

Identyfikacja prądów rozrywających w strefie brzegowej południowego Bałtyku – modelowanie i obserwacje w naturze

Mgr inż. Jan Schönhofer, dr hab. inż. Marek Szmytkiewicz
Instytut Budownictwa Wodnego PAN w Gdańsku

W okresie od drugiej połowy 2010 roku do marca 2013 roku w Instytucie Budownictwa Wodnego PAN w Gdańsku realizowany był projekt badawczy dotyczący rozpoznania i matematycznego opisu prądów rozrywających w wielorewowej strefie brzegowej południowego Bałtyku. Realizacja celu projektu składała się z dwóch zasadniczych elementów. Pierwszy z nich był związany z pomiarami prądów strefy brzegowej morza ukierunkowanych na wychwycenie i wyizolowanie prądów rozrywających, określeniem ich intensywności, miejsc i czasu występowania itd. Drugim równorzędnym elementem projektu była rozbudowa modelu teoretycznego, jego weryfikacja oraz zaadaptowanie licencyjnego pakietu numerycznego DELFT3D do opisu tego rodzaju cyrkulacji prądowych. Były to pierwsze wykonywane na tak szeroką skalę tego rodzaju pomiary w Polsce.

Celem artykułu jest przedstawienie podstawowych rezultatów wynikających zarówno z przeprowadzonych pomiarów, jak i wykonanych obliczeń.

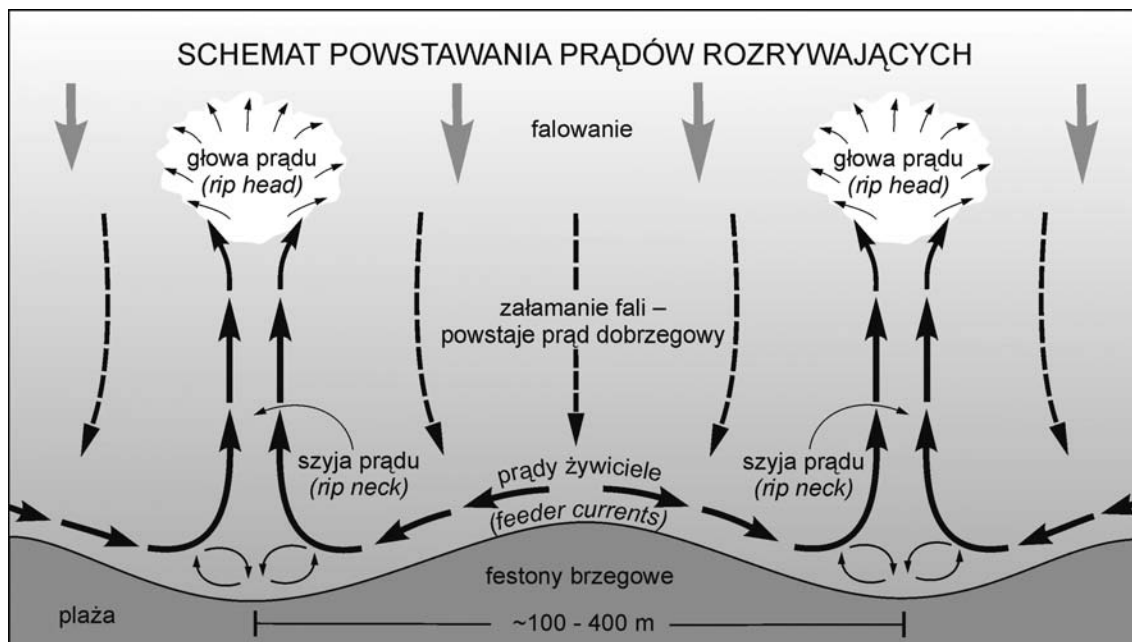
OPIS PRĄDÓW ROZRYWAJĄCYCH

Prąd rozrywający to wąski, w przybliżeniu prostopadły do brzegu strumień, który wynosi wodę ze strefy przyboju poprzez linię załamania fal w kierunku otwartego morza (rys. 1.). W określonych warunkach skłonu brzegowego i falowania prądy te mogą stać się głównym czynnikiem odpływu, choć zazwy-

czaj rolę tę spełnia prąd powrotny. Termin prądy rozrywające po raz pierwszy użyto przez Sheparda [6], kiedy opisywał różnice między prądami odprowadzającymi wodę ze strefy przyboju w całej rozciągłości brzegu (prądami powrotnymi) a wąskimi, odizolowanymi strumieniami, często ograniczonymi tylko do górnych warstw słupa wody (prądami rozrywającymi).

Prądy rozrywające są generowane głównie przez fale podchodzące, w przybliżeniu prostopadle do brzegu i są efektem zbiegania się mas wodnych w strefie przyboju w wyniku tzw. procesu „pompowania wody” przez załamujące się fale. Obecność rewu utrudnia natychmiastowy odpływ nagromadzonej wody ze strefy przyboju, co w efekcie prowadzi do podnoszenia się poziomu wody w tym obszarze. W rezultacie rozpoczyna się generacja wzdłużbrzegowego przepływu pomiędzy brzegiem a rewą, który następnie jest odprowadzany w głąb morza w obniżeniach lub przerwach między rewami. Końcowym efektem tego procesu jest powstawanie stosunkowo silnych, rozmieszczonych w pewnych losowych odstępach wzdłuż brzegu obszarów odpływu wody ze strefy przyboju w głąb morza. Przy ukośnym podchodzeniu fali do brzegu prądy te powodują jedynie pewne meandrowanie przepływów wzdłużbrzegowych, natomiast przy zbliżonym do prostopadłego kierunku podchodzenia fali następuje wyraźny odpływ wody w kierunku morza mający kształt strugi.

W pełniejszym opisie prądów rozrywających wyszczególnia się trzy podstawowe elementy składowe (rys. 1):



Rys. 1. Kształtowanie się kanałów odpływowych prądów rozrywających

- 1) obszar, gdzie dwa prądy wzdłużbrzożewy o lokalnym zasięgu i przeciwnych zwrotach spotykają się (ang. *feeder currents*) – prądy żywiciela,
- 2) kanał odpływowy dla wody, który przekracza linię załamania (ang. *rip neck*) – szyja prądu,
- 3) strefa, w której prąd rozrywający wytraca prędkość, rozplywa się promieniście i zanika (ang. *rip head*) – głowa prądu.

Pierwsze obserwacje Sheparda pokazywały, że prądy rozrywające stanowią swoiste kanały odpływowe nadmiaru wody docierającej do brzożewy i spiętrzającej się przy plaży, w wyniku załamania się fal. Dlatego też uznano za oczywiste, że musi istnieć silny związek pomiędzy wielkością, liczbą oraz miejscem występowania tych prądów a warunkami falowymi w strefie brzożewy morza.

Od czasów Sheparda badacze starają się opisać te zależności. Zauważono, że prądy rozrywające są zlokalizowane w zatokach sierpów plażowych. Nie występują podczas bardzo małego falowania, są liczniejsze i nieco większe w warunkach słabego i umiarkowanego rozkołysu, natomiast wzrost falowania powodujący wzrost ilości wody wpompowanej do brzożewy pociąga za sobą ich zwiększenie i wzmoczoną aktywność. Zwiększanie prądów rozrywających powoduje, że niektóre z nich zanikają, inne zaś migrują wzdłuż brzożewy jeszcze bardziej, przybierając na sile. Gdy warunki falowe dochodzą do sztormowych, występują rozległe silne prądy rozrywające w dużych odstępach wzdłuż brzożewy. Co więcej, ich prędkości są wprost proporcjonalne do wysokości falowania, a odpowiedź ze strony prądów na zmianę falowania jest niemal natychmiastowa. Zmiany w wysokości fal nie wpływają tak bardzo na kształt prądów rozrywających, ale na ich natężenie, co z kolei znacząco wpływa na przebudowę kształtu linii brzożewy.

Cook [2] prowadził badania na plaży Redondo w Kalifornii (USA) mające głównie określić rolę prądów rozrywających w strukturze przybrzożewnego transportu osadów. Zauważył, że na badanym odcinku brzożewy stacjonarne kanały prądów rozrywających

pojawiają się głównie tylko podczas odpływów oraz niskich stanów wody. Tłumaczył to faktem, że podczas odpływu woda wypełnia istniejące kanały prądów rozrywających, a podczas warunków sztormowych kanały te stanowią uprzywilejowane miejsca odprowadzania spiętrzonej u brzożewy wody w głąb morza.

Cook stwierdził, że dno kanałów odprowadzających prądy rozrywające, zbudowane z grubego piasku ułożonego w wyraźne, duże zmarszczki (*mega-rippled sand*) oznacza, że transport wleczony nie wykracza poza linię załamania. W odmorskiej części strefy załamania prądy rozrywające przestają sięgać dna i dlatego też tylko transport osadów zawieszonych sięga poza tę strefę. Większość osadów jest niesiona podczas krótkiego okresu, kiedy prędkości strumieni są wysokie.

Prądy rozrywające rozciągają się nawet do 1500 metrów od linii brzożewy i ma to miejsce w przypadku brzożewy wysokoenergetycznych, tj. takich, gdzie ze względu na strome nachylenie dna fale załamują się stosunkowo blisko linii brzożewy.

