji klifów. Procesy abrazji cechują się znaczną sezonowością. Ich występowanie stwierdzono głównie w okresie sztormowym, w półroczu chłodnym. Natomiast procesy erozji stokowej, związane z uruchomieniem ruchów masowych w wyniku intensywnych opadów atmosferycznych, charakteryzują się wybitną epizodycznością. W badanym okresie zanotowano jedynie 5 dni o potencjalnie korzystnych warunkach erozji stokowej, najwięcej w 2011 r. (2 dni). W latach 2009 i 2013 takich sprzyjających warunków opadowych nie stwierdzono. Procesy erozji stokowej występowały wyłącznie w okresie letnim. Analiza zmienności czasowej potencjalnie korzystnych warunków dla procesów abrazji i erozji wykazała ich wyraźną rozłączność sezonową. O geomorfologicznych przemianach wybrzeża klifowego w półroczu chłodnym (XI–IV) decydują przede wszystkim procesy abrazji związane z podcinaniem klifów podczas wezbrań sztormowych. Natomiast w półroczu ciepłym (V–X) wzrasta znaczenie procesów erozji stokowej, generowanych przez wydajne opady atmosferyczne (ryc. 4).



Ryc. 4. Zmienność czasowa hydrometeorologicznych uwarunkowań potencjalnych ruchów masowych i spłukiwania na wybrzeżu klifowym wyspy Wolin w okresie XI 2009 – X 2014
Temporal variations in hydro-meteorological conditions affecting the potential for mass movements to occur along the Wolin Island cliff coast in the November 2009 – October 2014 period

http://rcin.org.pl

Wpływ potencjalnie korzystnych uwarunkowań hydrometeorologicznych (ryc. 3, 4) na procesy erozyjne znajduje pewne odzwierciedlenie w tempie cofania korony klifu (tab. 6). Największą dynamikę stwierdzono w 2012 r., kiedy uśredniona wartość cofania korony dla wszystkich odcinków wyniosła 0,81 m, a maksymalne punktowe cofnięcie klifu wyniosło 2,6 m. W 2012 r. zaszło najwięcej ekstremalnych zdarzeń hydrometeorologicznych sprzyjających procesom erozji klifu (5 dni z wysokim poziomem morza i 1 dzień z wysokim opadem atmosferycznym). Jednakże zależności te nie są wprost proporcjonalne, gdyż intensywność cofania korony klifu nie zależy wyłącznie od wysokiego poziomu morza czy wydajnych opadów atmosferycznych. Relacje te zaburza wiele innych czynników, do których można zaliczyć m.in.: fazę aktywności morfogenetycznej brzegu klifowego, kierunek nabiegu fali do ekspozycji klifu, charakterystykę hydrometeorologiczną okresu poprzedzającego wystąpienie danego zdarzenia (tzw. *clustering*), właściwości batymetryczne strefy przyboju oraz bilans osadów w strefie podbrzeża i na plaży.

Tabela 6. Dynamika cofania korony klifu w okresie 2009–2014
The dynamics to cliff-crown retreat in the 2009–2014 period

Odcinek badawczy *Research section*	Średnie roczne tempo cofania klifu *Annual average cliff top recession rate* [cm]							Maksymalne roczne tempo cofania klifu *Maximum cliff top recession rate* [cm]						
	Rok hydrologiczny *Hydrological year*													
	2009	2010	2011	2012	2013	2014	śr. / *av.*2009–2014	2009	2010	2011	2012	2013	2014	max. 2009–2014
I	3	2	0	0	0	0	1	28	18	0	0	0	0	28
II	3	6	17	69	23	18	23	25	40	135	260	140	140	260
III	3	21	4	31	3	6	11	40	130	80	210	70	40	210
IV	4	66	21	16	15	2	21	32	350	145	90	140	15	350
V	1	29	13	28	19	21	19	11	196	130	260	190	320	320

