

STANISŁAW RUDOWSKI

Zmarszczki w strefie przybrzeża południowego Bałtyku

SMALLSCALE RIPPLES IN OFFSHORE OF THE SOUTHERN BALTIC SEA

STRESZCZENIE: Zbadano metodą swobodnego nurkowania zmarszczki przybrzeża, strefy brzegowej Bałtyku w Polsce. Opisano zmarszczki falowe (symetryczne, asymetryczne i interferencyjne), zmarszczki prądowe (stwierdzone po raz pierwszy w strefie przybrzeża morza bezpływowego) oraz zmarszczki rombowe. Omówiono zmiany w rozmieszczeniu i orientacji zmarszczek, wyróżniając na tej podstawie dwie strefy w obrębie przybrzeża — głębszą i płytszą. Opisane zmarszczki porównano ze zmarszczkami przybrzeża mórz pływowych.

WSTĘP

Badania wykonano na przybrzeżu Bałtyku od Świnoujścia po Hel. Oprócz krótkotrwałych obserwacji w całym pasie przybrzeża przeprowadzono bardziej szczegółowe badania w wybranych miejscach (fig. 1). Ze względu na brak zasadniczego regionalnego zróżnicowania zmarszczek w różnych miejscach omawianej strefy brzegowej, przedstawione wyniki badań można uznać za reprezentatywne dla całego terenu, głównie jednak dla rejonów wydmych strefy brzegowej.

Badania terenowe wykonano w latach 1962—1969, głównie w miesiącach letnich, a w okresach wiosennych i jesiennych wykonano tylko kilkanaście obserwacji kilkunastu dni.

Obserwacje i pomiary zmarszczek prowadzono metodami swobodnego nurkowania posługując się kompasem podwodnym, głębokościomierzem i ręczną sondą. Wymiary zmarszczek określano przy użyciu linijki oraz wykonywano odrysy zmarszczki na białej w dno płytce. Oprócz tego wykonywano rysunki wymiarowe zarysu zmarszczek w planie i mierzone busolą ich orientację. Dokumentacja fotograficzna zmarszczek ze względu na słabą przezroczystość wody w obrębie przybrzeża, nie więk-

szą niż 2—3 m, nie była możliwa. W badaniach posługiwano się pontonem lub łodzią rybacką. Lokalizację punktu na morzu przeprowadzano równoczesnym wcięciem z dwóch teodolitów stojących na brzegu lub namiarami bocznymi z łodzi ustawionej w linii nabieżników. Dokładność lokalizacji punktu obserwacyjnego na dnie przy spokojnym morzu wynosiła 2—3 m przy odległości do około 400 m, dalej od brzegu i przy falowaniu rzędu 3 B spadała do około 5 m.

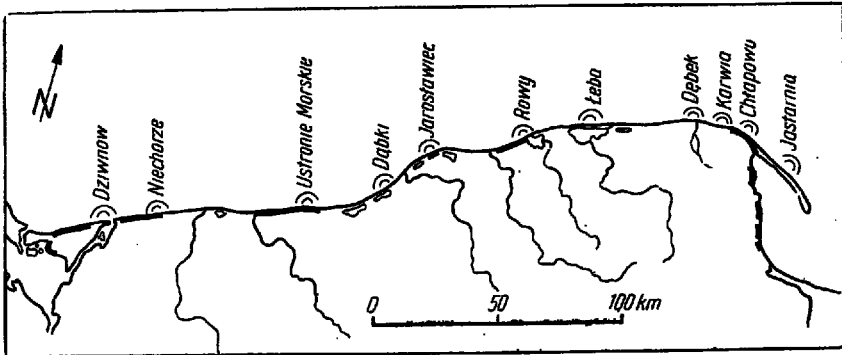


Fig. 1

Położenie obszarów szczegółowych badań terenowych (mapa wg Szopowskiego, 1961); kreska cienka — rejony wydymowe, gruba — rejony klifowe strefy brzegowej

Areas of detailed studies in southern shorezone of Baltic Sea. Thin lines — dune regions, thick — cliff regions of shorezone (map after Szopowski, 1961)

W pracach podwodnych pomagali mi koledzy pletwonurkowie mgr T. Komacki, mgr A. Tumiałojć, W. Sanakiewicz i K. Wuro, za co im serdecznie dziękuję. Kolegom: doc. dr hab. P. Roniewiczowi i dr J. Müllerowi dziękuję za pomoc w badaniach terenowych i długie dyskusje.

Podstawowa terminologia, dotycząca podziału i procesów strefy brzegowej Bałtyku, została przedstawiona poprzednio (Rudowski 1962).

STREFA BRZEGOWA

Strefa brzegowa Bałtyku w Polsce ma szerokość od około 600 m w rejonach klifowych do około 1,5 km w rejonach wydymowych. Przeważającą jej część zajmuje przybrzeże. Szerokość brzegu i nadbrzeża łącznie nie przekracza zwykle 50—100 m. Odmorska granica przybrzeża znajduje się na głębokości około 10 m. Na dnie przybrzeża występuje kilka rew (najczęściej 3), ciągnących się pasami mniej więcej równoległymi do brzegu (por. Rudowski 1962).

Dno przybrzeża pokryte jest piaskiem, a w rejonach klifowych częściowo też żwirami i głazowiskami. Przeważają piaski drobnoziarniste, bliżej brzegu o ziarnach większych (0,3—0,5 mm), stopniowo zmniejszających się wraz z oddalaniem się od brzegu do około 0,1—0,3 mm (począwszy od 7—8 m głębokości). Piaski średnioziarniste i gruboziarniste występują rzadziej, zależnie od lokalnych warunków, i mają ograniczone powierzchnie (m. in. Krzemińska 1960, Akseuov et al. 1965, Krzemińska-Grunwald 1966, Semrau 1966).

Zasadniczym procesem działającym w obrębie przybrzeża jest falowanie. Maksymalne wysokości fal na pełnym morzu nie przekraczają 5 m (Czekańska 1948, Łomniewski 1962).

Układ linii brzegowej i przeważające kierunki wiatrów powodują przewagę, zwłaszcza w czasie sztormów, skośnego nabiegu fal na brzeg. Choć na Bałtyku nie występują pływy (maksymalny dla tego terenu skok pływu wynosi 2 cm), to jednak częste są zmiany poziomu wody przy brzegu związane z działalnością wiatru. W dalszej części artykułu podaje stan morza (stopień sfalowania) według skali Beauforta (np. 2 B, 4 B...), dostosowanej do warunków Bałtyku przez K. Łomniewskiego (1962). Największe zmiany poziomu morza w strefie brzegowej sięgają 3 m, na co składają się wezbrania sztormowe (storm surges) spiętrzające wody do około 2 m i działanie długotrwałych wiatrów odlądowych powodujących obniżenie poziomu do około 1 m (Laska 1966).

Falowanie skierowane ku brzegowi powoduje nagromadzenie wód przy brzegu — wyrównywane przez prądy. Przy skośnym nabiegu fal tworzy się wzdłuż brzegu prąd (longshore current), płynący głównie w zagłębieniach międzyrewowych. Przy prostopadłym nabiegu fal na brzeg powstaje prąd rozrywający (rip current) skierowany prawie prostopadle do brzegu i przebiegający zwykle w osi niewielkich zatoczek.

W płytszej części przybrzeża często, zwłaszcza podczas stabilizacji silnego falowania sztormowego, występują fale translacyjne (Zenkovič 1946, 1962; Inman 1963), mające postać sunących szeregiem grzywaczy, stopniowo coraz niższych w stronę brzegu. Charakterystyczny dla nich jest brak powrotnego, ku morzu, ruchu cząstek wody; zakreślają one bowiem tylko górną część orbit. Fale translacyjne działają zwykle między pierwszą rewą i brzegiem, a podczas silnych sztormów nawet między drugą rewą i brzegiem.

TERMINOLOGIA ZMARSZCZEK

Zmarszczkami nazywam formy nagromadzeń luźnego osadu piaszczystego powstałe w rytmiczny sposób, wskutek przepływu wody ponad dnem, przy przeważającym transporcie w trakcji dennej.

Do zmarszczek zaliczam tylko formy swobodne (Dobrowolski 1923), rytmiczne (Kuenen 1950). Nie zaliczam do zmarszczek form wymuszonych (utworzonych przy przeszkodach zaburzających przepływ), form rzekomych (stanowiących pozostałość po nierównomiernie, rytmicznie zerodowanej powierzchni) i wszystkich form pojedynczych. Tak pojmowane zmarszczki są formami drobnymi — mikroformami, utworzonymi w warunkach tzw. "lower flow regime" (Allen 1963, 1968; Gvinn 1964), nie mającymi istotnego znaczenia dla morfologii obszaru, na którym występują. Powstają one i rozwijają się na powierzchniach form wyższego rzędu (najczęściej akumulacyjnych) powstających głównie w warunkach "upper flow regime". W terminologii angielskiej tak zdefiniowanym zmarszczkom odpowiada określenie *smallscale ripples* (Allen 1968).

Parametry zmarszczek (por. tab. 1) wyróżniam za W. H. Tannerem (1967) i J. Allenem (1968) pomijając te, które w badanym środowisku nie mają istotnego znaczenia. Oprócz stosowania wskaźnika ciągłości (*CI*) stosowałem także określenia słowne: zmarszczki długogrzbietowe (*CI* powyżej 10), średniogrzbietowe (*CI* od 5 do 10) i krótkogrzbietowe (*CI* poniżej 5); wprowadzone przez P. Inmana (1963), który jednak stosował inne zakresy (odpowiednio >3 , $8-3$ i <3).

Zmarszczki często wykazują w planie zróżnicowanie zarysu; oprócz zarysu prostego, obserwowano także zarys wygięty: falisto-sinusoidalny, falisto-wypukły (zmarszczki o grzbietach z serią wygięć o różnej, choć zbliżonej wartości cięciw i promieni, wygięte ogólnie w kierunku działania przepływu), falisto-wklesły (zmarszczki o grzbietach wygiętych w kierunku przeciwnym do kierunku działania tworzącego je czynnika). Obserwowano także nieregularne występy grzbietów zmarszczek, najczęściej V-kształtne, wysunięte w kierunku przepływu.

Zmarszczki są ułożone (por. Allen 1968) poprzecznie względem kierunku przepływu lub skośnie. Wygięcia linii grzbietów są współkształtne (zespół zmarszczek „w fazie”) lub przesunięte względem siebie (zespół zmarszczek „nie w fazie”).