Short [7] opracował dane z ponad 3500 zmierzonych na plaży Narrabeen (Australia) prądów rozrywających z okresu 19 miesięcy. Jego badania pozwoliły m. in. na ustalenie, że odległości pomiędzy sąsiednimi prądami zwiększają się, gdy wzrasta falowanie i odwrotnie, odległości te maleją, kiedy zmniejsza się intensywność falowania. Charakterystyka sąsiednich prądów rozrywających zależy nie tylko od warunków falowych, ale także od kierunku i szybkości zmian tych warunków. Short zauważył również, że na plażach o profilu w pełni dyssypacyjnym prądy rozrywające zazwyczaj nie istnieją.

Na rozmieszczenie prądów w strefie brzożewy znaczny wpływ ma układ batymetryczny dna. Jednak podstawowym warunkiem ich powstania jest załamywanie się fal w strefie przybrzożewy. Wyróżnić przy tym można następujące etapy generacji prądów rozrywających w strefie brzożewy:

- fale podchodzące do brzożewy charakteryzują się wzdłużbrzożewą zmiennością wysokości fali, co w efekcie powoduje także silniejsze lub słabsze załamywanie się fali,

- w trakcie załamывania się fal woda jest pompowana ponad rewami w kierunku brzegu i nie ma możliwości natychmiastowego odpływu w kierunku morza, co prowadzi do niewielkiego podniesienia zwierciadła wody w tym obszarze,
- różne są także średnie wzniesienia wody (*set-up*) w strefie przyboju, ze względu na nierównomierność procesu załamывania,
- wywołana zmiana średniego poziomu morza generuje quasi ustalony gradient ciśnienia, który z kolei odpowiada za powstawanie komórek cyrkulacyjnych,
- przy prawie prostopadłym podchodzeniu fali do brzegu nadmiar wody zgromadzony w strefie przyboju zaczyna odpływać w kierunku morza poprzez lokalne obniżenia w rewach,
- powracająca woda rozszerza i pogłębia obniżenia w rewach.

Z powyższego opisu widać, że wzdłużbrzegowy gradient ciśnienia wody wynikający z nierównomiernego rozkładu zwierciadła wody w strefie przyboju jest czynnikiem inicjującym generację prądów rozrywających. Powstały nierównomierny rozkład zwierciadła wody może być spowodowany czterema niezależnymi czynnikami:

- wzdłużbrzegową zmiennością średniego wzniesienia zwierciadła wody, tzw. *set-up*, związaną ze zmianą wysokości falowania wzdłuż brzegu, a tym samym dalszym lub bliższym brzegu załamывaniem się fal,
- pompowaniem ponad rewami wody w kierunku brzegu, która nie ma możliwości całkowitego odpłynięcia w kierunku morza w okresie pojedynczego okresu fali, co prowadzi do dodatkowego, pulsacyjnego podnoszenia zwierciadła wody w tym obszarze,
- powstawaniem, w wyniku superpozycji z falami wiatrowymi, stojących fal krawędziowych, co w efekcie prowadzi do tego, że we wszystkich strzałkach tych fal wzniesienia zwierciadła wody będą wyższe niż w węzłach,

- plywami morskimi, które w warunkach odpływu, gdy maleją głębokości w strefie brzegowej, powodują wzrost prędkości prądów rozrywających.

W rezultacie oddziaływania jednego lub kilku z tych czynników w strefie przyboju może pojawić się wyraźne wzdłużbrzegowe nachylenie zwierciadła wody, które w efekcie będzie prowadziło do generacji przepływu wody w postaci płynącej "rzeki". Woda ta jest odprowadzana do morza w postaci prądu rozrywającego. Z reguły taki odpływ wody ma miejsce w lokalnych obniżeniach lub przerwach w rewach.

Dla każdego konkretnego odcinka brzegu morskiego dynamika tych prądów może być całkowicie odmienna. Wywoływane na tych odcinkach prądy rozrywające mogą różnić się zarówno wartościami prędkości, odstępami pomiędzy kolejnymi miejscami wypływu wody do morza, jak i znaczną zmiennością w czasie.

Wieloletnie obserwacje zachowania się tych prądów u wybrzeży amerykańskich (zob. raporty NOAA National Oceanic & Atmospheric Administration) pokazują, że w krótkim czasie, rzędu kilku minut, ich prędkości mogą wzrosnąć nawet wielokrotnie, aby następnie zmaleć do zera. Natomiast niektóre brzegi charakteryzują się z kolei ciągłym występowaniem prądów rozrywających w tych samych miejscach. Ma to miejsce głównie wtedy, gdy fale załamują się także ciągle w tych samych obszarach, tj. np. na podwodnych rafach, czy też podwodnych konstrukcjach, np. progach podwodnych. Dla brzegów charakteryzujących się zafalowaniem linii brzegowej w postaci tzw. „*cusps*” można spodziewać się występowania prądów rozrywających w środkowych obszarach kolejnych zatoczek.

Prądy rozrywające mogą także powstawać jako efekt współoddziaływania pomiędzy falowaniem a prądami, nawet przy całkowitej nieobecności rew oraz bez wpływu brzegu i dna na formowanie się tego rodzaju odpływów wody ze strefy brzegowej. Wzdłuż otwartych brzegów bez obecności rew prądy rozrywające są generowane przez załamujące się stale w tych samych lokalizacjach fale odpowiednio dalej i bliżej brzegu. Generalnie rzecz biorąc prędkości prądów rozrywających wzrastają, kiedy załamania fali występują stosunkowo blisko brzegu.

Tabl. 1. Charakterystyczne, pomierzone wartości prądów rozrywających

Miejsce pomiarów	U_r [m/s]	$U_{r, \max}$ [m/s]	L_r [m]	B_r [m]	h_r [m]	h_b [m]	H_s [m]	T_p [s]	D_{50} [mm]
Skallingen (Dania 1997)	0,30	1,7	90	150	1,25	1,0	0,8	8,0	0,25
Palm Beach (Australia 1999)	0,40	2,0	200	60	1,80	1,0	0,8	10,0	0,35
Muriwai (Nowa Zelandia 2001)	0,65	2,0	500	150	1,50	1,0	1,5	14,0	0,25
Moreton Island (Australia 2004)	0,40	1,0	300	35	1,40	1,0	0,5	10,0	0,20
Torrey Pines (USA 2005)	0,20	1,0	300	100	1,25	1,0	0,5	12,0	0,10
Monterey (USA 2004)	0,30	2,0	125	60	1,50	1,0	1,5	12,0	0,35
Sea Grove (USA 1972)	0,35	1,3	60	30	0,80	0,3	0,5	8,0	0,3

- U_r – średnia pomierzona wartość prędkości prądu rozrywającego,
 $U_{r, \max}$ – maksymalna pomierzona wartość prędkości prądu rozrywającego,
 L_r – odstęp pomiędzy kolejnymi lokalizacjami prądów rozrywających,
 B_r – szerokość strumienia prądu rozrywającego,
 h_r – głębokość w kanale odprowadzającym prąd rozrywający,
 h_b – głębokość w obszarze sąsiadującym z kanałem odprowadzającym prąd rozrywający,
 H_s – wysokość fali znacznej,
 T_p – okres piktu spektrum falowego,
 D_{50} – charakterystyczna średnica (mediana) materiału dennego.

Przy brzegach zabudowanych progami podwodnymi można spodziewać się stałego występowania prądów rozrywających w miejscach występowania przerw między progami. Przy brzegach niezabudowanych obserwuje się występowanie prądów rozrywających przez wiele dni, a nawet miesięcy w tym samych miejscach. Jednak prądy rozrywające mogą przemieszczać się także wzdłuż brzegu. Mogą być formami efemerycznymi, tj. bardzo szybko pojawiającymi się, trwającymi kilka godzin lub dni, a następnie znikającymi.

MacMahan i inni [4] przeanalizowali wyniki pomiarów prądów rozrywających zrealizowanych m. in. w Stanach Zjednoczonych, Australii, Nowej Zelandii, Izraelu i Danii. Wyniki tych analiz zamieszczono w tabl. 1.

Z tabl. 1 wynika, że średnie pomierzone prędkości prądów rozrywających były stosunkowo małe, rzędu $O(0,3\text{ m/s})$, natomiast maksymalne rzędu $O(2,0\text{ m/s})$. Odległości pomiędzy sąsiednimi kanałami odprowadzającymi wodę ze strefy przyboju zawarte były w bardzo szerokich granicach od 60 m do 300 m, natomiast różnice pomiędzy głębokościami w kanałach odpływowych a głębokościami nad sąsiadującymi rewami były stosunkowo małe, rzędu $O(0,4\text{ m})$.

POMIARY

Ze względu na zmienne, tak w czasie, jak i w przestrzeni, miejsca lokalizacji obszarów odpływu wody ustawienie prądomierzy w stałych wybranych punktach strefy brzegowej nie gwarantuje, że w warunkach sztormowych w tych miejscach będą zlokalizowane obszary generacji prądów rozrywających. Dlatego też w większości wykonywanych pomiarów w warunkach naturalnych wykorzystuje się różnego rodzaju pływaki pozwalające na określenie przestrzennej struktury prądów w strefie przyboju.