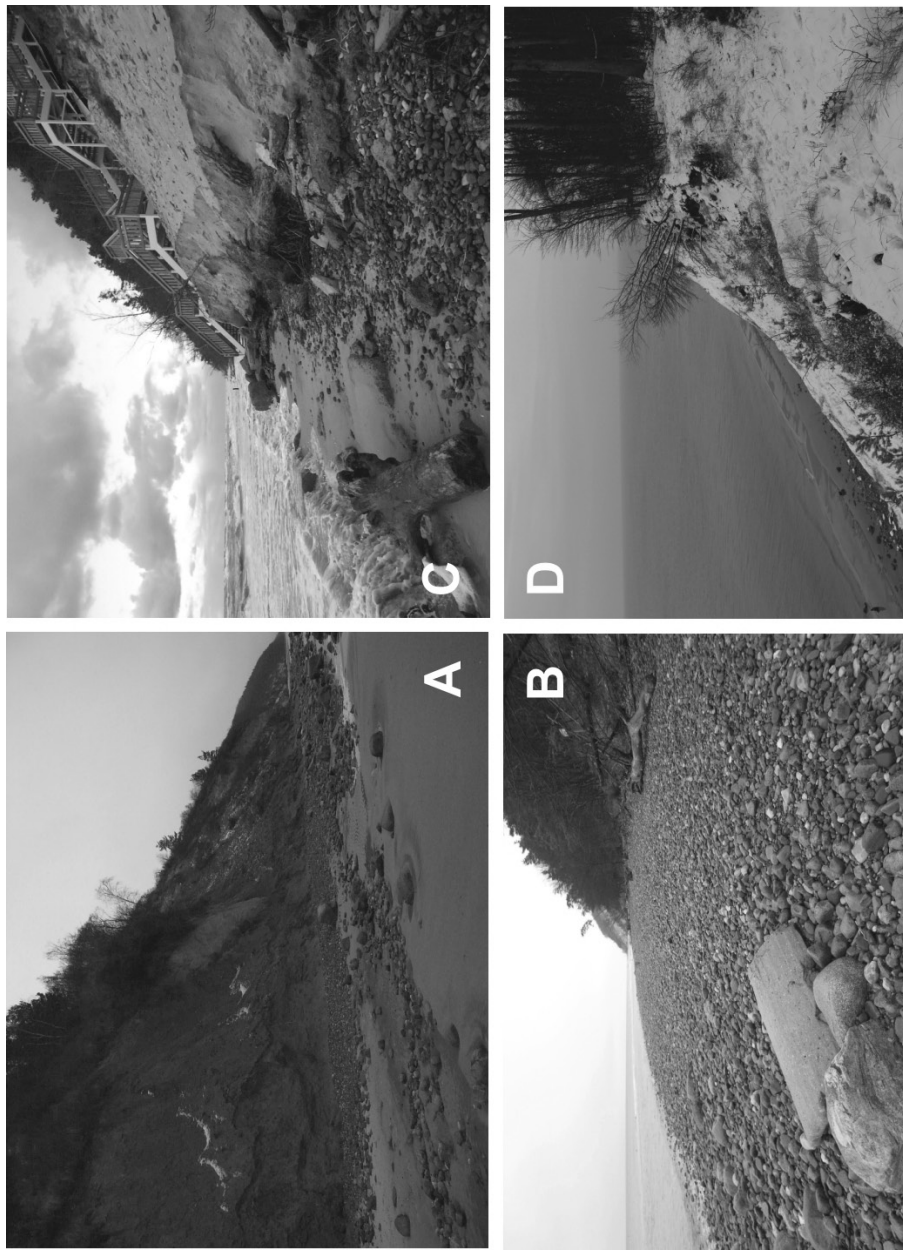
Specyfikę wpływu wielu czynników, nie tylko hydrometeorologicznych, na intensywność erozji wybrzeża klifowego wyspy Wolin przedstawiają przytoczone poniżej dwa zdarzenia ekstremalne. Pierwszy przykład dotyczy ekstremalnego wezbrania sztormowego, które wystąpiło w 1. dekadzie grudnia 2013 r. Kulminacja wysokiego poziomu morza miała miejsce w dniach 6 i 7 grudnia, kiedy maksymalny poziom morza wyniósł 612 cm. Wezbranie sztormowe wywołane było przemieszczaniem się głębokiego ośrodka niżowego (Ksawery) i związaną z tym