RODZAJE ZMARSZCZEK

Istniejące próby klasyfikacji zmarszczek nie są w pełni zadowalające. Główną przyczyną tego jest różny stan poznania zmarszczek powstających w różnych środowiskach (np. w eolicznym i morskim). Nowe dane uzyskiwane z obserwacji polowych, czy z badań eksperymentalnych stawiają nieraz pod znakiem zapytania celowość wyróżniania pewnych rodzajów zmarszczek (np. zmarszczek złożonych falowo-prądowych).

W tej sytuacji ograniczyłem się jedynie do podania wykazu obserwowanych rodzajów zmarszczek i (w nawiasach) autorów, za którymi je stosuję. Wykaz ten nie jest w żadnym przypadku klasyfikacją zmar-

Tabela (Chart) 1

Parametry zmarszczek na dnie przybrzeża
Measurements of ripples in the offshore

Wymiary /Dimensions/						Wskazniki /Indexes/			
H /m/	\bar{s} /cm/	s /cm/	\bar{h} /cm/	h /cm/	c /cm/	RI s/h	RSI l_1/l_2	CI c/s	SI l_d/d
Zmarszczki symetryczne falowe /Symmetrical wave ripples/ 63,25%:									
9-10	11	7-18	3	1,5-3	< 50	3-6	-	< 5	~ 10
9 - 7	22	10-55	4,5	2-9	> 10 ²	5-10	-	10-15	~ 10 ²
7 - 4-5	31	12-71	6,5	3-11	> 10 ²	5-10	-	> 15	> 10 ²
4-5 - 2-3	17	9-29	3,5	4-5	~ 10 ²	4-8	-	~ 10	50-10 ²
2-3 - 0	8	6-18	1	0,5-2	< 10 ²	5	-	< 10	< 50
9-10 - 0	19	5-71	3	średnio /mean/: 0,5-11	< 10 ²	4-10	-	10-15	50-10 ²
Zmarszczki asymetryczne falowe /Asymmetrical wave ripples/ 24,60%:									
4-5	32	14-46	4,5	3-6	> 10 ²	5-10	2-3	> 10	~ 10 ²
4-5 - 2-3	23	11-39	3,5	2-7	~ 10 ²	7-11	4-6	~ 10	~ 50
2-3 - 0	7	4-16	2	0,5-4	~ 50	~ 5	~ 5	~ 5	~ 10
7-8 - 0	21	3-46	4	średnio /mean/: 0,7-9,5	~ 10 ²	6-12	1,5-6	~ 10	~ 50
Zmarszczki asymetryczne utworzone przez fale translacyjne /Asymmetrical ripples formed by translation waves/ 6,5%, średnio /mean/:									
2-3 - 0	24	9-28	1,5	0,5-3	~ 50	15-25	15-20	5-10	5-10
Zmarszczki prądowe /Current ripples/ 3,4%, średnio /mean/:									
-	12	7-36	2,5	1-4	< 50	5-15	10-15	< 5	< 5

H głębokość. Wymiary: \bar{s} rozstęp średni, s rozstępy skrajne, \bar{h} wysokość średnia, h wysokości skrajne, c długość grzbietu, lub odległość wzdłuż grzbietu między sąsiednimi rozwidleniami. Wskazniki: RI — stromości, RSI — symetryczności (l_1 rzut pionowy stoku naprądowego, l_2 rzut pionowy stoku zaprądowego), CI — ciągłości, SI — prostoliniowości (l_d długość łuku wygiętego grzbietu, d promień łuku wygiętego grzbietu)

Zestawiono tylko pomiary zmarszczek wykonane w ciągłych profilach całego przybrzeża (2400 pomiarów); w tabeli nie uwzględniono zmarszczek interferencyjnych, rombów i prądowych utworzonych przez prądy rozrywające (stanowiących 2,25% wykonanych pomiarów)

H depth. Dimensions: \bar{s} mean space, s extreme spaces, \bar{h} mean height, h extreme heights, c crest length, or distance between two bifurcations in a crest. Indices: RI — ripple index, RSI — ripple symmetry index (l_1 vertical projection of stoss side, l_2 vertical projection of leeside), CI — continuity index, SI straightness index (l_d length of the bending crest, d radius of the bending crest)

Compiled are only the measurements of ripples made in continuous profiles of the offshore (2400 measurements); interference, rhomboid and current (formed by rip currents) ripples are omitted (2.25% of the measurements)

szczek. W obrębie poszczególnych rodzajów wyróżnić można odmiany zmarszczek, różniące się nieco kształtami czy zarysem w planie.

Na badanym terenie stwierdziłem występowanie następujących rodzajów zmarszczek:

symetryczne falowe (por. Bucher 1919),

asymetryczne falowe (por. Evans 1941),

zmarszczki interferencyjne (por. Bucher 1919),
 zmarszczki prądowe zwykłe (por. van Straaten 1953a),
 zmarszczki prądowe językowate (por. Bucher 1919),
 zmarszczki rombowe (por. Woodford 1935).

Nie wszystkie podane w wykazie zmarszczki można było obserwować w optymalnych dla nich warunkach. Dotyczy to głównie zmarszczek powstających podczas sztormów, o których można sądzić na podstawie analizy warunków falowania i znanej morfologii dna, oraz na podstawie spotykanych niekiedy form przetrwałych (przy raptownym ucichnięciu sztormu).

W pracy niniejszej ograniczono się jedynie do zmarszczek przybrzeża. Zmarszczki występujące w pozostałych partiach omawianej strefy brzegowej zostały opisane poprzednio: zmarszczki wodne brzegu (Rudowski 1962), zmarszczki eoliczne (Marsz 1966, Müller 1969).

Symetryczne zmarszczki falowe

Symetryczne zmarszczki falowe powstają na głębokościach w przybliżeniu większych niż podwójna wysokość fal aktualnie działających na danym obszarze dna. Zależnie od intensywności oddziaływania fal na dno, oraz zależnie od ich charakterystyki, powstawały odmiany zmarszczek symetrycznych falowych: zwykłe, zaokrąglone bądź spiczaste (por. Davis 1965).

Zmarszczki symetryczne falowe zwykłe

Mają one, jak wszystkie zmarszczki symetryczne, równą długość obu stoków, grzbiety ich są ostro zarysowane (fig. 2a), przejście między grzbietem a bruzdą odbywa się w sposób ciągły, wskaźnik stromości jest z reguły niski ($RI = 3-6$).

Zmarszczki takie obserwowałem niemal wyłącznie na głębokościach 3 do 5 m, w korytach międzyrewowych. Zwykle były długie (CI większe niż 10—15), o prawie prostej linii grzbietów (SI powyżej 10^2) z nieznacznymi tylko rozdwojeniami. W większości przypadków rozstęp tych zmarszczek wynosił 15 do 25 cm. Zbudowane były prawie zawsze z drobnoziarnistego piasku, z nieco większymi ziarnami w bruzdach, gdzie częste też były koncentracje minerałów ciężkich.

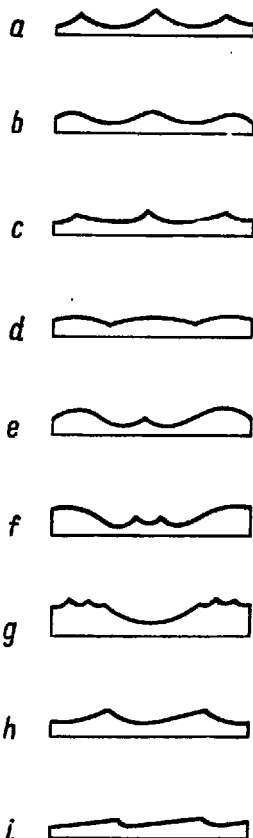
Zwykle zmarszczki symetryczne mogą w czasie silnego falowania pokrywać większe partie dna położone na większych głębokościach.

Zmarszczki symetryczne falowe zaokrąglone

Stanowią przeważającą odmianę zmarszczek falowych w strefie przybrzeża Bałtyku. Mają one wyraźnie zaokrąglone grzbiety, łagodnie

przechodzące w szerokie bruzdy (fig. 2b). Obserwowałem je na różnych głębokościach, zależnie od intensywności falowania. Często powstawały one także ze zmarszczek symetrycznych zwykłych, wskutek lekkiego zaokrąglenia grzbietów.

Podczas słabego falowania występowały już na głębokości 0,5 m, a nawet płycej w pobliżu linii brzegowej. Były wówczas bardzo małe (rozstęp parę centymetrów, wysokość kilka milimetrów). Wraz ze zwiększaniem się siły fali zmarszczki symetryczne zaokrąglone powstawały na coraz większych głębokościach, rozwijając się w zagłębieniach międzyrewowych. Po silnych i długotrwałych sztormach występowały na głębokości poniżej 9—10 m.



Zmarszczki falowe: *a* symetryczne zwykłe, *b* symetryczne zaokrąglone, *c* symetryczne spiczaste, *d—g* symetryczne przetworzone, *h* asymetryczne, *i* asymetryczne utworzone przez fale translacyjne

Wave ripples: *a* symmetrical common, *b* symmetrical rounded, *c* symmetrical peaked, *d—g* symmetrical metaripples, *h* asymmetrical, *i* asymmetrical formed by translation waves

Największe wymiary osiągały te zmarszczki na podmorskich stokach rew położonych dalej od brzegu (rewa trzecia i ewentualnie występujące dalsze rewy). Większość pomiarów dużych zmarszczek symetrycznych falowych dotyczy właśnie zmarszczek zaokrąglonych. Zmarszczki o maksymalnych rozstępach (50—55 cm) występowały na głębokości 7 do 9 m. Były one nieco falisto-sinusoidalnie wygięte (SI około 10^2).

Najbardziej długogrzbietowe (*CI* powyżej 15) i prostolinijne (*SI* powyżej 10²) zmarszczki zaokrąglone obserwowałem na głębokościach od 7 do 4,5 m. Wygięcia grzbietów, zazwyczaj falisto-sinusoidalne, zwiększały się w miarę zmniejszania się głębokości. Na głębokości poniżej 1 m częste były rozdwojenia i wygięcia grzbietów, także wklęsłe (*SI* poniżej 10, *CI* poniżej 5).