W tego rodzaju „lagrane”owskich” pomiarach stosuje się różne techniki określania pozycji przemieszczających się pływaków. Na przykład, Shepard używał powierzchniowych i zanurzonych pływaków, których pozycje były namierzane kompasami zainstalowanymi na łodziach i brzegu. Z kolei Sasaki i Horikawa [5] do namierzania pływaków wykorzystywali zdjęcia lotnicze wykonywane z pokładu balonu. W latach siedemdziesiątych w obserwacjach zaczęto wykorzystywać technikę video. Instalowano kamery na wieżach, a nawet balonach zakotwiczanych na wysokościach od 120 do 200 m. Jednak większość badaczy używała teodolitów do określania pozycji przemieszczających się pływaków. Czasami, zamiast pływaków, zob. np. Brander [1], stosowano barwniki. W drugiej połowie lat dziewięćdziesiątych zaczęły pojawiać się nowe technologie pozwalające na ciągły pomiar dużych obszarów wybrzeży. W tym celu wykorzystuje się specjalnie wykalibrowane radary naziemne, zdjęcia lotnicze i satelitarne oraz sonary, tzw. *sector-scanning acoustic Doppler sonar* montowane na dalbach i skierowane (patrzące) w kierunku strefy przyboju. Rejestrowane w pamięciach komputerów obrazy strefy brzegowej analizowane są następnie przy użyciu specjalistycznego oprogramowania, pozwalają stosunkowo dobrze określić miejsca występowania, intensywność oraz zasięg prądów rozrywających. Jednak w dalszym ciągu większość pomiarów, głównie ze względu na redukcję kosztów, jest wykonywana z wykorzystaniem pływaków (dryfterów). Różnica polega

tylko na tym, że współcześnie do określania pozycji pływaków używa się odbiorników GPS (*Global Positioning System*), które zapewniają dokładność pomiarów rzędu kilku metrów, a przy dodatkowym wykorzystaniu tzw. stacji bazowych (referencyjnych) do wyznaczania korekty różnicowej dokładność określania pozycji można zwiększyć nawet do kilku centymetrów.

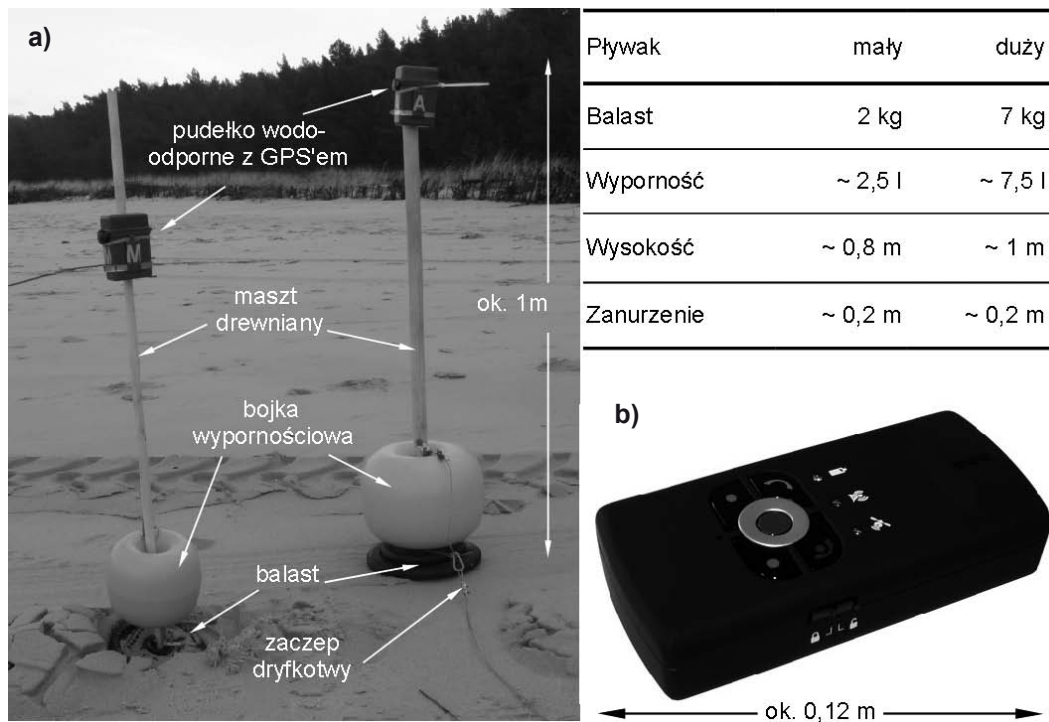
W pomiarach z użyciem pływaków największy problem stwarza sama strefa przyboju. Każdy pływak, który znajdzie się w zasięgu załamujących się fal będzie miał tendencję do przemieszczania się na ich grzbietach w kierunku brzegu, czyli będzie on pokazywał prędkość fazową fali, a nie prędkość ruchu cząstek wody. Drugi problem związany jest z szybko zmieniającą się głębokością w strefie przyboju od obszarów o stosunkowo dużej głębokości do rejonów położonych w sąsiedztwie brzegu, gdzie woda występuje tylko w fazie nabiegania fali na brzeg. Oznacza to, że pływak powinien spełniać sprzeczne wymagania, czyli mieć znaczny opór w głębszej wodzie i zdolność do poruszania się w płytkim akwenie, tj. mieć niewielkie zanurzenie.

Konstrukcja pływaków

Na potrzeby realizacji pomiarów prądów rozrywających zaprojektowano i zbudowano pływaki z odbiornikami GPS. Przy ich projektowaniu przyjęto następujące założenia:

- zanurzenie pływaka poniżej 25 cm – należało spodziewać się, że prądy rozrywające w silnie dyssypacyjnej strefie brzegowej południowego Bałtyku powstawać będą w najbliższym sąsiedztwie linii brzegowej na głębokościach rzędu 0,5 m,
- niska cena – po rozważeniu różnych opcji podjęto decyzję budowy pływaków z gotowych podzespołów elektronicznych,
- możliwość przesyłania danych pomiarowych (współrzędne i czas) bezpośrednio do serwera Instytutu, tak, aby ewentualne zaginięcie pływaka nie skutkowało utratą danych,
- pływaki powinny być urządzeniami autonomicznymi, niezależnymi od infrastruktury nabrzeżnej.

Konstrukcję pływaka, tzw. „dużego” i „małego” pokazano na rys. 2. Każdy składa się z pięciu głównych elementów, tj.: balastu wykonanego z kupionych obciążników do sztang gimnastycznych, boi wypornościowej kupionej w sklepie żeglarskim, masztu drewnianego mającego zapewnić jak najlepszy odbiór sygnałów GPS oraz pudełka wodoodpornego na telefon komórkowy wraz ze zdalnym odbiornikiem GPS. Jako odbiornik GPS wykorzystano istniejące urządzenia do automatycznego monitorowania spedycji drogowej (floty samochodów TIR). Odbiorniki tego rodzaju pozwalają na rejestrowanie pozycji z częstotliwością do 1 Hz. Do odbiornika GPS dodatkowo wmontowano moduł telefonu komórkowego, który umożliwiał zdalne programowanie urządzenia i, co najważniejsze, poprzez tzw. protokół GPRS przesyłanie co 10 minut zgromadzonych danych na serwer Instytutu. Taka konfiguracja urządzenia zapewniała prowadzenie względnie precyzyjnych obserwacji położenia pływaków, gwarantowała bezpieczeństwo danych pomiarowych, a w razie utraty pływaka możliwość jego odnalezienia nawet w ciągu kilku dni.



Rys. 2. Konstrukcja pływaka małego i dużego
a) zdjęcie pływaków na plaży, b) odbiornik GPS wraz z modułem komunikacji GPRS

Podczas budowy pływaki były wielokrotnie kalibrowane i przebudowywane. Przeszły także wiele badań. Między innymi przeprowadzono obserwacje bezwładności pływaków. W tym celu były one wrzucane do kanału przepływowego i mierzono czasy, po których pływaki osiągały prędkości równe prędkości płynącej wody w kanale. Na przykład, przy ustalonym przepływie wody o prędkości 1,5 m/s wrzucone pływaki osiągały tę prędkość po czasie $1 \div 2$ s.

Sprawdzono także dokładność pozycji podawanych przez odbiorniki GPS. W tym celu wyznaczono krzyż o ramionach długości 20 m każdy skierowanych w cztery strony świata i porównywano odległości między wierzchołkami tego krzyża wyznaczone z odczytów współrzędnych podawanych przez odbiorniki GPS z rzeczywistymi odległościami. Stwierdzono, że dokładność wyników zależy od liczby satelitów „widzianych” przez odbiorniki. W typowych warunkach, kiedy liczba satelitów oscylowała od 7 do 11 wyniki były zadowalające, błędy nie przekraczały 10%. Natomiast w sytuacjach, gdy liczba widocznych satelitów spadała do $3 \div 4$, błędy szybko narastały. Dlatego przy zbieraniu danych pomiarowych obok rejestrowanych współrzędnych kolejnych położań pływaków i czasu zapisywano także liczbę „widzianych” przez odbiorniki GPS satelitów. Opracowany program numeryczny pozwalał na automatyczne odrzucanie danych pomiarowych, dla których liczba widocznych satelitów była mniejsza od 7 z jednoczesnym zapisem w gromadzonych zbiorach pomiarowych informacji o tego rodzaju zdarzeniu. W trakcie rzeczywistych pomiarów w strefie brzegowej morza w rejonie Lubiatowa, sytuacje, kiedy liczba widocznych satelitów była niewystarczająca, występowały niezwykle rzadko.