http://rcin.org.pl

dużą prędkością wiatru i nabiegiem fal morskich z kierunku północno-zachodniego. Jednakże ekstremalnie wyjątkowe wezbranie sztormowe nie wywołało ekstremalnej abrazji klifów. Przeprowadzone kartowanie geomorfologiczne nie wykazało inicjacji gwałtownych ruchów masowych w postaci rozległych osuwisk czy obrywów. Skutkiem wysokiej energii wezbrania sztormowego było przede wszystkim wystąpienie na całej długości klifu podcięcia abrazyjnego o przeciętnej wysokości 1,5 m (fot. 2A), usunięcie materiału piaszczystego z plaży i jej obniżenie o około 1 m (fot. 2B) oraz stworzenie pewnego zagrożenia dla istniejącej infrastruktury turystycznej w wyniku ruchów masowych (fot. 2C). Wezbranie sztormowe z grudnia 2013 r. nie spowodowało znacznego cofnięcia korony klifu. Pojedyncze i punktowe znaczne wartości cofnięcia korony klifu (np. 320 cm; tab. 6) spowodowane były wystąpieniem procesu erozji wykrotowej i przewracania drzew w strefie korony klifu, będących skutkiem silnego wiatru (średnia prędkość dobowa 13,6 ms^{-1}, maksymalna prędkość chwilowa 26,6 ms^{-1}). W 2014 r. hydrologicznym zarówno średnia jak i maksymalna wartość cofnięcia korony klifu nie była szczególnie wysoka na tle badanego okresu (tab. 6). Jednakże w wyniku podcięcia abrazyjnego, w przypadku występowania kolejnych abrazyjnych wezbrań sztormowych, istnieje możliwość utraty podparcia mas skalnych w strefie podnóża klifu i w konsekwencji do destabilizacji korony klifu. Powyższy przykład dobrze przedstawia sytuację, kiedy ekstremalne wezbranie sztormowe nie powoduje ekstremalnej abrazji klifu.

Drugie zdarzenie dotyczy wystąpienia ekstremalnego opadu atmosferycznego, który miał miejsce 3 sierpnia 2014 r. W tym dniu w ciągu 2 godzin stwierdzono ekstremalnie wysoką wydajność opadów atmosferycznych (74 mm). Było to zdarzenie wybitnie lokalne, związane z uformowaniem się pojedynczej komórki burzowej o ograniczonym zasięgu przestrzennym. Pomimo ekstremalnej intensywności opadu geomorfologiczne skutki w strefie wybrzeża klifowego ograniczone były jedynie do procesu spłukiwania na klifie zbudowanym z utworów gliniastych. Na tych stokach, w wyniku spływu powierzchniowego, powstały żłobki i bruzdy erozyjne, a u podnóża klifu uformowały się stożki spływowe. Nie były to jednakże formy rozległe, które doprowadziły do znacznego przemieszczania osadów (fot. 3). Na odcinkach klifowych zbudowanych z materiału piaszczystego większość wody opadowej uległa infiltracji. Jednakże bezpośrednio po tym opadzie nie wystąpiły ruchy masowe w postaci osuwisk czy zerw darniowych. W okresie poprzedzającym wystąpienie opisywanego ekstremalnego zdarzenia meteorologicznego opady były przeciętne pod względem wydajności: 2 sierpnia – 2,5 mm i 31 lipca – 7,5 mm. Jednakże lipiec 2014 r. był wyjątkowo suchy (27,8 mm). Przytoczone zdarzenie dobrze przedstawia sytuację, kiedy nie zawsze ekstremalne opady atmosferyczne w strefie wybrzeża klifowego generują ekstremalną erozję stokową.

http://rcin.org.pl



Fot. 2. Geomorfologiczne skutki ekstremalnego wezbrania sztormowego (612 cm) z dnia 7 grudnia 2013 r.
A – podcięcie abrazyjne, B – erozja plaży, C – ruchy masowe, zagrożenie dla infrastruktury (Kawcza Góra), D – erozja wykrotowa (fot. J. Tylkowski)
Geomorphological effects of an extreme (612 cm) storm surge on 7 December 2013
A – abrasive undercut, B – beach erosion, C – mass movements posing a threat to infrastructure (at Kawcza Góra), D – erosion associated with windthrown trees

http://rcin.org.pl

Fot. 3. Geomorfologiczne skutki ekstremalnego opadu atmosferycznego (74 mm) z dnia 3 sierpnia 2014 r. (fot. J. Tylkowski)
Geomorphological effects of extreme (74mm) rainfall falling on 3 August 2014