Na dużych głębokościach (poniżej 9 m), na stoku odmorskim najdalej położonej rewy i na dnie morza poza strefą brzegową, występowały wyłącznie zmarszczki zaokrąglone (tab. 1), bardzo nieregularne, krótkogrzbietowe, drobne, o niewyraźnych często zatartych kształtach. Liczne były przerwy grzbietów poprzesuwanych względem siebie. W chwili obserwacji zmarszczki te zawsze były pokryte mułem.

Zmarszczki zaokrąglone położone na mniejszych głębokościach zbudowane były głównie z piasku drobnziarnistego. Nieco grubsze ziarna i minerały ciężkie zgrupowane były na grzbietach zmarszczek.

Zmarszczki spiczaste

Zmarszczki spiczaste, mające spiczaste grzbiety rozdzielone płaskimi bruzdami (fig. 2c), powstawały w miejscach ścierania się fali nadchodzącej z morza i potoku przyboju spływającego z plaży. Występowały one tylko blisko brzegu, w ilości maksymalnie kilku sztuk. Rozstępy ich wynosiły od około 30 cm do około 55 cm, wysokość wynosiła 3—5 cm. Zmarszczki te miały wysoki wskaźnik stromości ($RI = 10-15$), długie grzbiety z bardzo licznymi wygięciami (*SI* poniżej 10). Czasami w ich obrębie zaznaczała się lekka asymetria grzbietów ($RSI = 1,2-1,4$) nachylonych zarówno ku morzu jak i ku brzegowi. Dla przybrzeża Bałtyku mają one małe znaczenie, gdyż łatwo ulegają zniszczeniu i zajmują bardzo małe obszary.

Zmarszczki symetryczne falowe — przetworzone

Sposób przetworzenia zmarszczek falowych zależy w znacznym stopniu od wielkości zmarszczek podlegających zmianom. Zmarszczki drobne szybko ulegają pełnemu dostosowaniu do nowych warunków, ulegając całkowitemu przemodelowaniu. Wyraźne przetworzenia obserwowane były w obrębie zmarszczek o rozstępie powyżej 20 cm. Częste były zmarszczki mniejsze włożone w bruzdy większych zmarszczek zaokrąglonych (fig. 2e, f), ułożone względem nich równolegle, skośnie lub czasem pod kątem prostym. Kilkakrotnie obserwowałem zmarszczki o podwójnych grzbietach (fig. 2g); związane one były tylko z bardzo dużymi zmarszczkami (rozstęp ponad 40 cm) zbudowanymi z drobnego piasku.

Powoli zwiększające się falowanie umożliwiało powstawanie zmarszczek o wyraźnie spłaszczonych grzbietach (fig. 2d), słabo tylko wypukłych i znacznie większych od rozdzielających je, ostro wciętych bruzd. Nagromadzenie minerałów ciężkich na grzbietach tych zmarszczek wskazuje na intensywność rozmywania grzbietów. Takie zmarszczki obserwowano jedynie na stokach odmorskich rewu drugiej i trzeciej, gdzie tworzyły się przy stanie morza większym niż 3—4 B.

Asymetryczne zmarszczki falowe

Powstają na głębokościach mniejszych, niż podwójna wysokość fal aktualnie działających. Na tej bowiem głębokości fale zmieniają się z symetrycznych w asymetryczne (Zenkovič 1946, 1962; King 1959; Leontev 1961; Inman 1963). Rewy powodują często kilkakrotne zmiany formy fal podchodzących do brzegu, co umożliwia powstanie kilku stref zmarszczek asymetrycznych rozdzielonych strefami zmarszczek symetrycznych i innych. Na głębokościach mniejszych niż wysokość fali obserwowano jedynie zmarszczki asymetryczne, utworzone przez fale translacyjne.

Asymetryczne zmarszczki falowe, w warunkach umożliwiających obserwację, zajmowały mniejsze powierzchnie dna przybrzeża niż zmarszczki symetryczne. Należy się jednak spodziewać, że w czasie silnego falowania, a zwłaszcza falowania sztormowego, zmarszczki asymetryczne mogą przeważać nad zmarszczkami innych rodzajów (fig. 8).

Zmarszczki asymetryczne częściej niż symetryczne zbudowane były z piasków o ziarnie od 0,3 do 0,5 mm, a blisko brzegu również z piasków średnioziarnistych i gruboziarnistych. Większe ziarna i minerały ciężkie koncentrowały się na stokach naprądowych zmarszczek.

Oprócz zmarszczek asymetrycznych zorientowanych ku brzegowi (67% spośród 732 obserwacji), występowały także zmarszczki o odwrotnej orientacji stoków zaprądowych.

Ze względu na różnice w wyglądzie i genezie zmarszczek asymetrycznych wyróżniłem w ich obrębie kilka odmian: zmarszczki zwykłe, zmarszczki utworzone przez fale translacyjne, zmarszczki o złożonej genezie i zmarszczki przetworzone.

Zmarszczki asymetryczne falowe zwykłe

Występują najliczniej w badanej strefie. Podczas bardzo słabego falowania (poniżej 1 B) tworzyły się jedynie przy brzegu na głębokości kilkudziesięciu centymetrów. Były wówczas małe o rozstępie kilku centymetrów, krótkogrzbietowe z silnie powyginaną, falisto-wypukłą linią grzbietów i z licznymi rozwidleniami. Silniejsze falowanie umożliwiało

ich powstawanie także na większych głębokościach, głównie na grzbie-
tach i stokach rew. Większość obserwacji pochodzi jednak z obszarów
dna znajdującego się na głębokości od 1—2 m do 4—5 m. Zmarszczki
tam występujące miały zazwyczaj grzbiety falisto-wypukłe, z nielicz-
nymi rozdwojeniami. Przeważały wśród nich formy średniogrzbietowe.

Na głębokościach większych niż 4—5 m zmarszczki asymetryczne
obserwowałem rzadziej. Największa głębokość, na jakiej je stwierdziłem,
wynosiła 7,6 m. Zmarszczki te były duże (tab. 1), długogrzbietowe, proste
o małym wskaźniku asymetrii.

Zmarszczki asymetryczne utworzone przez fale translacyjne

Charakterystyczne dla nich są: duży wskaźnik symetryczności,
spłaszczenia falisto-wypukłych grzbietów, liczne V-kształtne występy
skierowane ostrym końcem ku brzegowi i towarzyszące im drobne rowki
erozyjne. Wygięcia grzbietów oraz V-kształtne występy są ułożone (fig. 3)
jedne za drugimi (pole zmarszczek „w fazie” według Allena, 1968) lub —
rzadziej — rozmieszczone są nieregularnie (pole zmarszczek „nie w fa-
zie”). Kształt tych zmarszczek w przekroju poprzecznym jest identyczny

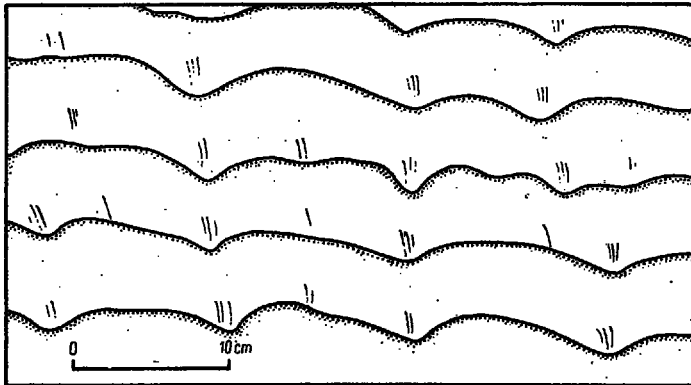


Fig. 3

Zarys grzbietów zmarszczek asymetrycznych, utworzonych przez fale translacyjne
(zakropkowano stoki zaprawdowe, kreski oznaczają drobne rowki erozyjne)

Asymmetrical wave ripples, formed by translation waves (ledsides dotted, small
erosional grooves dashed)

z kształtem zmarszczek opisywanych przez W. Tannera (1963) jako typowe
dla potoku przyboju i wydzielanych przez niego jako odrębny rodzaj
“shear ripples”. Różnią się one od zmarszczek utworzonych przez fale
translacyjne większymi wymiarami i bardziej prostoliniowym przebie-
giem grzbietów.

Zmarszczki asymetryczne o złożonej genezie

Zmarszczki o złożonej genezie, z których większość miała asymetryczne kształty, traktuję jedynie jako odmianę zmarszczek asymetrycznych. Opisuję je osobno dla zwrócenia uwagi na sposób powstawania, a nie dla celów klasyfikacyjnych (por. van Straaten 1953a). Złożona geneza zmarszczek asymetrycznych polegała najczęściej na działaniu słabego prądu przesuwającego ziarna w bruzdach zmarszczek tworzonych przez fale, co powodowało przedłużenie ich grzbietów. Taki charakter miały przede wszystkim zmarszczki, także i symetryczne, występujące w obrębie skośnych względem fal zespołów zmarszczek. Według van Straatena (1953a) byłyby to zmarszczki złożone falowo-prądowe, bądź podłużne falowo-prądowe.

Inne odmiany zmarszczek falowych o złożonej genezie nie były dotychczas opisywane (w myśl zasad klasyfikacji van Straatena powinny być one wyodrębnione jako osobne rodzaje, co trudno jednak uznać za prawidłowe).

Po sztormach często obserwowano na podmorskich stokach rew (fig. 8 i 9) występowanie zespołów zmarszczek asymetrycznych, skierowanych w przeciwnie strony i rozdzielonych zespołem zmarszczek symetrycznych. Taki układ zmarszczek był wywołany zróżnicowanym, i uzależnionym od stopnia asymetrii fal, wypadkowym ruchem ziarn osadu pod wpływem ruchu falowego wody i siły ciężkości. Ziarna poderwane z dna staczały się w dół po stoku rewy w czasie, gdy nad dnem przechodziła dolina fali. Początkowo, przy małej jeszcze asymetrii fali, wypadkowy ruch ku morzu przeważał nad ruchem ziarn w stronę brzegu — wtedy powstawały zmarszczki asymetryczne, zorientowane w stronę morza. Wzrost asymetrii fali wkraczającej na stok rewy mógł następnie spowodować zrównanie wypadkowego ruchu ziarn w przód i w tył, umożliwiając powstanie zmarszczek symetrycznych. Dalszy wzrost asymetrii fali dawał wreszcie przewagę ruchu do przodu i powstawanie zmarszczek asymetrycznych zorientowanych do brzegu.