Pierwsze próby z zastosowaniem pływaków w warunkach sztormowych wykazały, że w momencie, kiedy znalazły się one w sąsiedztwie grzbietów załamujących się fal, przemieszczały się one szybko w kierunku brzegu, podobnie jak żeglarze ślizga-

jący się (*surfujący*) na deskach unoszonych przez załamujące się fale. W takich warunkach pływaki wykazywały prędkości przemieszczania się fal w kierunku brzegu, a nie prędkości powierzchniowych prądów występujących w strefie przyboju. Ponadto były one wówczas względnie szybko wyrzucane na brzeg przez łamiące się fale. Problem ten rozwiązano przez zamontowanie dryfkotew, zbudowanych z metalowych puszek na półmetrowych linkach. Pływaki wyposażone w tego rodzaju dryfkotwy były znacznie mniej podatne na wchodzenie w ślizg na grzbietach załamujących się fal, szczególnie przy typowych dla strefy brzegowej południowego Bałtyku załamań rodzaju spływowego.

Przebieg pomiarów

Pomiary cyrkulacji prądowych z wykorzystaniem pływaków były wykonywane w różnych warunkach sztormowych, tj. w jego początkowej fazie, w czasie w pełni rozwiniętego sztormu oraz w okresie jego zanikania, kiedy w miejsce fal wiatrowych zaczynały występować fale rozkołysu. Pomiary były realizowane w zespołach dwuosobowych. Ze względu bezpieczeństwa osoby wykonujące pomiary powiązane były liną bezpieczeństwa o długości około $80 \div 100$ m oraz ubrane w kombinezony nurkowe, które dodatkowo chroniły ich przed zimnem. Z reguły pojedynczy pomiar był wykonywany przy jednoczesnym użyciu dwóch pływaków. Jeden z członków zespołu pomiarowego, trzymając pływaki w ręku, wchodził do wody, starając się każdorazowo dotrzeć w okolice odmorskiego skłonu pierwszej odlądowej rewy (około 100 m od brzegu), tj. w rejon załamywania się fal i wyrzucał oba pływaki możliwie jak najdalej w kierunku morza. Drugi członek zespołu, stojąc bliżej brzegu, zapisywał dokładny czas (z dokładnością do jednej sekundy) rozpoczęcia pomiaru,

wykorzystując do tego celu ręczny GPS. Ponieważ zasada pracy odbiorników GPS opiera się na dokładnym pomiarze czasu, dlatego można było mieć pewność, że czas odczytany z jednego odbiornika GPS jest dokładnie zsynchronizowany z zegarem w odbiornikach zainstalowanych w pływakach. W momencie, gdy pływak docierał do brzegu i osiadał na dnie, był zapisywany czas zakończenia pojedynczego pomiaru. W trakcie pomiarów zapisywano dodatkowe informacje obejmujące liczbę załamań fali, kierunek wiatru i fali podchodzącej do brzegu, zachowanie pływaków itd. Do obowiązków osoby stojącej w pobliżu brzegu należało czuwanie nad bezpieczeństwem swojego kolegi, a w razie konieczności ściągnięcie go na brzeg.

Pływaki po dotarciu do brzegu były ponownie wynoszone w sąsiedztwo pierwszej rewy i rozpoczynała się kolejna seria pomiarowa. Łącznie w ciągu jednego dnia wykonywano z reguły od 10 do 15 serii pomiarowych obejmujących swym zasięgiem około 1.5 km brzegu. W warunkach silnego falowania stosowano zazwyczaj dwa duże pływaki, natomiast w warunkach umiarkowanych rzucono jeden pływak mały i jeden duży. Pomiar z reguły odbywał się w skrajnie złych warunkach pogodowych (wiatr, deszcz, niska temperatura).

Po zakończeniu pomiarów w danym dniu jedna z osób przechodziła wzdłuż linii brzegowej cały obszar pomiarowy z dwoma GPS'ami, tak, aby jak najdokładniej zmierzyć jej ukształtowanie danego dnia.

Podstawowe rezultaty

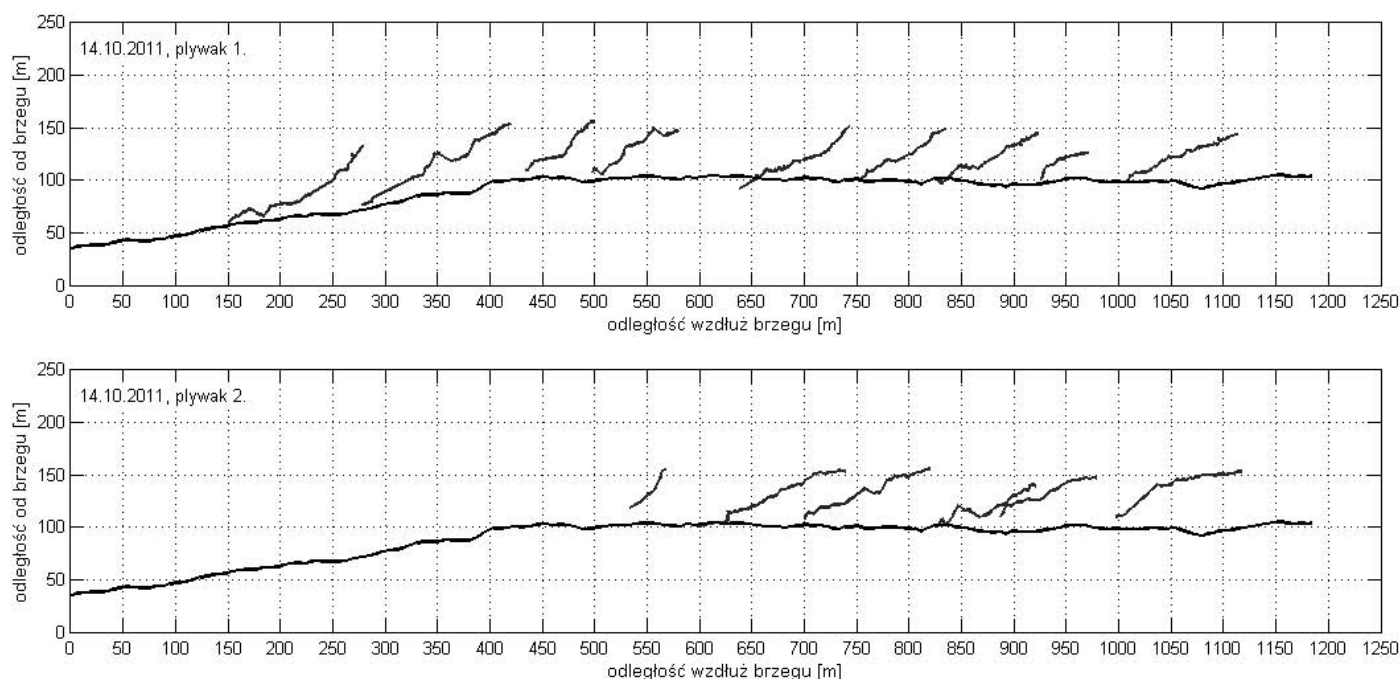
Początkowo pomiary prowadzono przy różnych warunkach falowych, ale już pierwsze wyniki wykazały, zgodnie z oczekiwaniami, że przy niewielkim falowaniu występujące w strefie brzegowej prądy są na tyle małe, że generacja prądów rozrywających jest niemożliwa.

Z kolei w warunkach sztormowych przy ukośnym podchodzeniu fali do brzegu dominacja prądu wzdłużbrzegowego jest na tyle duża, że nie pozwala wykształcić się prądom rozrywającym, co najwyżej notowano meandrowanie prądu wzdłużbrzegowego.