Podsumowanie

Dynamika cofania korony klifów na wyspie Wolin cechuje się względnie niskim tempem erozji w porównaniu do innych odcinków wybrzeża klifowego w Polsce (Subotowicz, 1982; Zawadzka-Kahlau, 1999). W badanym okresie średnie roczne tempo cofania korony klifu wyniosło 0,15 m (łącznie dla badanych 5 odcinków wybrzeża). Relatywnie małe zmiany geomorfologiczne w strefie wybrzeża klifowego wyspy Wolin potwierdzają także badania zmian ukształtowania terenu metodą skaningu laserowego (Dudzińska-Nowak, 2008; Kolander i inni, 2013). W XXI w. znacznie większa średnia roczna dynamika erozji klifów (>1 m) występowała w rejonie Ustki (Florek i inni, 2008, 2013), Jastrzębiej Góry czy Gdyni (Łęczyński i Kubowicz-Grajewska, 2013). Względnie niskie tempo abrazji wolińskich klifów wynika z aktualnej fazy ich stabilności morfogenetycznej, położeniu w głębi Zatoki Pomorskiej oraz przede wszystkim ze względu na specyficzne warunki hydrogeologiczne. Na wyspie Wolin wody podziemne odgrywają bardzo znikomą rolę morfogenetyczną, gdyż na klifie nie występuje znaczący wysięk wód podziemnych i nie istnieją z tego powodu szczególnie korzystne warunki dla wystąpienia osuwisk. Na innych odcinkach klifowych polskiego wybrzeża Bałtyku wody pod-

http://rcin.org.pl

ziemne mają bardzo istotne znaczenie morfogenetyczne, zwłaszcza w Jastrzębiej Górze (Kamiński i inni, 2012).

Wolińskie wybrzeże klifowe w badanym okresie znajdowało się w fazie stabilności morfogenetycznej, której przejawem był brak ekstremalnej erozji. Podczas wezbrań sztormowych abrazyjna działalność morza koncentrowała się głównie na degradacji wysuniętych, bardziej odpornych na niszczenie, ostróg gliniastych. W aktualnej fazie ewolucji brzegu klifowego, na wyspie Wolin występowała tendencja do wyrównania linii podstawy klifu (Kostrzewski i inni, 2015). Kolejnym etapem rozwoju brzegu klifowego będzie okres wzmożonej abrazji i cofanie korony klifu na odcinkach zbudowanych głównie z utworów piaszczystych. Linia brzegowa będzie bardziej urozmaicona, gdzie odcinki z dominacją utworów piaszczystych będą wcięte, a odcinki z dominacją utworów gliniastych będą wysunięte w formie ostróg (Subotowicz, 1976).

Rola czynników meteorologicznych (opady atmosferyczne, roztopy śnieżne) jest bardzo istotna w przemianach rzeźby klifów, aczkolwiek ich zasięg przestrzenny jest mniejszy niż abrazyjnych skutków wezbrań sztormowych. Występujące w obrębie klifów osuwiska mają niekiedy złożoną genezę (Winowski, 2008). Charakterystyczne jest częste współdziałanie przyczynowo-skutkowe procesu abrazji morskiej i procesów erozji stokowej, które są odległe w czasie. Podczas wezbrań sztormowych dochodzi do podcięcia abrazyjnego i osłabienia stabilności klifów. Abrazja morska jest wówczas czynnikiem inicjującym ruchy masowe, których intensyfikacja może zachodzić w terminie późniejszym, podczas wydajnych opadów atmosferycznych czy roztopów śnieżnych (Winowski, 2008).