Inną odmianą zmarszczek asymetrycznych złożonych są zmarszczki powstające w wyniku ścierania się wód spływu potoku przyboju z nacierającymi falami. Zmarszczki asymetryczne były jednak w tych warunkach rzadko spotykane i miały bardzo słabo zaznaczoną asymetrię stoków. Przeważały zmarszczki symetryczne spiczaste, opisane uprzednio.

Wszystkie obserwowane przypadki występowania zmarszczek asymetrycznych falowych zorientowanych ku morzu związane są ze zmarszczkami o złożonej genezie.

Zmarszczki asymetryczne falowe przetworzone

Przetwarzanie zmarszczek asymetrycznych najczęściej ograniczało się do spłaszczenia grzbietów. Obserwowano również małe zmarszczki,

zarówno symetryczne jak i asymetryczne, włożone w bruzdy zmarszczek asymetrycznych większych, wcześniej utworzonych. Na obszarach położonych blisko brzegu częste były drobne rowki erozyjne tnące stoki naprądowe. Niekiedy występowały drobne zmarszczki prądowe, ułożone wzdłuż spłaszczonych grzbietów dużych zmarszczek asymetrycznych. Większość przetworzonych zmarszczek asymetrycznych występowała na głębokościach od 3 do 1,5 m oraz przy linii brzegowej.

Zmarszczki falowe interferencyjne

Zmarszczki interferencyjne obserwowałem jedynie (fig. 4) w płytkiej wodzie do 1,5 m głębokości na pierwszej od brzegu rēwie oraz między nią a brzegiem. Tworzyły się wówczas, gdy zachodziła interferencja fal spowodowana zróżnicowaną refrakcją.

Najlepsze warunki do tworzenia się zmarszczek interferencyjnych związane były z interferencją fal translacyjnych.

Zmarszczki interferencyjne najczęściej miały kształt nieregularnych pięcioboków lub sześcioboków. Wzór kwadratów lub rombów spotykałem sporadycznie. Największe zmarszczki miały dłuższe osie o długości 25—

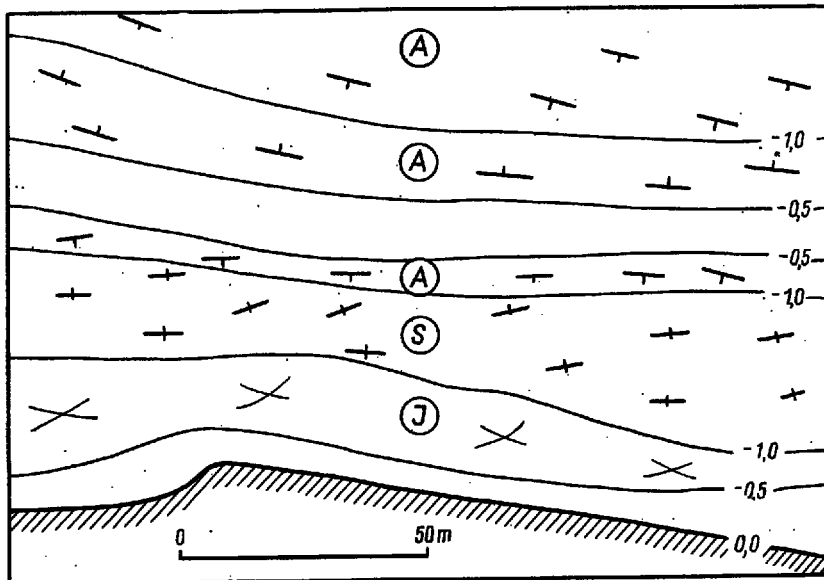


Fig. 4

Rozmieszczenie zmarszczek na dnie przybrzeża (Karwia, 19.08.1968); S zmarszczki falowe symetryczne, A zmarszczki falowe asymetryczne, I zmarszczki falowe interferencyjne (zakreskowany obszar plaży; izobaty w metrach)

Ripples distribution in the offshore (Karwia, 19.08.1968); S symmetrical wave ripples, A asymmetrical wave ripples, I interference ripples (beach dashed, isobaths in metres)

35 cm, a wysokość grzbietów wynosiła 4—7 cm. Najczęściej jednak występowały zmarszczki interferencyjne o dłuższej osi do 15—20 cm i wysokości grzbietów do 4 cm.

W warunkach silnego falowania, gdy nie było możliwości przeprowadzenia bezpośrednich pomiarów i obserwacji, często obserwowano silną interferencję fal. Jednakże po uspokojeniu się morza zmarszczki interferencyjne, ewentualnie tam występujące i niewątpliwie większe niż omówione powyżej, ulegały zniszczeniu i zastąpieniu przez zmarszczki innych rodzajów.

Zmarszczki prądowe

Zmarszczki prądowe na obszarze przybrzeża dotychczas były opisywane tylko w strefach brzegowych mórz pływowych, gdzie powstawały w wyniku działania silnych prądów pływowych, zwłaszcza podczas odpływu (van Straaten 1961, Reineck 1963). W strefach brzegowych mórz bezpływowych znane były jedynie z lagun plażowych występujących na brzegu dolnym (Rudowski 1962). Obserwowane przeze mnie zmarszczki prądowe, położone na dnie przybrzeża, powstawały w wyniku działania prądów płynących wzdłuż brzegu (longshore currents) i prądów rozrywających (rip currents).

Po silnych, szybko uspokajających się sztormach obserwowałem w zagłębieniach międzyrewowych zmarszczki prądowe (fig. 5) o grzbietach falisto-wypukłych, mających zróżnicowane wysokości i częste przerwy. Zorientowane były prawie prostopadle do osi zagłębienia i wykazywały znaczne spłaszczenie grzbietów i małe wysokości (tab. 1). Zbudo-

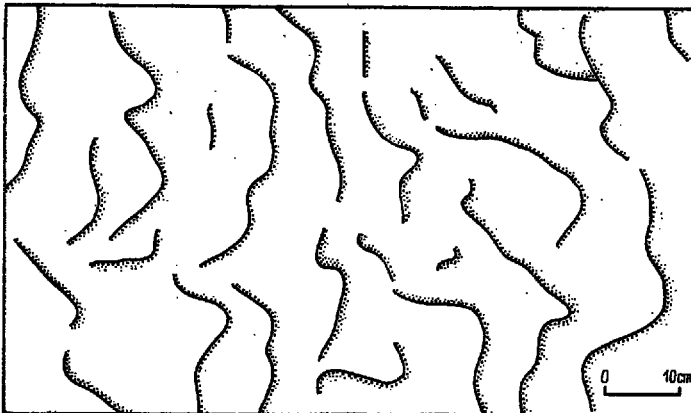


Fig. 5

Zarys grzbietów zmarszczek prądowych (zwykłych) w zagłębieniu międzyrewowym (zakropkowano stoki zaprawowe; głębokość 6 m)

Current ordinary ripples in the low (leesides dotted; depth 6 m)

wane były z materiału wyraźnie grubszego niż zmarszczki falowe przy-
ległych obszarów. W czasie obserwacji opisywane zmarszczki były
w mniejszym lub w większym stopniu zmienione wskutek falowania,
działającego na dno z dostateczną jeszcze siłą po ustaniu prądu, podczas
obniżania się stanu morza. Zmiany te polegały głównie na przzerwaniu
ciągłości grzbietów i wyginaniu ich zakończeń. Zmarszczki prądowe
w korytach międzyrewowych powstają zapewne znacznie częściej niż
były obserwowane, ale późniejsza działalność fal w większości przypad-
ków powoduje ich całkowite zniszczenie i utworzenie na ich miejscu
zmarszczek falowych.

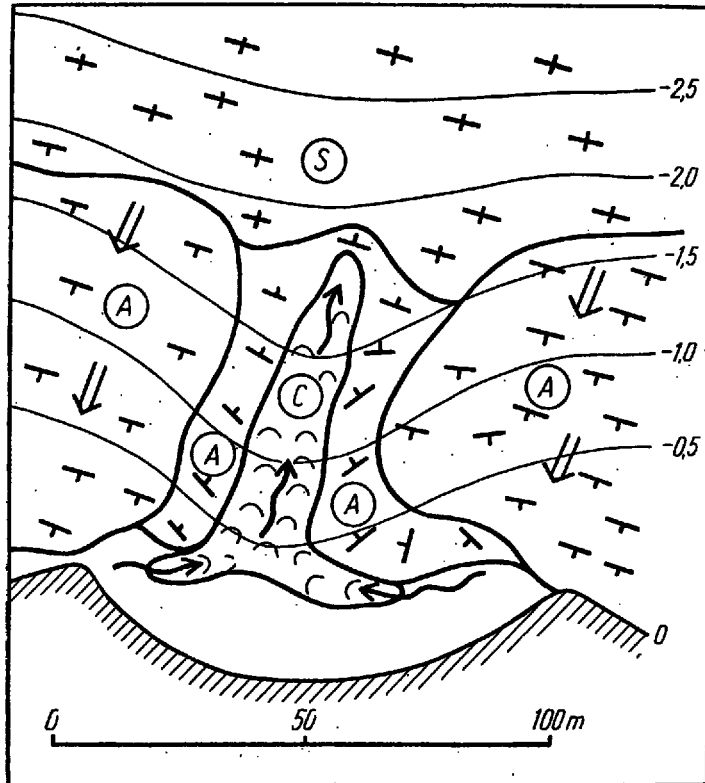


Fig. 6

Rozmieszczenie zmarszczek na dnie przybrzeża (Jastarnia, 6.08.1968); S zmarszczki falowe symetryczne, A zmarszczki falowe asymetryczne, C zmarszczki prądowe, zwykle i językowate, N brak zmarszczek (linie grube oznaczają granice zespołów zmarszczek, cienkie — izobaty; strzałki pojedyncze wskazują kierunek prądu rozrywającego, podwójne — kierunek rozprzestrzeniania się fal translacyjnych)

Ripples distribution in the offshore (Jastarnia, 6.08.1968); S symmetrical wave ripples, A asymmetrical wave ripples, C current ripples, ordinary and linguoid, N lack of ripples (thick lines denote limits of ripple sets, thin — isobaths; single arrows indicate the trend of rip currents, double — the trend of displacement of translation waves)