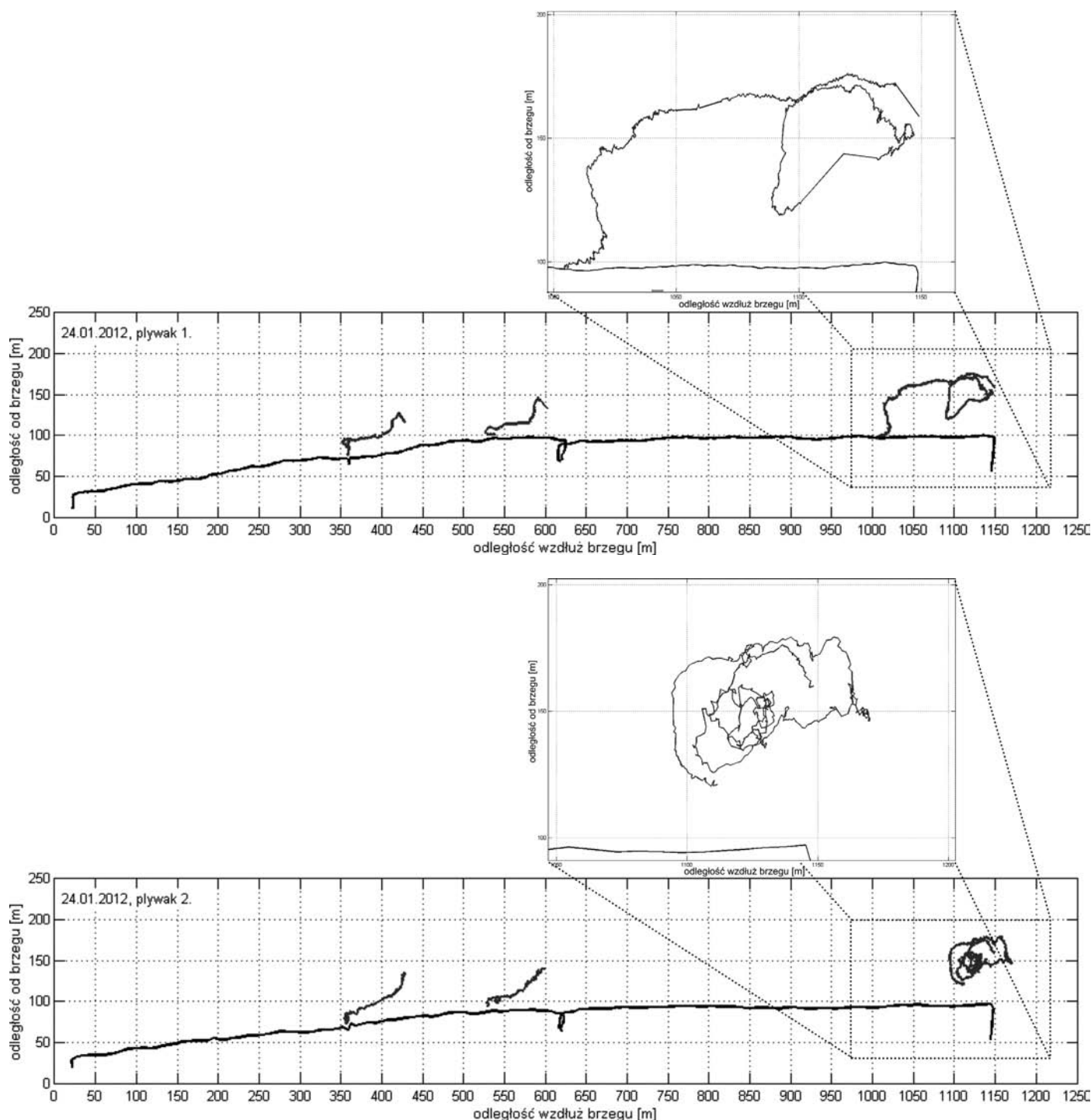
Analizy wyników pierwszych serii pomiarowych wykazały, że muszą być spełnione dwa warunki, przy których można spodziewać się powstania prądów rozrywających, tj. falowanie podchodzące w przybliżeniu prostopadłe do brzegu oraz pierwsza lub druga rewa powinna być poprzerywana, mieć pewne nieciągłości, które staną się naturalnymi kanałami odpływowymi dla prądów rozrywających. W rezultacie pomiary ograniczono do okresów sztormowych z kierunkiem podchodzenia fal odchylonych od prostopadłej do brzegu o kąt nieprzekraczający 30° .

Typowy wynik przy przeciętnym sztormie o wysokości fali znacznej $H_s = 1,85$ m, okresie piku $T_p = 6,5$ s oraz kierunku falowania odchylonym od kierunku prostopadłego do brzegu o kąt 29° pokazano na rys. 3. W tych warunkach pływaki z prędkością dochodzącą do $0,4$ m/s zmierzały ukośnie, pod kątem około 45° , w kierunku brzegu. Stosunkowo dużo pomiarów przeprowadzonych w takich warunkach nie skutkowało wykryciem prądów rozrywających.

Dopiero pomiary wykonywane w warunkach zanikania sztormu, tj. w sytuacji pojawiania się fal rozkołysu, przy falowaniu podchodzącym w przybliżeniu prostopadłe do brzegu, pozwalały na zidentyfikowanie stabilnych prądów rozrywających. Na rys. 4 pokazano pomierzone trajektorie pływaka dużego i małego przy falowaniu podchodzącym prawie prostopadłe do brzegu o parametrach: wysokość fali znacznej $H_s = 0,86$ m, okres piku $T_p = 5,8$ s, azymut kierunku fali $A_z = 3^\circ$. Z rysunku tego wynika, że oba pływaki „wykryły” obecność prądów rozrywających. Oddziaływanie tego prądu spowodowało poruszanie się pływaków po zamkniętych torach, w których były one uwięzione przez około 40 minut i wykonały od 1 do 3 okrążeń.



Rys. 3. Pomierzone trajektorie pływaków z dnia 14 października 2011 roku
wysokość fali znacznej $H_s = 1,85$ m, okres piku $T_p = 6,5$ s, azymut kierunku fali $A_z = 29^\circ$.



Rys. 4. Pomierzone trajektorie plywaków z dnia 24 stycznia 2012 roku
wysokość fali znacznej $H_s = 0,86$ m, okres piku $T_p = 5,8$ s, azymut kierunku fali $A_z = 3^\circ$.

Opisane w literaturze przypadki występowania prądów rozrywających w znakomitej części dotyczą tzw. brzegów refleksyjnych (odbijających), tzn. o dużo większym średnim nachyleniu dna niż ma to miejsce na południowych brzegach Bałtyku. Podczas zanikania sztormu fale stają się dłuższe, a ściślej mówiąc, względnie dłuższe, czyli mniej strome, to wówczas względne nachylenie dna staje się większe niż miało to miejsce przy typowych falach wiatrowych. Powoduje to mniejszą dysypację energii fali, a tym samym większą refleksyjność brzegu. W rezultacie tworzą się warunki sprzyjające powstawaniu prądu rozrywającego.

Jednym z zasadniczych problemów związanych z pomiarami cyrkulacji prądowych w bezpośrednim sąsiedztwie brzegu są ciągłe zmiany lokalnych głębokości. Pomiary batymetryczne mogą być wykonywane co najwyżej przy niewielkim falowaniu. Natomiast w warunkach sztormowych, kiedy poziom wody wzrasta, plaża znajduje się pod wodą, a fale docierają aż do podstawy wydmy następuje znaczny transport rumowiska i związana z tym przebudowa nadbrzeża i podbrzeża. Również w okresie zanikania sztormu, kiedy poziom wody opada, ale tworzący się wówczas rozkołys w dalszym ciągu przebudowuje dno, głównie w sąsiedztwie brzegu, a występujące wówczas fale podgrawi-

tacyjne tworzą liczne zatoczki i wypukłości brzegu, tzw. sierpy brzegowe. Chcąc możliwie poprawnie opisać proces powstawania prądów rozrywających, należałoby w tym momencie wykonać pomiary batymetryczne. Jest to niestety niemożliwe i w obliczeniach jesteśmy zmuszeni przyjmować przestrzenny układ dna wyznaczony w warunkach spokoju.

Pomiary uzupełniające

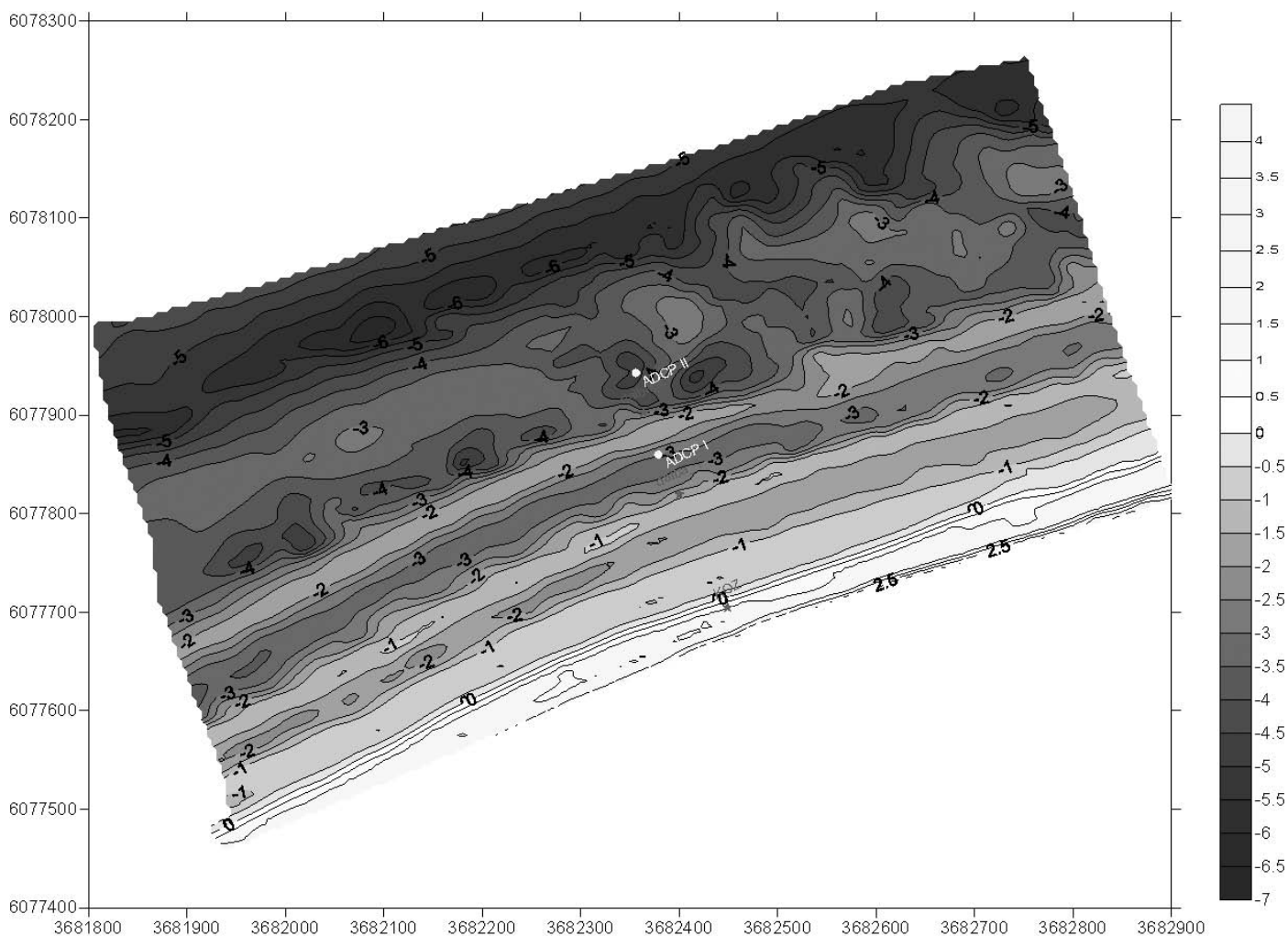
Podczas całego okresu ekspedycji prowadzone były ciągłe pomiary falowania na głębokiej wodzie, pomiary prędkości i kierunku wiatru wiatromierzem SW48 zainstalowanym na maszcie o wysokości około 20 m na lądzie w odległości około 200 m od brzegu oraz pomiary prędkości przepływu wody w dwóch wybranych punktach strefy brzegowej przy użyciu prądomierzy profilujących typu ADCP (*Acoustic Doppler Current Profiler*). Również w okresie pomiarowym wykonano trzy pomiary batymetryczne strefy brzegowej.