Analiza ilościowych wartości i zmienności czasowej warunków hydrometeorologicznych w strefie wybrzeża wyspy Wolin ukazuje prawidłowości podobne jak w innych opracowaniach dotyczących wybrzeża południowego Bałtyku (Formela i Marsz, 2011; Miętus, 1996; Świątek, 2011; Wiśniewski i inni, 2009, 2011). Świadczy to o pewnej jednorodności przestrzennej, zwłaszcza warunków morskich w polskiej strefie brzegowej Bałtyku.

Relacje między uwarunkowaniami hydrometeorologicznymi a erozją wybrzeża morskiego nie są wprost proporcjonalne, nie cechują się zależnością liniową. Nie zawsze ekstremalnie wysokie wezbranie sztormowe i wydajne opady atmosferyczne generują ekstremalną erozję brzegu morskiego (Furmańczyk i inni, 2012; Tylkowski 2015). O dynamice erozji brzegu klifowego decyduje wiele innych uwarunkowań, które zaburzają prostą relację pomiędzy warunkami hydrometeorologicznymi a intensywnością erozji. Do najważniejszych czynników wpływających na dynamikę erozji wybrzeża morskiego zaliczyć można m.in.: warunki morfolitologiczne, ekspozycję stoku w kierunku podejścia fali morskiej, warunki jakościowe i ilościowe osadów w strefie plaży i płytkiego podbrzeża, dynamikę i frekwencję ekstremalnych zdarzeń hydrometeorologicznych w okresie poprzedzającym działalność człowieka, związaną m.in. z zabudową hydrotechniczną.

http://rcin.org.pl

Biorąc pod uwagę aktualną tendencję podnoszenia poziomu morza i zwiększającej się frekwencji ekstremalnych zdarzeń hydrometeorologicznych, należy spodziewać się w najbliższej przyszłości intensyfikacji erozji klifów w strefie brzegowej południowego Bałtyku. Wyniki opracowania mogą być przydatne do określenia funkcjonowania brzegu klifowego występującego zwłaszcza w mało odpornej na erozję strefie moren młodoglacjalnych, która jest charakterystyczna dla wybrzeża Bałtyku na odcinku od Estonii do Niemiec.

Piśmiennictwo

Borówka R.K., Gonera P., Kostrzewski A., Zwoliński Z., 1982, *Origin, age and paleogeographic significance of cover sands in the Wolin end moraine area, North-West Poland,* Quaestiones Geographicae, 8, s. 19–36.

Borówka R.K., Goslar T., Pazdur A., 1999, *Wolin End Moraine: age of glacitectonic structures in the light of lithostratigraphic data and radio-carbon dating,* [w:] R.K. Borówka, Z. Młynarczyk, A. Wojciechowski (red.), *Ewolucja geosystemów nadmorskich południowego Bałtyku,* Bogucki Wydawnictwo Naukowe, Poznań-Szczecin, s. 43–47.

Czernecki B., Miętus M., 2011, *Porównanie stosowanych klasyfikacji termicznych na przykładzie wybranych regionów Polski,* Przegląd Geofizyczny, LVI, 3–4, s. 201–233.

Dudzińska-Nowak J., 2008, *Określenie tendencji rozwojowych brzegu na podstawie badań teledetekcyjnych.,* Archiwum Fotogrametrii, Kartografii i Teledetekcji, 18, s. 99–110.

Florek W., Kaczmarzyk J., Majewski M., Olszak I.J., 2008, *Zmiany rzeźby klifu w rejonie Ustki jako efekt warunków litologicznych oraz procesów ekstremalnych i przeciętnych,* Landform Analysis, 7, s. 53–68.

Florek W., Kaczmarzyk J., Majewski M., Schiefelbein L., 2013, *Efektywność abrazji na wschód od Ustki,* [w:] A. Kostrzewski, Z. Zwoliński, M. Winowski (red.), *Geoekosystem wybrzeży morskich,* 2, UAM, Stacja Monitoringu Środowiska Przyrodniczego w Białej Górze, Poznań-Biała Góra, s. 36–39.

Formela K., Marsz A., 2011, *Zmienność liczby dni ze sztormem Nad Bałtykiem (1971–2009),* Prace i Studia Geograficzne UW, 47, s. 189–196.