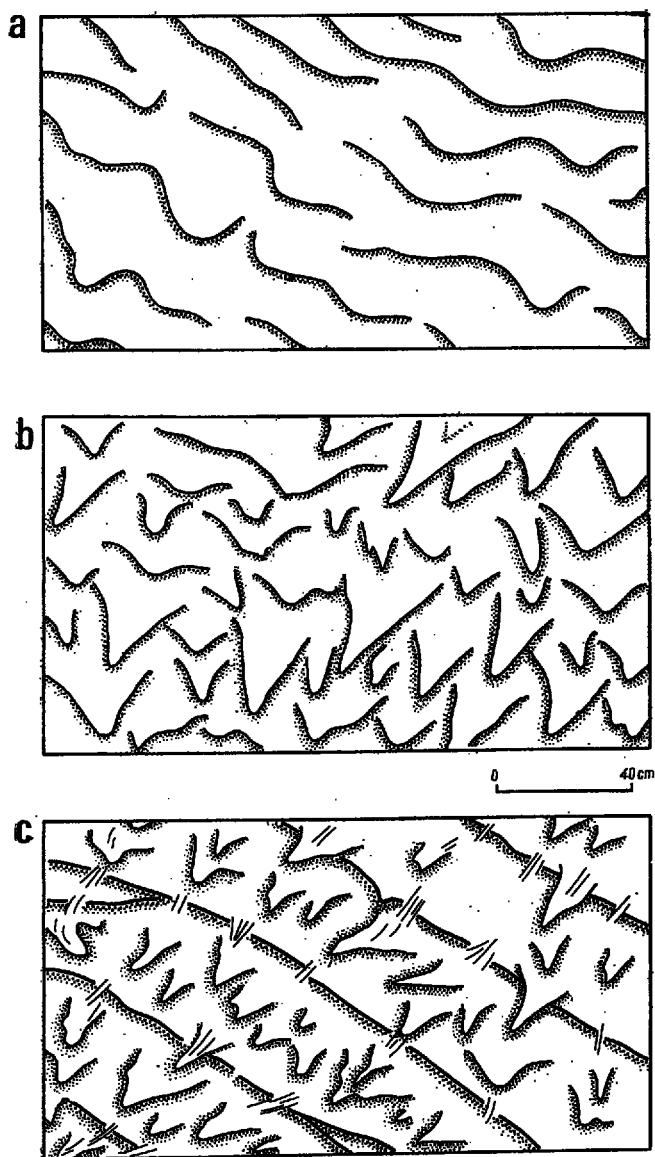


Fig. 7

Zarys grzbietów zmarszczek prądowych utworzonych przez prąd rozrywający (Jastarnia, 6.08.1968); a zmarszczki prądowe zwykłe, b zmarszczki prądowe językowate, c zmarszczki językowate, powstające ze zniszczenia zmarszczek falowych asymetrycznych (zakropkowano stoki zaprądowe, kreski oznaczają drobne rowki erozyjne)

Current ripples formed by rip current (Jastarnia, 6.08.1968); a ordinary current ripples, b linguoid ripples, c linguoid ripples originated by a destruction of asymmetrical wave ripples (leesides dotted, small erosional grooves dashed)

Zmarszczki utworzone przez prądy rozrywające (fig. 6) obserwowałem tylko przy niższych stanach morza (do 4 B). Prądy rozrywające działające przy silniejszym falowaniu mają bowiem zbyt dużą szybkość, aby mogły tworzyć zmarszczki. Oprócz zmarszczek prądowych, zbliżonych do zmarszczek opisanych z koryt międzyrewowych, obserwowałem także zmarszczki prądowe o bardziej zmiennym kształcie i wymiarach (fig. 7a), występujące w głównym rejonie działania prądu, ciągnące się pasem szerokości kilku metrów. Grzbiety ich były niskie, silnie powyginaane (falisto-wypukłe), z częstymi przerwami w postaci bruzd wyciętych w dnie. Wymiary ich były znacznie zróżnicowane, ale większość zmarszczek miała rozstęp 20—30 cm, wysokość 2—3 cm. Charakterystyczny dla nich był wysoki wskaźnik asymetrii (*RSD*) wynoszący 10—15. W obrębie zmarszczek prądowych prądów rozrywających często obserwowano przejścia do zmarszczek językowatych, o silnie wydłużonych „języczkach” (fig. 7b). W bocznych oraz końcowych partiach pola zmarszczek prądowych występowały lokalnie bardzo nieregularne zmarszczki językowate, różnej wielkości i kształtu, często powstające z przetworzenia zmarszczek falowych asymetrycznych (fig. 7c).

W sprzyjających warunkach zmarszczki prądowe tworzą się niekiedy także w bezpośrednim sąsiedztwie linii brzegowej, gdy działa tam lokalny prąd wywołany skośnym nabiegiem fal na brzeg, zwłaszcza w pobliżu niewielkich przylądków plaży. Zmarszczki te są drobne (rozstęp do 15 cm, wysokość do 3 cm), falisto wygięte, a grzbiety ich ciągną się skośnie do brzegu na odcinku kilkudziesięciu centymetrów, maksymalnie 1—2 m. Ilość grzbietów w lokalnym zespole nie przekracza kilkunastu. Jeśli dno w takich miejscach było twarde — zbudowane z ubitego piasku gruboziarnistego, torfu czy gliny — to wówczas tworzyły się tam zmarszczki ułomne, złożone tylko z piaszczystych grzbietów spoczywających na zwięzłym dnie. Zmarszczki takie opisałem uprzednio (za van Straatenem, 1953a) jako zmarszczki przekątne (Rudowski 1962, fig. 5). Jednakże wydzielenie takie jest sztuczne i nie wnosi nic istotnego — dlatego też zrezygnowałem z jego używania. Zmarszczek prądowych ułomnych, znanych z głębszych partii dna przybrzeża innych mórz (van Straaten 1953a, b, Davis 1965), na opisywanym obszarze nie stwierdziłem. Spowodowane to jest występowaniem tylko bardzo małych powierzchni dna przybrzeża Bałtyku, nie pokrytych znaczną ilością luźnego osadu.

Zmarszczki rombowe

Zmarszczki rombowe obserwowałem jedynie w najpłytszej części przybrzeża — pomiędzy pierwszą rewą a linią brzegową. W momencie obserwacji były one drobne (wysokość 1—2 mm, rozstęp 10—15 cm) i w znacznej części przetworzone. Dlatego też nie podaję danych o ich

wymiarach w tabeli 1. Powstawały one, gdy fale translacyjne przechodziły ponad płytszymi miejscami prawie wynurzonych barier i wkraçały na pas pływiczny przy linii brzegowej, rozlewając się tam wachlarzowo. Umożliwiało to wzajemne krzyżowanie się strug wody, a tym samym powstawanie zmarszczek rombówch. Warunki takie związane były z silnym falowaniem, kiedy niemożliwe było przeprowadzenie pomiarów i obserwacji na dnie. Po zmniejszeniu się siły fal zmarszczki rombówce, jakie tam powstawały, ulegały znacznemu zatarciu, a nawet całkowitemu przetworzeniu.

Zmarszczki rombówce znacznie częściej obserwowano na brzegu dolnym, gdzie tworzone były przez strugi potoku przyboju.

ROZMIESZCZENIE I ZMIENNOŚĆ ZMARSZCZEK W STREFIE PRZYBRZEŻA

Rozmieszczenie zmarszczek różnych typów, obszary przez nie zajęte, oraz ich wymiary, kształt, zarys w planie i orientacja względem linii brzegowej uzależnione są od warunków falowania.

Istotny wpływ na charakter zmarszczek występujących w danym miejscu mają ponadto głębokość i rzeźba dna oraz rodzaj osadu tam występującego. Ponieważ jednak te ostatnio wymienione czynniki wykazują zdecydowanie mniejszą zmienność niż dynamiczne warunki falowania, mogą być tym samym traktowane, przy tych rozważaniach, jako stałe.

Rozmieszczenie zmarszczek przy różnych warunkach falowania

Zależnie od warunków falowania wyróżnić można trzy zasadnicze rodzaje rozmieszczenia zmarszczek w strefie przybrzeża: związane z warunkami sztormowymi (powyżej 5 B), silnego falowania (od 2 do 5 B) i warunkami słabego falowania (poniżej 2 B). W obrębie tych trzech rodzajów występują ponadto lokalne zróżnicowania w sposobie rozmieszczenia zmarszczek, związane z działalnością fal translacyjnych, prądów rozrywających i interferencji fal.

Warunki sztormowe

Podczas sztormów największe partie dna pokrywają zmarszczki asymetryczne falowe (fig. 8), występujące nawet na głębokości 7—8 m i w odległości od brzegu 500 do 900 m (przy wysokości fali na pełnym morzu 4—5 m). Występowanie zmarszczek symetrycznych falowych, głównie zackraglonych, ograniczone jest wówczas do głębszych partii zagłębień międzyrewowych, poniżej 6—8 m. W osiach tych zagłębień

występują wydłużone pola zmarszczek prądowych, utworzonych przez prądy płynące wzdłuż brzegu. Na obszarach dna o głębokości mniejszej niż 3—4 m brak jest zmarszczek, ze względu na zbyt intensywny ruch wody ("upper flow regime").

Warunki silnego falowania

Oslabienie siły falowania po sztormie powoduje początkowo przetwarzanie zmarszczek uprzednio utworzonych, a następnie całkowite ich zastąpienie przez zmarszczki dostosowane do nowych warunków. Zwykle jednak zmarszczki występujące na dużych głębokościach (poniżej 6—7 m) zachowują się po sztormie w mało zmienionej formie.

W tych warunkach zaznaczają się wyraźnie obszary zmarszczek przetrwałych, przetworzonych i zmarszczek „świeżych”, powstających aktualnie (fig. 8 i 9). Powierzchnia zajęta przez zmarszczki symetryczne ulega zwiększeniu, w porównaniu do warunków sztormowych, głównie kosztem zmarszczek asymetrycznych powstających na mniejszych niż uprzednio głębokościach. Na szczytowych partiach rewy pierwszej i czasem drugiej, zależnie od intensywności falowania, zmarszczki nie tworzą się.