Ciągłe pomiary parametrów falowania głębokowodnego (wysokość, okres i azymut kąta podchodzenia fali) wykonywano kierunkową boją falową (*Directional Waverider Mk. III*) zakotwiczoną w odległości około 2 km od brzegu na głębokości $h \approx 16$ m, produkcji holenderskiej firmy DATAWELL B.V. Mierzone przez boję parametry falowania były przekazywane drogą

radiową i odbierane przez urządzenie sprzężone z komputerem znajdującym się w budynku MLB Lubiatowo. Parametry statystyczne i spektralne falowania wyznaczano następnie za pomocą standardowego oprogramowania firmy Datawell wykorzystującego metodę rozwinięcia Fouriera (FEM). Zapisywane były również surowe dane jako szeregi czasowe w formacie ASCII.

Pomierzone parametry falowania głębokowodnego (wysokość, okres i kierunek) w jednym punkcie traktowano jako warunki brzegowe przy obliczaniu rozkładów tych wielkości w strefie płytkowodnej i w strefie przyboju.

Zainstalowano również dwa prądomierze profilujące ADCP. ADCP I usytuowano na odmorskim stoku pierwszej rewy na głębokości 3,3 m. ADCP II postawiono na odmorskim stoku drugiej rewy na głębokości 5,2 m. Przyrządy posadowiono odpowiednio w odległości 0,5 i 0,8 m nad dnem i mierzyły rozkłady prędkości w pionie. Oba prądomierze skonfigurowano w ten sposób, że mierzyły średnie wartości prędkości w profilu pionowym w komórkach, tzw. celach, o wysokości każdej równej 10 cm. Parametry techniczne prądomierzy pozwalały na to, że najniższa cela znajdowała się w odległości 0,65 m od górnej krawędzi każdego prądomierza. Pomiary wykonywano automatycznie co 4 godz. Prądomierzem ADCP II mierzono dodatkowo parametry falowania w strefie płytkowodnej. Przy tak zaprogramowanych pomiarach pojemność baterii zasilających prądomierze pozwalała na 90 dni pracy.



Rys. 5. Plan batymetryczny strefy brzegowej w rejonie MLB Lubiatowo z września 2011 r.

Pomiary batymetryczne wykonano trzykrotnie. Pierwszy z nich zrealizowano w dniach 26 i 27 września 2011 roku. Kolejny letni sondaż rozpoczęto w dniu 11 lipca 2012 roku, jednak ze względu na nadejście niespodziewanej burzy został przerwany. Dokończono go 25 i 26 lipca. Ostatnie pomiary głębokości wykonano w dniach 21 i 28 listopada 2012 roku.

Wszystkie pomiary batymetryczne wykonano w profilach prostopadłych do uśrednionego przebiegu linii brzegowej oddległych od siebie o 25 m na odcinku brzegu o długości wynoszącej około 1 km. Azymuty profili pomiarowych były jednakowe, równe 163° . Profile pomiarowe sięgały do głębokości około 5 m, tylko w tzw. profilu dalbowym sięgały do głębokości około 10 m. Pomiary te były realizowane echosondą jednowiązkową.

Na rys. 5. zamieszczono przykładowy plan batymetryczny z września 2011 roku. Na planie tym podano także usytuowanie prądomierzy profilujących ADCP oraz dalb pomiarowych.

MODELOWANIE PRĄDÓW ROZRYWAJĄCYCH

Kolejnym etapem obliczeń było wykorzystanie licencyjnego holenderskiego pakietu numerycznego DELFT3D [3] do obliczeń falowania i prądów w rzeczywistej strefie brzegowej morza w rejonie MLB Lubiatowo.

Obliczenia wykonano w siatce numerycznej obejmującej około pięciokilometrowy odcinek brzegu i sięgający w głąb morza na odległość około 2 km, tj. do miejsca zakotwiczenia boi falowej. Rozmiary siatki obliczeniowej w sąsiedztwie brzegu, do odmorskiej krawędzi pierwszej odlądowej rewy (około 500 m od brzegu) wynosiły 5×5 m, pomiędzy pierwszą i drugą rewą (około 1000 m od brzegu) siatka ta miała wymiary 25×25 m, a w dalszej odległości oczka siatki numerycznej wynosiły 125×125 m. Przyjęto w całym obszarze obliczeniowym podział głębokości na 4 warstwy. Grubość warstwy przydennej wynosiła 20% głębokości w danym węźle numerycznym.

Przed przystąpieniem do zasadniczych obliczeń przeprowadzono kalibrację modelu numerycznego. Do tego celu wykorzystano pomierzone wartości wysokości falowania i prędkości przepływu wody w trakcie ekspedycji pomiarowej mającej miejsce w rejonie MLB Lubiatowo w 2006 roku. W trakcie tych pomiarów boja falowa była zakotwiczona na głębokości około 18 m w odległości w przybliżeniu równej 2 km. Dodatkowo w okresie ekspedycji były mierzone parametry falowania na drugiej i pierwszej dalbie oraz w bezpośrednim sąsiedztwie brzegu na głębokości około 0,6 m. Prędkości przepływu wody były mierzone w okolicy drugiej dalby i w tym samym punkcie co falowanie w sąsiedztwie brzegu. Szczegółowy opis przeprowadzonych w 2006 roku pomiarów i otrzymanych wyników przedstawiono w pracy [8].

Na potrzeby kalibracji modelu DELFT3D z zebranego materiału pomiarowego wybrano po dwie sytuacje, gdy fale podchodziły ukośnie do brzegu odpowiednio z kierunków wschodnich i zachodnich oraz prostopadle do brzegu dla przeciętnych wymuszeń falowych (wysokość fali znacznej $H_s \approx 1$ m) oraz warunków sztormowych ($H_s \geq 2$ m). W przeprowadzonych badaniach numerycznych wczytano układ batymetryczny dna pomierzony w 2006 roku, przy czym przyjęto te same rozmiary siatki numerycznej jak w obliczeniach zasadniczych. Głównym zadaniem

tych obliczeń było ustalenie wartości współczynników, takich jak: współczynnik załamania fali, współczynniki tarcia o dno, współczynniki lepkości turbulentnej lub wybranie formuł empirycznych, z których miały być one wyznaczane. Z obliczanych pól falowo-prądowych wybierano wartości z węzłów siatki numerycznej, które odpowiadały miejscom usytuowania sond falowych i prądomierzy w trakcie pomiarów i porównywano je między sobą. Ostatecznie przyjęto takie wartości współczynników, przy których różnica pomiędzy pomierzonymi i obliczanymi wysokościami fal nie przekraczała $10\div 15\%$, a dla wartości prędkości różnica ta była mniejsza od $30\div 40\%$. W przypadku prędkości główny nacisk był położony na to, aby obliczane kierunki przepływu wody były zgodne z pomierzonymi.

Tak wykalibrowany model DELFT3D zastosowano następnie do obliczeń parametrów falowania i prędkości przepływu wody dla warunków falowych i układów batymetrycznych pomierzonych w 2011 i 2012 roku.

Wyniki pomiarów trajektorii przemieszczających się pływaków jednoznacznie wykazały, że prądy rozrywające są generowane przy prostopadłym podchodzeniu falowania do brzegu w fazie zanikania sztormu, kiedy zaczynają występować fale rozkołysu. Dlatego też pierwszy etap obliczeń polegał na przyjęciu na granicy odmorskiej siatki numerycznej fal o następujących parametrach:

- wysokość fali znacznej [m]: 0,5 0,6 0,7 0,8 0,9 1,0 1,1 1,2 1,3 1,4 1,5 2,0 3,0.
- okres piku [s]: 5,0 6,0 7,0 8,0 9,0 10,0.
- azymut podchodzenia fali: 0° (północny).