Furmańczyk K., Dudzińska-Nowak J., Furmańczyk K., Paplińska-Swerpel B., Brzezowska N., 2012, *Erozja wydmy w rejonie Dziwnowa jako rezultat znaczących sztormów,* [w:] W. Florek (red.), *Geologia i geomorfologia pobrzeża i południowego Bałtyku,* 9, Wydawnictwo Naukowe Akademii Pomorskiej w Słupsku, Słupsk, s. 9–18.

Harff J., Lemke W., Lampe R., Lüth F., Lübke H., Meyer M., Tauber F., Schmölcke U., 2007, *The Baltic Sea coast – A model of interrelations among geosphere, climate, and anthroposphere*, [w:] J. Harff, W.W. Hay, D.M. Tetzlaff (red.), *Coastline Changes: Interrelation of Climate and Geological Processes,* Geological Society of America, Special Paper, 426, s. 1–10.

Hojan M., 2009, *Aeolian processes on the cliffs of Wolin Island,* Quaestiones Geographicae, 28A, 2, s. 41–46.

http://rcin.org.pl

Hojan M., Więcław M., 2013, *Porównanie warunków meteorologicznych na stacji Świnoujście i Ustka oraz próba określenia ich wpływu na procesy eoliczne na wybrzeżach klifowych południowego Bałtyku,* [w:] A. Kostrzewski, Z. Zwoliński, M. Winowski (red.), *Geoekosystem wybrzeży morskich,* 2, UAM, Stacja Monitoringu Środowiska Przyrodniczego w Białej Górze, Poznań-Biała Góra, s. 40–43.

Hojan M., Więcław M., 2014, *Influence of meteorological conditions on aeolian processes along the Polish cliff coast,* Baltica, 27, s. 63–74.

Hünicke B., Luterbacher J., Pauling A., Zorita E., 2008, *Regional differences in winter sea-level variations in the Baltic Sea for the past 200 years,* Tellus, 60A, 2, s. 384–393.

Jania J., Zwoliński Z., 2011, *Ekstremalne zdarzenia meteorologiczne, hydrologiczne i geomorfologiczne w Polsce,* Landform Analysis, 15, s. 51–64.

Kamiński M., Krawczyk M., Zientara P., 2012*, Rozpoznanie budowy geologicznej klifu w Jastrzębiej Górze metodą tomografii elektrooporowej pod kątem zagrożenia osuwiskowego,* Biuletyn Państwowego Instytutu Geologicznego, 452, s. 119–130.

Kolander R., Morche D., Bimböse M., 2013, *Quantification of moraine cliff coast erosion on Wolin Island (Baltic Sea, Northwest Poland),* Baltica, 26, 1, s. 37–44.

Kondracki J., 2000, *Geografia regionalna Polski,* Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa.

Kostrzewski A., 1997, *Geomorfologiczne skutki gwałtownego sztormu na wybrzeżu klifowym wyspy Wolin (jesień 1995),* [w:] A. Kostrzewski, B. Jakuczun (red.), *Ochrona środowiska przyrodniczego WPN,* Woliński Park Narodowy, Międzyzdroje, s. 55–56.

Kostrzewski A., Krygowski B., 1967, *Zmienność glin morenowych Polski północno-zachodniej w zakresie uziarnienia i obróbki,* Zeszyty Naukowe UAM, Geografia, 7, Poznań, s. 51–58.

Kostrzewski A., Zwoliński Z., 1988, *Morphodynamics of the cliffed coast, Wolin Island,* Geographia Polonica, 55, s. 69–81.

Kostrzewski A., Zwoliński Z., 1998, *Wpływ sztormów na rzeźbę wybrzeża klifowego wyspy Wolin,* [w:] K. Pękala (red.), *Główne kierunki badań geomorfologicznych w Polsce. Stan aktualny i perspektywy,* IV Zjazd Geomorfologów Polskich, UMCS, Lublin, s. 129–132.

Kostrzewski A., Zwoliński Z., Winowski M., Tylkowski J., Samołyk M., 2015, *Cliff top recession rate and cliff hazards for the sea coast of Wolin Island (Southern Baltic),* Baltica, 28, 2, s. 109–120.