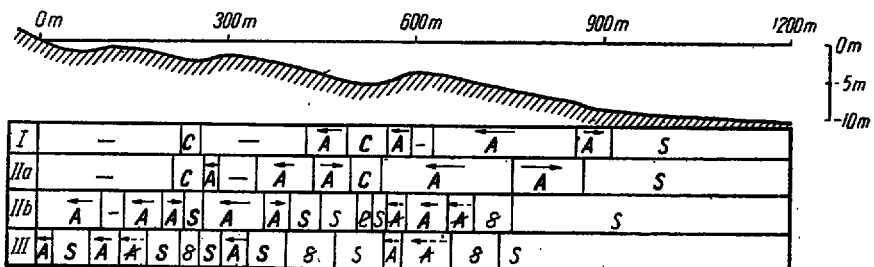


Fig. 8

Zmarszczki na dnie przybrzeża w różnych warunkach falowania (schemat; dla uproszczenia pominięto zmiany kształtu i położenia rew): I warunki sztormowe ($> 5 B$), II warunki silnego falowania (IIa 3—5 B, IIb 2—3 B), III warunki słabego falowania ($< 2 B$), A zmarszczki falowe asymetryczne, S zmarszczki falowe symetryczne, C zmarszczki prądowe (kreska pozioma oznacza brak zmarszczek; litery grube — zmarszczki powstające, cienkie — zmarszczki utworzone poprzednio, przekreślone — zmarszczki przetworzone; strzałki wskazują kierunek przemieszczania się zmarszczek falowych asymetrycznych)

Ripples in the offshore in various waving conditions (scheme; temporary changes of lows and balls omitted): I storm conditions ($> 5 B$), II strong waving conditions (IIa 3—5 B, IIb 2—3 B), III weak waving conditions ($< 2 B$), A asymmetrical wave ripples, S symmetrical wave ripples, C current ripples (horizontal line denotes lack of ripples; thick letters — ripples presently forming, thin — ripples formed previously, crossed — metaripples; arrows indicate direction of displacement of asymmetrical wave ripples)

8 II b) dotyczy rozmieszczenia zmarszczek przy stanie morza od 3 do 5 B, jakiego należy się spodziewać na podstawie obserwacji fal, morfologii dna i zmarszczek przetrwałych, obserwowanych przy niższych stacjach morza.

Warunki słabego falowania

Podczas słabego falowania zmarszczki powstają do głębokości 3—4 m, gdzie tworzą się wówczas wyłącznie zmarszczki symetryczne falowe. Zmarszczki prądowe występują ewentualnie tylko w obrębie działania lokalnych prądów rozrywających i zajmują małe obszary. Zmarszczki asymetryczne powstają tylko na pierwszej rewie i niekiedy na grzbiecie drugiej od brzegu rewy. Na większych głębokościach (poniżej 3—4 m) znajdują się zmarszczki powstałe uprzednio, przy silniejszym falowaniu. Zmarszczki przetworzone spotykane są często, głównie na stokach rew pierwszej i drugiej. Związane są one z częstymi w tych warunkach zmianami kierunku wiatru lub niewielkimi zmianami siły fali, mogącymi w istotny sposób wpływać na rozkład zmarszczek położonych na małych głębokościach.

Podczas słabego falowania obserwuje się dużą różnorodność zmarszczek różnych typów, zajmujących małe obszary w pobliżu linii brzegowej.

Orientacja zmarszczek

Pomiar azymutu zmarszczek występujących na dnie przybrzeża był łatwy do wykonania tylko w przypadku zmarszczek długogrzbietowych (CI powyżej 10). W innych przypadkach, zwłaszcza przy falistej linii grzbietów, możliwy do pomierzenia był jedynie średni azymut dla pewnej grupy zmarszczek. Dlatego też w zestawieniach pomiarów zmarszczek uwzględniłem jedynie średnie azymuty w obrębie poszczególnych zespołów zmarszczek, pomierzone na dnie lub wyliczone. Dodatkową trudność stanowiły częste przetworzenia zmarszczek, zwłaszcza zaś występowanie nowych zmarszczek w obrębie starych.

Większość azymutów zmarszczek falowych (82% spośród 2400 pomiarów) zgrupowana jest w sektorze trzydziestostopniowym, a wypadkowy azymut jest prawie zgodny z ogólnym przebiegiem brzegu. W poszczególnych profilach, wykonanych poprzecznie do linii brzegowej, obserwowałem znaczne różnice azymutów zmarszczek położonych w różnych miejscach. Spowodowane to było głównie refrakcją fal wkraczających na płytsze obszary dna — zwłaszcza przy przechodzeniu ich ponad rewami. Różnice azymutów przekraczały nawet 20—30° w sąsiednich polach zmarszczek, a od kierunku brzegu różniły się o kilkadziesiąt stopni (maksymalnie obserwowano 63°). Taki rozkład azymutów związany

był zwykle ze zdecydowaną zmianą kierunku wiatru podczas zmniejszania się sztormowego stanu morza. Wówczas azymuty zmarszczek aktualnie powstających miały inny przebieg niż zmarszczki powstałe uprzednio.

Największe ujednoczenie azymutów zmarszczek falowych obserwowałem w warunkach długotrwałego słabego falowania o stałym kierunku, z czołami fal równoległymi do wyrównanej linii brzegowej (bez zatoczek i przylądków plaży). Warunki takie trudno jednak uznać za typowe dla polskiego przybrzeża, gdzie w stosunku rocznym przeważa falowanie silniejsze i skośne względem brzegu.

Zmarszczki prądowe mają bardziej stały przebieg. Grupują się one w pasy mniej więcej równoległe do linii brzegowej (w korytach międzyrewowych) lub są prawie prostopadłe do brzegu, gdy tworzyły je prądy rozrywające.

Zmienność zarysu zmarszczek

Zmarszczki długogrzbietowe o regularnym przebiegu grzbietów, prostolinijne lub tylko lekko faliste, występują w strefie działania na dno tzw. fal dwuwymiarowych, tj. fal o długich regularnych grzbietach. Fale takie występują głównie w początkowym okresie narastania sztormu, a zwłaszcza po jego ustaniu — fala martwa (Masicka & Kowalik 1962, Inman 1963).

Fale trójwymiarowe, typowe dla maksimum sztormu na otwartym morzu, tworzą zmarszczki krótkogrzbietowe, nieregularne, chaotycznie ułożone, obserwowane na dnie morza poza rewami (tab. 1).

Fale trójwymiarowe podchodząc do brzegu wskutek tarcia o dno stają się bardziej regularne, co umożliwia powstawanie zmarszczek średnio- i długogrzbietowych. W pobliżu brzegu ponownie jednak zaznaczają się nieregularności w przebiegu fal, zwłaszcza translacyjnych, związane tym razem z zaburzeniami spowodowanymi przez prądy rozrywające, lub bardziej urozmaiconą morfologię dna, czy wreszcie wywołane przez silny potok przyboju. Odbija się to na zarysie zmarszczek, które są w tych miejscach krótkogrzbietowe, z licznymi rozwidleniami, falisto wygięte z częstymi trójkątnymi występami.

Zależnie od wymiarów fal zespoły zmarszczek o różnych zarysach zmieniają swoje położenie. Ogólnie jednak zmarszczki krótkogrzbietowe i silnie falisto wygięte występują na małych głębokościach (tab. 1), głównie powyżej 0,5 m, a w czasie sztormów powyżej 3—4 m. W miarę zwiększania się głębokości wzrasta długość grzbietów zmarszczek, a zmniejszaniu ulegają wygięcia grzbietów. Zmienne nachylenie dna związane z występowaniem rew powoduje, że zmiany zarysu zmarszczek w miarę oddalania się od brzegu nie zachodzą w sposób ciągły.

Zmienność wymiarów zmarszczek

Wymiary obserwowanych zmarszczek zależały od intensywności i długotrwałości tworzącego je czynnika (fal czy prądu). Zmarszczki duże, ostro zarysowane, regularne w zarysie, tworzyły się na obszarach dna, gdzie panowały aktualnie optymalne warunki dla ich powstania. Zmarszczki położone poza tymi obszarami miały mniejsze wymiary i mniej regularne kształty.

Częste zmiany warunków falowania powodowały zmiany położenia pól zmarszczek określonych rodzajów i ich odmian, wpływając na dużą zmienność wymiarów, obserwowaną nawet w tym samym miejscu w różnych okresach czasu. Ogólnie jednak największe zmarszczki falowe występowały na głębokościach od 7 do 4,5 m, a najmniejsze przy brzegu i na dnie poza strefą przybrzeża.

Na opisywanym obszarze nie stwierdzono wyraźnego związku między wymiarami zmarszczek a grubością ziarn piasku, z którego były zbudowane. Wynika to zarówno ze znacznej jednolitości osadów pokrywających dno, jak i z trudności w porównywaniu wymiarów zmarszczek powstałych w różnych warunkach dynamicznych. Ze statystycznego zestawienia wymiarów wynika, że najdrobniejsze są zmarszczki złożone z najgrubszego w obrębie przybrzeża osadu, gdyż taki osad występuje niemal wyłącznie przy linii brzegowej. Tam zaś zdecydowanie przeważają formy drobne.

UWAGI PORÓWNAWCZE

Zmarszczki w strefach przybrzeża zbiorników wodnych, w których pływy nie zachodzą, wykazują znaczne analogie ze zmarszczkami opisanymi w tej pracy. Pewne różnice zaznaczają się głównie w częstotliwości występowania określonych typów zmarszczek falowych, ich wymiarów i rozprzestrzenienia. Różnice te są spowodowane przede wszystkim odrębnymi możliwościami oddziaływania fal na dno. Tak na przykład na dnie przybrzeża jeziora Michigan (Evans 1941, 1943; Wulf 1963; Davis 1965) występują niemal wyłącznie zmarszczki symetryczne, asymetryczne zmarszczki spotykane są tylko blisko brzegu. Jest to spowodowane mniejszymi wymiarami fal w porównaniu z Bałtykiem. Nigdzie jednak nie były dotychczas wymieniane, także na obszarze przybrzeża jeziora Michigan, zmarszczki prądowe utworzone na opisywanym terenie przez prądy płynące wzdłuż brzegu i prądy rozrywające. Wywołane to jest nie tyle brakiem warunków dla powstawania tych zmarszczek, co brakiem dokładnej obserwacji w odpowiednich warunkach.