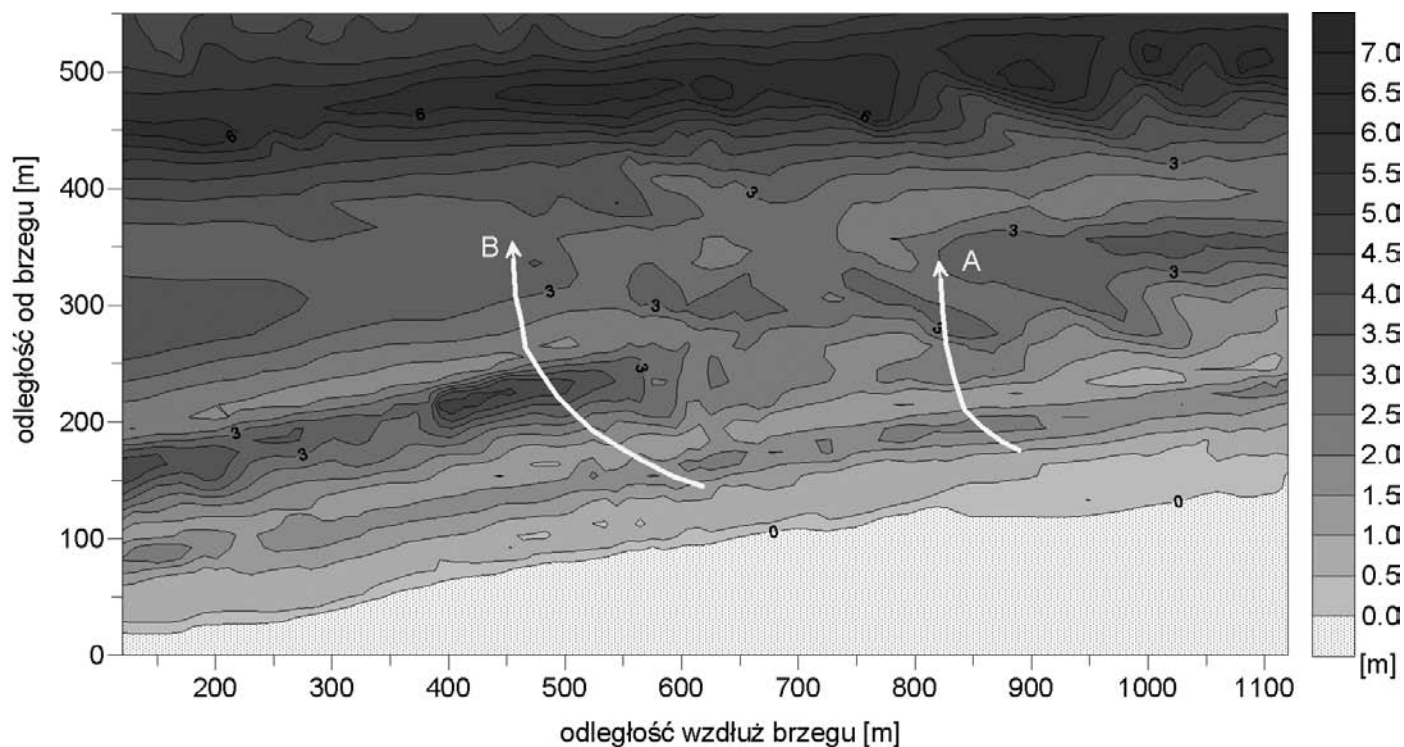
W sumie wykonano 78 symulacji numerycznych dla wszystkich kombinacji wysokości i okresów fali.

Analizując graficzne obrazy otrzymanych z obliczeń cyrkulacji prądowych dla każdej z przeprowadzonych symulacji numerycznych, nanoszono na te rysunki krzywe w miejscach występowania dwóch wyraźnych odpływów wody w kierunku morza w postaci prądów rozrywających. Porównując następnie ze sobą odpowiednie krzywe, których kształty i położenia były bardzo zbliżone do siebie we wszystkich przeprowadzonych obliczeniach wyznaczono dwie krzywe uśrednione, nazwane odpowiednio A i B.

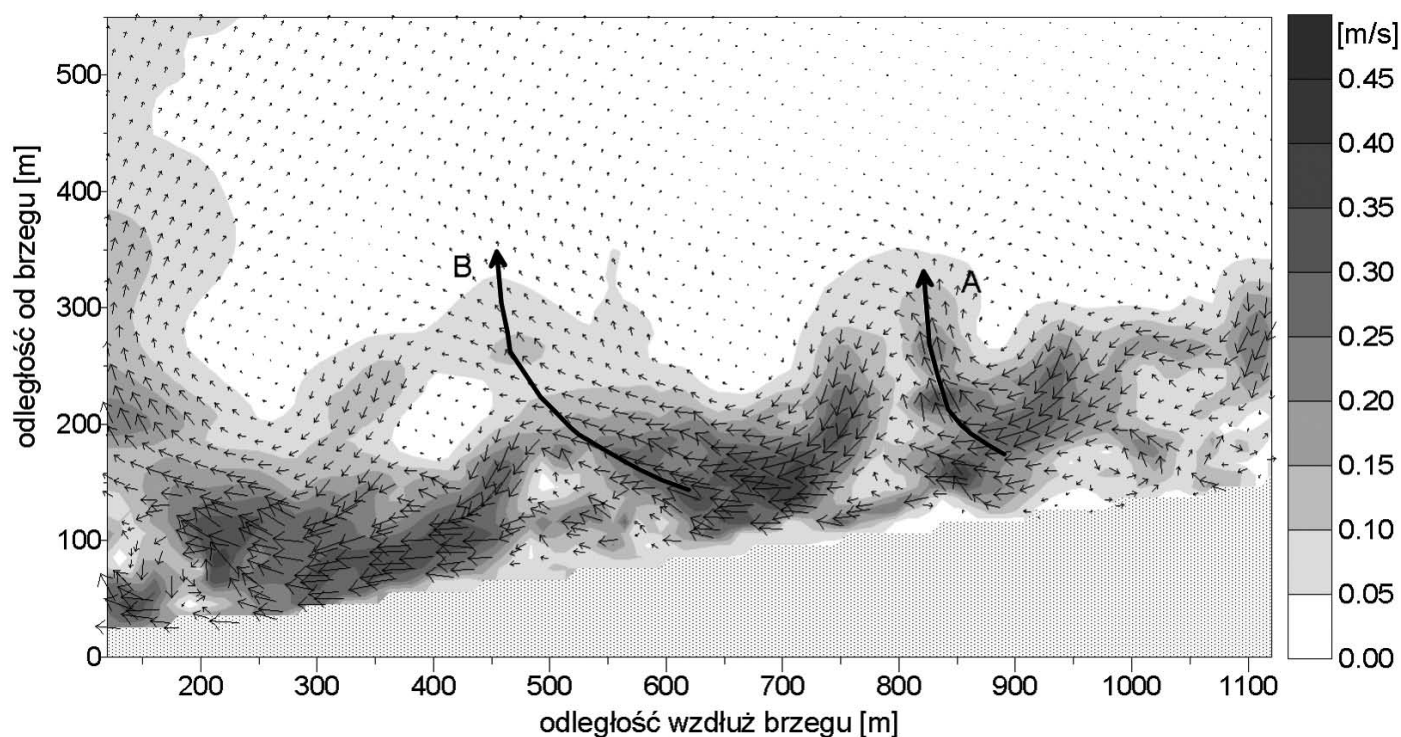
Na rys. 6. pokazano przykładowo położenie tych krzywych dla układu batymetrycznego dna pomierzonego we wrześniu 2011 roku. Z kolei na rys. 7 zamieszczono dla tej samej batymetrii obliczone rozkłady przepływu wody w strefie brzegowej dla przyjętych na granicy odmorskiej parametrów fali równych: $H_s = 0,9$ m, $T_p = 6,0$ s.

Jak widać na przedstawionym na rys. 7 układzie batymetrycznym, niezależnie od przyjmowanych na granicy odmorskiej siatki numerycznej parametrów fali, tworzyły się dwie wyraźne ścieżki A i B, wzdłuż których następował odpływ wody ze strefy przybrzeżnej w głąb morza przez istniejące obniżenia w pierwszej odlądowej rewie.

Z podanych na rys. 7 przykładowo obliczonych rozkładów prędkości w przyjętych na granicy odmorskiej siatki numerycznej wysokości fali znacznej równej $H_s = 0,9$ m i okresie piku $T_p = 6,0$ s widać wyraźnie występowanie dwóch obszarów, w których mamy do czynienia z prądami rozrywającymi.