Krygowski B., 1959, *O związkach rzeźby dzisiejszej powierzchni ze strukturą podłoża na Pomorzu Szczecińskim,* Zeszyty Naukowe UAM, Geografia, 2, s. 69–86.

Łabuz A., 2012, *Klify nadmorskie na wybrzeżu Bałtyku, Monitoring gatunków i siedlisk przyrodniczych ze szczególnym uwzględnieniem specjalnych obszarów ochrony siedlisk Natura 2000*, http://www.gios.gov.pl/siedliska/pdf/wyniki_monitoringu_siedlisk_2009_2011_1230.pdf

Łęczyński L., Kubowicz-Grajewska A., 2013, *Rola ekstremalnych wezbrań sztormowych w abrazji brzegu klifowego na przykładzie Gdyni Orłowa*, [w:] A. Kostrzewski, Z. Zwoliński, M. Winowski (red.), *Geoekosystem wybrzeży morskich,* 2, UAM, Stacja Monitoringu Środowiska Przyrodniczego w Białej Górze, Poznań-Biała Góra, s. 69–71.

http://rcin.org.pl

Miętus M., 1996, *Zmienność temperatury i opadów w rejonie polskiego wybrzeża Morza Bałtyckiego i jej spodziewany przebieg do roku 2030,* Materiały badawcze IMiGW, Seria Meteorologia, 26, Gdynia.

Milne G.A., Gehrels W.R., Hughes C.W., Tamisiea M., 2009, *Identifying the causes of sea level change,* Nature Geoscience, 2, s. 471–478.

Piotrowska H., 1994, *Aktywna ochrona zasobów roślinnych Wolińskiego Parku Narodowego w świetle naturalnej i antropogenicznej historii lasów wyspy Wolin*, Klify, 1, WPN, s. 63–77.

Prusinkiewicz Z., 1971, *Naspy przyklifowe – nowy typ gleb morskiego pobrzeża,* Zeszyty Naukowe UMK, Geografia, 26, 8, s. 133–157.

Richter A., Groh A., Dietrich R., 2012, *Geodetic observation of sea-level change and crustal deformation in the Baltic Sea region,* Physics and Chemistry of the Earth, 53/54, s. 43–53.

Subotowicz W., 1976, *Makro- i mikrofazy rozwoju brzegów klifowych wybrzeża polskiego,* Przegląd Geologiczny, 1, s. 10–14.

Subotowicz W., 1982. *Litodynamika brzegów klifowych wybrzeża Polski,* Gdańskie Towarzystwo Naukowe, Ossolineum, Wrocław.

Świątek M., 2011, *Precipitation changes on the Polish coast of the Baltic Sea (1954–2003) due to changes in intensity of westerlies over Europe,* Climate Research, 48, s. 23–29.

Tylkowski J., 2012, *Zmienność czasowa i przestrzenna warunków termiczno-opadowych strefy brzegowej Zatoki Pomorskiej,* [w:] A. Kostrzewski i J. Szpikowski (red.), *Zintegrowany Monitoring Środowiska Przyrodniczego. Funkcjonowanie geoekosystemów w różnych strefach krajobrazowych*, 29, Biblioteka Monitoringu Środowiska, SG UAM, s. 209–219.

Tylkowski J., 2013, *Temporal and spatial variability of air temperature and precipitation at the Polish coastal zone of the southern Baltic Sea*, Baltica, 26, 1, s. 83–94.

Tylkowski J., 2015, *Conditions and rate of extreme dunes abrasion at the Pomeranian Bay*, Landform Analysis, 27, s. 33–42.

Tylkowski J., Kolander R., 2014, *Potential hydrometeorological threshold values of the coastal hazard – an example from the Polish Southern Baltic coast,* Russian Meteorology and Hydrology, 39, 9, s. 614–619.

Tylkowski J., Samołyk M., 2012, *Wpływ ekstremalnych warunków śnieżno-lodowych na dynamikę stokowych procesów morfogenetycznych brzegu klifowego wyspy Wolin na odcinku Biała Góra-Grodno,* [w:] W. Florek (red.), *Geologia i geomorfologia pobrzeża i południowego Bałtyku,* 9, Wydawnictwo Naukowe Akademii Pomorskiej w Słupsku, Słupsk, s. 73–87.