W strefach brzegowych mórz, gdzie są wyraźne pływy, wykonano znacznie więcej opracowań zmarszczek. Dotyczy to zwłaszcza wybrzeży

wattowych, spośród których najpełniej zostały opracowane zmarszczki strefy brzegowej Morza Północnego — holenderskiej (np. van Straaten 1953a,b, 1959, 1961; Sternberg 1967) i niemieckiej (np. Reineck 1963, Reineck & Wunderlich 1968) oraz strefy brzegowej wybrzeża atlantyckiego USA i Kanady (np. Tanner 1958, 1960, 1963, 1965, 1967; Trefethen & Dow 1960).

Jednakże w strefie brzegowej mórz pływowych procesy falowe nie kończą się w obrębie przybrzeża, ale działać mogą także podczas przypływu w obrębie brzegu dolnego. Zmarszczki tych obszarów mają często złożoną genezę. Wynika to z jednoczesnego działania fal i prądów w połączeniu z działaniem potoku przyboju. Z tych powodów przybrzeże Bałtyku stanowi dogodniejszy teren do przeprowadzania badań zmarszczek utworzonych przez falowanie.

Ze względu na zmienną granicę brzegu dolnego i przybrzeża, zależną od aktualnych warunków dynamicznych, oraz ze względu na przewagę opisów zmarszczek wodnych stref brzegowych mórz pływowych z obrębu brzegu dolnego, wykazującego zresztą znaczne analogie do płytszego przybrzeża Bałtyku, porównuję łącznie zmarszczki przybrzeża brzegu dolnego Bałtyku opisane uprzednio (Rudowski 1962).

Rodzaje zmarszczek wodnych występujących w obrębie stref brzegowych mórz pływowych i Bałtyku są takie same. Różnice między zmarszczkami tych dwóch stref polegają głównie na większych wymiarach zmarszczek stref brzegowych mórz pływowych. Oprócz zmarszczek liczne są tam formy większe — pręgi, oraz większe są tam powierzchnie zajęte przez zespoły zmarszczek. Ponadto, zmarszczki prądowe zwykle i językowate oraz zmarszczki rombowe występują tam znacznie częściej. Na opisywanym terenie stanowią one podrzędne, co do znaczenia, rodzaje — nawet łącznie ze zmarszczkami prądowymi lagun plażowych.

Rozmieszczenie zmarszczek, ich charakterystyka i orientacja względem linii brzegowej oraz kierunek ruchu zmarszczek asymetrycznych zmieniają się znacznie częściej na obszarach pływowych, gdzie uzależnione są od kierunku ruchu wody w czasie przepływu i odpływu. Dodatkowe komplikacje powodują prądy pływowe i prądy przybrzeżne. Wynikiem tych procesów jest znaczne zróżnicowanie zmarszczek, zmieniających się okresowo kilkakrotnie w ciągu doby.

PODSUMOWANIE

Przybrzeże południowego Bałtyku stanowi dogodny teren do badań zmarszczek związanych z falowaniem. Dotychczas jednak nie były one opracowane, oprócz małego obszaru w okolicy Rozewia (Masicka & Kowalik 1962).

Analiza typów zmarszczek i ich rozmieszczenia w strefie przybrzeża ma istotne znaczenie dla badań sedymentologicznych osadów kopalnych. Dla tych celów największe znaczenie ma stwierdzenie braku różnic inwentarza zmarszczek, między wątkowymi strefami brzegowymi (tidal flat areas) i strefami brzegowymi mórz bezpływowych (na przykładzie Bałtyku). Różnice między zmarszczkami tych dwóch rodzajów stref brzegowych polegają głównie na większych polach zmarszczek i większych ich wymiarach w obrębie wątkowych stref brzegowych oraz na odmiennym sposobie rozmieszczenia zmarszczek. Różnice te jednak mogą być trudne do zaobserwowania w stanie kopalnym, ze względu na ograniczone wymiary odsłonięć.

Istotnym wynikiem badań jest stwierdzenie po raz pierwszy występowania w obrębie przybrzeża morza bezpływowego zmarszczek prądowych zwykłych i językowatych, powstających pod wpływem działania prądów płynących wzdłuż brzegów i prądów rozrywających.

Na podstawie analizy rodzajów zmarszczek, ich wymiarów, kształtu i względnej częstości występowania oraz znaczenia dla określonych rejonów przybrzeża, można w strefie przybrzeża Bałtyku wyróżnić dwie mniejsze strefy: przybrzeże głębsze o głębokości większej niż 4—5 m i przybrzeże płytsze o głębokości mniejszej niż 4—5 m.

Przybrzeże głębsze

Zmarszczki tej strefy mają większe wymiary, dłuższe i bardziej prostolinijne grzbiety, ogólnie niższe wskaźniki stromości i symetryczności (tab. 1). Przy niższych stanach morza zmarszczki tu nie powstają, a na dnie znajdują się zmarszczki utworzone poprzednio. W warunkach silnego i sztormowego falowania większość dna pokryta jest tu zmarszczkami falowymi asymetrycznymi. Zmarszczki asymetryczne ograniczone są do zagłębień międzyrewowych, w osi których występują wtedy zmarszczki prądowe. Zmarszczki falowe tej strefy mają największe różnice kierunków grzbietów w stosunku do kierunku brzegu.

Przybrzeże płytsze

Zmarszczki przybrzeża płytszego mają mniejsze wymiary, krótsze grzbiety, często spłaszczone, z licznymi wygięciami, rozdwojeniami i V-kształtnymi występami. Wskaźniki stromości i symetryczności są wyższe niż w obrębie przybrzeża głębszego (tab. 1).

Zmarszczki przybrzeża płytszego powstają głównie w warunkach słabego falowania. Przeważają tu wówczas zmarszczki symetryczne, zaś zmarszczki asymetryczne występują głównie na szczytach rew i przy brzegu. Zmarszczki prądowe występują wtedy tylko w obrębie działania

słabych prądów rozrywających. Częste są tu zmarszczki przetworzone, zmarszczki interferencyjne, a także sporadycznie tworzą się zmarszczki rombowe. W warunkach silnego i sztormowego falowania zmarszczki w tej strefie nie mogą się tworzyć ze względu na zbyt intensywny ruch wody, powodujący także zniszczenie zmarszczek utworzonych uprzednio.

W partii przybrzeża płytszego położonej bliżej brzegu, na głębokości poniżej 1—2 m, omówione cechy zmarszczek ulegają silnemu zaakcentowaniu. Dotyczy to zwłaszcza spłaszczania grzbietów zmarszczek asymetrycznych, częstych rozdwojeń grzbietów, silnych ich wygięć i dużej ilości zmarszczek przetworzonych. Cechy te, „shallow water varieties of ripple marks” według W. Tannera (1963, 1967), są na tyle wyraźne, że mogą być traktowane jako dobry wskaźnik płytkowodności osadu.

*Instytut Geologii (Podstawowej
Uniwersytetu Warszawskiego
Warszawa 22, Al. Zwirki i Wigury 93
Warszawa, w marcu 1970 r.*

LITERATURA CYTOWANA

- AKSENOV A. A., NEVESSKIJ E. V., PAVLIDIS J. A. & ŚCERBAKOV P. A. 1965. Voprosy obrazowanija pribrežno-morskikh rossypej. — Trudy Inst. Okeanologii, vyp. 76. Moskwa.
- ALLEN J. R. L. 1963. Henry Clifton Sorby and the sedimentary structure of sands and sandstones in relation to flow conditions. — Geol. en Mijnbouw, vol. 42, no. 7. Gravenhage.
- 1968. Current ripples, their relation to patterns of water and sediment motion. North-Holland. Amsterdam.
- BUCHER W. H. 1919. On ripples and related sedimentary surface forms and their paleogeographic interpretation. — Amer. J. Sci., ser. 4, vol. 47. New Haven.
- CZEKAŃSKA M. 1948. Fale burzowe na południowym wybrzeżu Bałtyku. — Bad. Fizjogr. nad Polską Zach., z. 1. Poznań.
- DAVIS R. A. jr. 1965. Underwater study of ripples, southeastern Lake Michigan. — J. Sedim. Petrol., vol. 35, no. 4. Menasha.
- DOBROWOLSKI A. B. 1923. Historia naturalna lodu (Histoire naturelle de la glace). Wyd. Kasy im. Mianowskiego. Warszawa.
- EVANS O. F. 1941. The classification of wave-formed ripple marks. — J. Sedim. Petrol., vol. 11, no. 1. Tulsa.
- 1943. Effect of change of wave size on the size and shape ripple marks. — *Ibidem*, vol. 13, no. 1.
- GVINN V. E. 1964. Deduction of flow regime from bedding characters in conglomerates and sandstones. — *Ibidem*, vol. 34, no. 3.
- INMAN P. 1963. Wave process. In: SHEPARD F. P. Submarine Geology, II ed. Mc Graw-Hill. New York.
- KING C. 1950. Beaches and coasts. Oliver & Boyd. London.
- KRZEMIŃSKA A. 1960. Skład granulometryczny i minerały piasków z profilu badawczego tzw. Zatoki Koszalińskiej. — Prace Inst. Morsk., ser. 1, nr 1. Gdańsk.