Rys. 6. Układ ścieżek występowania prądów rozrywających obliczonych dla układu batymetrycznego z września 2011 roku
wysokość fali znacznej $H_s = 0,5, 0,6, 0,7, 0,8, 0,9, 1,0, 1,1, 1,2, 1,3, 1,4, 1,5, 2,0, 3,0$ m, okres piku $T_p = 5,0, 6,0, 7,0, 8,0, 9,0, 10$ s, azymut kierunku fali $A_z = 0^\circ$



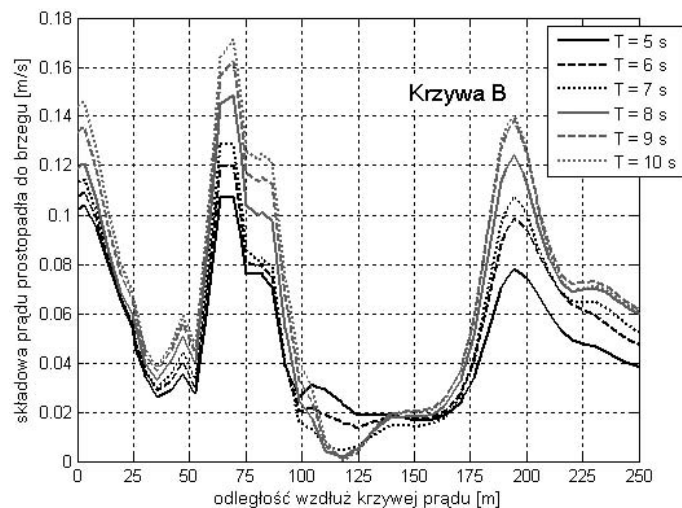
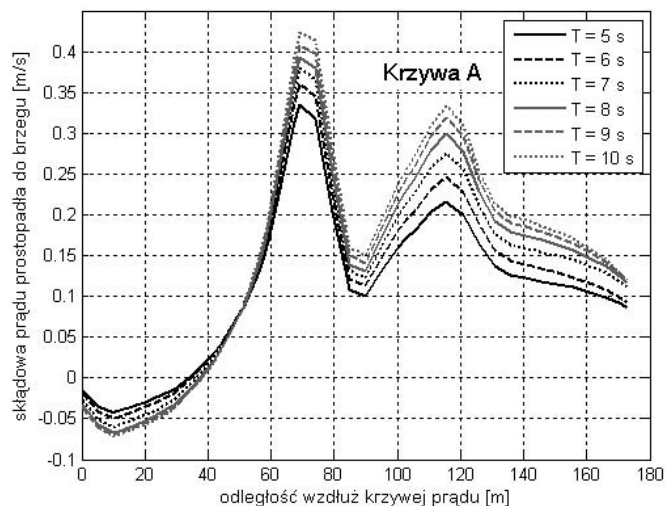
Rys. 7. Obliczone rozkłady cyrkulacji prądowych dla układu batymetrycznego z września 2011 roku
wysokość fali znacznej $H_s = 0,9$ m, okres piku $T_p = 6,0$ s, azymut kierunku fali $A_z = 0^\circ$

Obliczone wartości prędkości wzdłuż krzywych A i B dla wszystkich 78 rozpatrywanych sytuacji falowych pokazano na rys. 8a i 8b. Wartości dodatnie prędkości na tych rysunkach oznaczają odpływ wody w kierunku morza.

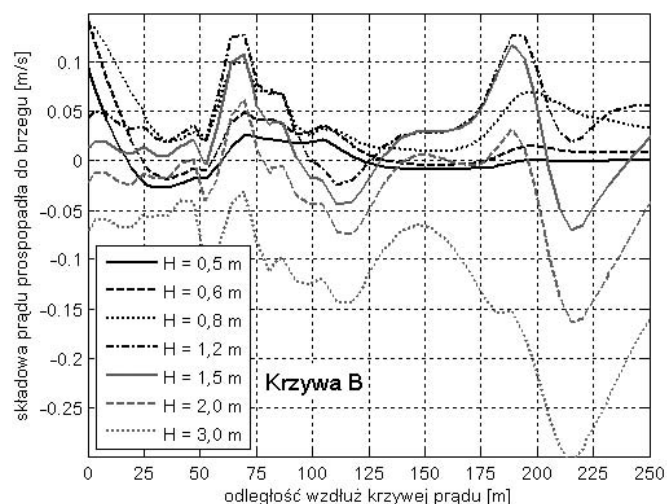
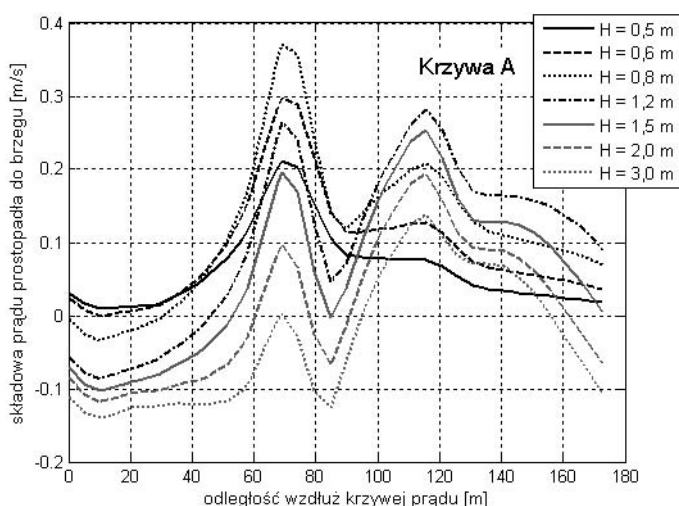
Z przedstawionych na rys. 8a rozkładów obliczonych prędkości w funkcji okresu fali widać, że im dłuższy okres fali – dłuższa fala – tym większe wartości prędkości w kierunku od-

brzegowym. Maksymalne prędkości występują w miejscach przechodzenia strumienia wody przez rewę.

Z kolei z pokazanych na rys. 8b obliczonych wartości prądu rozrywającego w funkcji wysokości fali wynika, że zależność ta nie jest monotoniczna. Wyraźnie widać, że dla określonych wysokości fali prądy te osiągają maksimum. Według krzywej A prąd rozrywający osiąga swoje maksimum w sąsiedztwie



Rys. 8a. Obliczony rozkład prędkości prądów rozrywających wzdłuż krzywych A i B w funkcji okresu fali
wysokość fali znacznej $H_s = 0,9$ m, azymut kierunku fali $A_z = 0^\circ$



Rys. 8b. Obliczony rozkład prędkości prądów rozrywających wzdłuż krzywych A i B w funkcji wysokości fali
Okres piku $T_p = 6,0$ s, azymut kierunku fali $A_z = 0^\circ$

przybrzeżnego wypłyenia przy głębokowodnej wysokości fali znacznej $H_s = 0,8$ m, a według krzywej B przy $H_s = 1,0$ m. Przy wysokościach głębokowodnych fal znacznych równych odpowiednio $H_s = 2$ i 3 m prądy rozrywające nie istnieją. Można to wytłumaczyć tym, że powstające w takich warunkach załamanie rodzaju przelewowego (*plunging*) na pierwszej rewii nie dopuszcza do wytworzenia się uśrednionego po okresie fali ruchu wody w kierunku morza w całej wysokości słupa wody. W takich sytuacjach prawdopodobnie kształtuje się prąd powrotny tylko przy dnie.

WNIOSKI

Wnioski wynikające z analizy wyników przeprowadzonych obliczeń są następujące:

- przy wzroście długości fal docierających w sąsiedztwo brzegu wzrasta prawdopodobieństwo wystąpienia prądów rozrywających,

- przy danej lokalnej batymetrii dna istnieje określona wysokość fali, przy której szanse pojawienia się prądu rozrywającego są największe,
- przy danych warunkach falowych ukształtowanie dna decyduje o miejscu wystąpienia prądu rozrywającego,
- w powstających ścieżkach odpływu wody ze strefy przybrzeżnej w głąb morza maksymalne prędkości występują w miejscach lokalnych wypłyen, wartości tych prędkości w zależności od parametrów falowania zawarte są w przedziale $0,1 \div 0,4$ m/s,
- najbardziej intensywnych wartości prądów rozrywających należy spodziewać się przy falach znacznych zawartych w przedziale $0,7 \div 1,5$ m i okresach większych lub co najmniej równych 5 s,
- zasięg prądów rozrywających (od brzegu w kierunku morza) sięga do odmorskiego skłonu drugiej odladowej rewii, tj. do odległości sięgających do około 300 m od brzegu.

LITERATURA

1. Brander, R. W.: Field observations on the morphodynamic evolution of a low-energy rip current system. *Marine Geology*, 157(3-4), 1999, 199-217.
2. Cook D.O.: The occurrence and geological work of rip currents off southern California. *Marine Geology* 9, 1970, 173-186.
3. Delft3D 2007. FLOW, Simulation of multi-dimensional hydrodynamic flows and transport phenomena, including sediments. User Manual.
4. MacMahan J. H., Thornton E. B., Reniers J. H. M.: Rip current review. *Coastal Engineering* 53, 2006, 191-208.
5. Sasaki, T., Horikawa T.: Nearshore current system on a gently sloping bottom. *Coastal Engineering in Japan*, 18, 1975, 123-142.
6. Shepard, F. P.: Undertow, rip tide or rip current. *Science*, 84, 1936, 181-182.
7. Short A. D.: Rip currents type, spacing and persistence, Narrabeen Beach, Australia. *Marine Geology* 65, 1985, 47-71.
8. Szmytkiewicz P.: Identyfikacja wolnozmennych parametrów ruchu wody płytkowodnego obszaru strefy brzegowej. Praca doktorska, IBW PAN, 2011.

PODZIĘKOWANIE: Wyniki przedstawione w niniejszym artykule uzyskano dzięki środkom finansowym otrzymanym na realizację projektu badawczego nr N N306 188939 pt. „Identyfikacja, opis i parametryzacja prądów rozrywających w warunkach wielorewowej strefy brzegowej południowego Bałtyku” z Ministerstwa Nauki i Szkolnictwa Wyższego.