Winowski M., 2008, *Geomorfologiczne skutki tajania pokrywy śniegu na wybrzeżu klifowym wyspy Wolin,* Landform Analysis, 9, s. 222–225.

Winowski M., 2015, *Aktywność procesów osuwiskowych na wybrzeżu klifowym wyspy Wolin w warunkach oddziaływania zdarzeń hydrometeorologicznych o wysokim potencjale morfogenetycznym (Zatoka Pomorska – Bałtyk Południowy),* Landform Analysis, 28, s. 87–102.

http://rcin.org.pl

Wiśniewski B., Wolski T., 2011, *Physical aspects of extreme storm surges and falls on the Polish coast,* Oceanologia, 53 (1-TI), s. 373–390.

Wiśniewski B., Wolski T., Kowalewska-Kalkowska H., Cyberski J., 2009, *Extreme water level fluctuations along the Polish coast,* Geographia Polonica, 82, 1, s. 99–107.

Wiśniewski B., Wolski T., Musielak S., 2011, *A long-term trend and temporal fluctuations of the sea level at the Polish Baltic coast,* Oceanological and Hydrobiological Studies, 40, 2, s. 96–107.

Zawadzka-Kahlau E., 1999, *Trends in South Baltic coast development during the last hundred years,* Peribalticum, 7, s. 115–136.

Summary

The work described here has sought to identify the variable hydro-meteorological conditions (across hydrological years 2009–2014) determining cliff-erosion dynamics along the coast of Poland's Wolin Island. Daily data from the tide-gauge station in Świnoujście allowed for the presentation of variability in sea level, with data obtained from the Institute of Meteorology and Water Management. Also presented are annual, semi-annual and monthly characterisations of elements of the weather capable of exerting the greatest erosive impact on cliffs, i.e. precipitation and snow cover, as well as thermal and anemometric conditions. The daily meteorological data derived from the author's own measurements, from the meteorological station in Biała Góra situated on the Wolin cliff top. The potential erosive hydro-meteorological conditions were set against annual measurements of cliff-top recession rates, the research into this involving geodetic RTK GPS measurements on 5 test sections representing different morpholithological conditions. The hydrological years 2009-2014 experienced very significant hydro--meteorological events potentially favouring the occurrence of erosion processes (mass movements and aeolian erosion). The occurrence of potentially erosive hydro-meteorological events is referenced against cliff-top recession rates. In particular, this study presents the geomorphological effects of two extreme hydro--meteorological occurrences. i.e. Hurricane Xavier of December 2013 (maximum sea level 612 cm) and a two-hour extreme (74mm) precipitation event occurring in August 2014 year. The specific nature of the cause-effect relationship between hydro-meteorological conditions and cliff erosion on the cliff coast of Wolin Island is also described, though these results are also capable of being applied to other cliff sections of the Southern Baltic coastal zone.

The relationships between hydro-meteorological conditions and coastal erosion are not seen to be directly proportional, but are non-linear. It is not always the extreme storm surges and high levels of precipitation that generate extreme erosion along the shore. Rather, the dynamics of cliff-edge erosion are found to be determined by a number of other determinants obscuring the simple relation-

http://rcin.org.pl

ship between hydro-meteorological conditions and intensity of erosion. The most important factors influencing the dynamics of coastal erosion are morphological conditions, slope aspect vis-à-vis approaching waves, qualitative and quantitative conditions of sediment on beaches and in the shallows, the dynamics and frequency of extreme hydro-meteorological events in the preceding period, and human activity relating to hydrotechnical installations.

Given the current upward trend for sea level and the increasing frequency of extreme hydro-meteorological events, the Southern Baltic coastal zone is expected to be subject to intensified cliff erosion in the near future. In this context, the results presented here might also gain wider application in studying other parts of the Baltic coastal zone with a morainic cliff coastline, especially along the stretch between Estonia and Germany.

[Wpłynęło: luty; poprawiono: kwiecień 2017]

http://rcin.org.pl

http://rcin.org.pl