- KRZEMIŃSKA-GRUNWALD A. 1966. Zależność składu mineralogicznego osadów dennych od ukształtowania profilu przybrzeżnego na polskim wybrzeżu. — I Sympozjum Sedymentologiczne w Gdyni: Współczesne procesy sedymentacyjne w strefie litoralnej południowego Bałtyku (Recent sedimentation in the littoral zone of south Baltic). Pol. Tow. Geol. Gdańsk.
- KUENEN PH. H. 1950. Marine Geology. Wiley & Sons. New York.
- LASKA M. 1966. Zagadnienie prognoz wzbrań sztormowych południowego Bałtyku w świetle numerycznych metod obliczeń (The prediction of storm surges in the Southern Baltic, based on numerical calculations). — Arch. Hydrotechn., vol. 13, no. 2. Warszawa.
- LEONTIEV O. K. 1961. Osnovy geomorfologii morskikh beregov. Izd. Morsk. Univ. Moskva.
- LOMNIEWSKI K. 1962. Sztormy na południowym Bałtyku (Storms on the Southern Baltic Sea). — Zesz. Geogr. WSP w Gdańsku, vol. 4. Gdańsk.
- MARSZ A. 1966. Geneza wydm łebskich w świetle współczesnych procesów brzegowych. — Prace Komis. Geogr.-Geol. Pozn. Tow. Przyj. Nauk (Trav. Géogr. Soc. Sci. Poznań), t. 4, nr 6. Poznań.
- MASICKA H. & KOWALIK Z. 1962. Dynamika powstawania „ripplemarków” w strefie przybrzeżnej południowego Bałtyku (Dynamics of ripplemarks formation in the coastal zone). — Acta Geophys. Pol., vol. 10, no. 3, Warszawa.
- MÜLLER J. 1960. Struktury eolicznych osadów piaszczystych z charakterystycznych obszarów wybrzeża Bałtyku i Polski Centralnej. Praca doktorska, maszynopis w Arch. Wydziału Geologii U.W. Warszawa.
- REINECK H. E. 1963. Sedimentgefüge im Bereich der südlichen Nordsee. — Abh. Senckenb. Naturforsch. Ges., H. 505. Frankfurt a.M.
- REINECK H. E. & WUNDERLICH F. 1968. Zur Unterscheidung von asymmetrischen Oszillationsrippeln und Strömungsrippeln. — Senckenberg. Leth., vol. 49, no. 4. Frankfurt a.M.
- RUDOWSKI S. 1962. Mikroformy strefy brzegowej Bałtyku w Polsce (Microforms of the Baltic shore zone in Poland). — Acta Geol. Pol., vol. 12, no. 4. Warszawa.
- SEIMRAU I. 1966. Litologia strefy płytkowodnej środkowego wybrzeża Polski i jej powiązanie z morfologią dna. — I Sympozjum Sedymentologiczne w Gdyni: Współczesne procesy sedymentacyjne w strefie litoralnej południowego Bałtyku (Recent sedimentation in the littoral zone of south Baltic). Pol. Tow. Geol. Gdańsk.
- STERNBERG R. W. 1967. Measurements of sediment movement and ripple migration in a shallow marine environment. — Marine Geol., vol. 5, no. 3. Amsterdam.
- STRAATEN L. M. J. U. van. 1953a. Megaripples in the Dutch Wadden Sea and the basin of Arcachon. — Geol. en Mijnbouw, vol. 15, no. 1. Gravenhage.
- 1953b. Rhythmic patterns on Dutch North Sea beaches. — *Ibidem*, vol. 15, no. 2.
- 1959. Minor structures of some recent littoral and neritic sediments. — *Ibidem*, vol. 21, no. 7.
- 1961. Sedimentation in tidal flat areas. — J. Alberta Soc. Petrol. Geol., vol. 9, no. 7. Calgary.
- SZOPOWSKI Z. 1961. Zarys historyczny zniszczeń polskich brzegów klifowych. — Materiały do monografii polskiego brzegu morskiego. Z. 1. Wybrane zagadnienia dynamiki brzegu morskiego. Inst. Budow. Wodnego PAN, Gdańsk — Poznań.

- TANNER W. F. 1958. An occurrence of flat-topped ripple marks. — *J. Sedim. Petrol.*, vol. 28, no. 1. Menasha.
- 1960. Shallow water ripple mark varieties. — *Ibidem*, vol. 30, no. 3.
- 1963. Origin and maintenance of ripple marks. — *Sedimentology*, vol. 2, no. 4. Amsterdam.
- 1965. High index ripple marks in the swash zone. — *J. Sedim. Petrol.*, vol. 35, no. 4. Menasha.
- 1967. Ripple mark indices and their uses. — *Sedimentology*, vol. 9. Amsterdam.
- TREFETHEN J. M. & DOW R. L. 1960. Some features of modern beach sediments. — *J. Sedim. Petrol.*, vol. 30, no. 4. Menasha.
- WOODFORD A. O. 1935. Rhomboid ripple marks. — *Amer. J. Sci.*, vol. 29. New Haven.
- WULF G. R. 1963. Bars, spits and ripple marks in a Michigan Lake. — *Bull. Amer. Ass. Petrol. Geol.*, vol. 47, no. 4. Tulsa.
- ZENKOVIC V. P. 1946. Dinamika i morfologija morskikh beregov. T. 1. Izd. Mosk. Univ. Moskva.
- 1962. Osnovy učenija o razvitii morskikh beregov. Izd. Mosk. Univ. Moskva.

SUMMARY

ABSTRACT: The offshore smallscale ripples of the Baltic Sea have been studied by diving. A description is given of the symmetrical wave ripples, asymmetrical wave ripples, interference ripples, rhomboid ripples and current ripples. This is the first record of the presence of the current ripples within the offshore area of a tideless sea. Changes in the position of ripples under varying conditions of waving are discussed. Two zones, one deeper, the other shallower, have been differentiated in the offshore, as suggested by the ripples. A comparison is made of the ripples here described with the smallscale ripples of the tidal flat areas.

INTRODUCTION

The field investigations have been carried out between Swinoujście and Hel in the offshore of the Baltic Sea, mainly during the summer seasons of 1962—1969. The sites of the more detailed investigations are marked on the map (Fig. 1). The measurements and the surveying of the ripples have been carried out by diving. The lack of photographic documentation is due to the poor transparency of the water in this zone, not exceeding 2—3 meters.

The offshore of the southern Baltic Sea covers the greatest part of its shorezone. In the cliff regions the offshore ranges from 500 to 600 m in width, but in the dune regions of the shorezone it widens out to 1 km, occasionally even to 1.5 km. The seaward limit of the offshore lies at a depth of about 10 m. Lows and banks, mostly three, occur at the floor of the offshore in unbroken belts approximately parallel to the shore (Rudowski 1962).

The floor of the offshore is covered by loose, nearly always fine-grained sand, in the cliff regions partly also by gravels and boulders.

The Baltic Sea has no tides. The maximum height of waves in the open sea does not exceed 5 m (Czekańska 1948, Łomniewski 1962). The configuration of the shoreline and the prevailing wind directions are responsible for the predominance of oblique shoreward waves. In spite of the lack of tides, changes in the water level connected with changes in the sea level are frequent. The maximum surge at the shore in a storm is about +2 m, the minimum height during winds blowing from the land is about -1 m (Laska 1966). The sea level is given according to Beaufort's scale (for instance 2B, 4B...), by Łomniewski (1962) adjusted to the Baltic Sea conditions. The longshore currents, occurring mostly in the lows, are of considerable importance in the zone here described. The rip currents are less frequent, they usually occur in the axis of small bays. In the shallower part of the offshore, more particularly during storms, translation waves are of common occurrence.

Only offshore ripples have been discussed in the present paper. Ripples occurring in other parts of the shorezone have been previously described (Rudowski 1962).

DESCRIPTION OF OFFSHORE RIPPLES

The following types of smallscale ripples have been observed by the writer within the area here considered:

- symmetrical wave ripples (cf. Bucher 1919),
- asymmetrical wave ripples (cf. Evans 1941),
- interference ripples (cf. Bucher 1919),
- ordinary current ripples (cf. van Straaten 1953a),
- linguoid ripples (cf. Bucher 1919),
- rhomboid ripples (cf. Woodford 1935).

The symmetrical wave ripples have, moreover, been subdivided (cf. Fig. 2) into the symmetrical common, symmetrical rounded and symmetrical peaked (cf. Davis 1965). The asymmetrical wave ripples may be differentiated into those formed by translation waves and those complex in origin. Various metaripples observed within all the ripple types are regarded as their varieties.

It was not possible to make observations of all the here distinguished ripple types or their varieties under optimum conditions. This most particularly concerns ripples formed during storms as their occurrence may be based only on an analysis of the waving, the observed morphology of the sea floor, also of the forms that have persisted and are encountered after a sudden calming down of the storm.

Tanner's (1967) and Allen's (1968) ripple parameters have been used (Chart 1), but certain subdivisions not applicable in the environment under consideration have been left out.

Symmetrical and asymmetrical wave ripples are those most representative of the offshore here described. The ordinary current ripples and the interference ripples are less common while the rhomboid ripples are sporadically encountered. Data concerning the main types of ripples are given in Chart 1.

Symmetrical wave ripples

These form at depths approximately twice the height of the waves here at work. Their most common variety are the rounded symmetrical ripples with dimensions greater than those of any other ripples observed by the writer. The

common symmetrical ripples formed only under conditions distinctly favourable to the development of symmetrical ripples and covered only small sections of the sea floor. Peaked ripples were encountered only quite close to the seashore; their characteristics were a high ripple index ($RI = 10-15$) and long strongly curved ridges (SI below 10). Their occurrence was due to the clashing together of the incoming wave with the waters of a strong backwash. They are, however, of no great importance in view of the small area of the offshore floor covered by them and their frequent destruction.

The symmetrical wave metaripples have been observed most often at depths smaller than 4-5 meters.

Asymmetrical wave ripples

These form at depths smaller than twice the height of the waves. The only ripple marks observed at depths smaller than the height of the waves were those made by the translation waves (Fig. 3).

In addition to the asymmetrical wave ripples of simple origin, complex asymmetrical wave ripples have likewise been observed. These ripples, generally occurring near to the shore, are formed with the cooperation of a weak current flowing in the furrows of ripples. The latter type of ripples has been described by van Straaten (1953a) as asymmetrical wave current ripples belonging to the longitudinal pattern or the complex pattern. A different complex origin may be ascribed to other asymmetrical ripples, so far not described, which occur on the sea-facing slopes of balls and are directed seawards (Figs 8 and 9). This direction of the ripples is due to the uneven movement of sand grains on an inclined sea floor. When the crest of the asymmetrical wave passes above the sea floor, the grains move shorewards over a smaller distance than they do seawards the next moment when the bottom of the wave passes above the sea floor. This is due to the action of the water swelling up in front of the ball and swashing down the slope, partly also to the rolling down of grains lifted from the sea floor. The gradually increasing wave asymmetry may adjust the differences in the two-directed grain movements leading to the formation of symmetrical ripples; under further progressing asymmetry of the wave encroaching the shallower parts of the ball slope, asymmetrical but shoreward directed ripples may reoccur. On the sea-facing slopes of the balls, sets of asymmetrical ripples have frequently been observed, especially after storms. These ripples follow opposite directions and are separated by a set of symmetrical ripples. All the seaward asymmetrical ripples observed by the writer (67% of 732 observations) were connected with ripples referable to the above origin.

Interference ripples

These ripples occur only in shallow water, down to a depth of 1.5 m (Fig. 4). They are due to the interference of waves caused by differentiated refraction in their shoreward advance. Their most common outline is pentagonal or hexagonal. The square or the rhomboid pattern is rather rare. Their longer axis ranges from 15 to 25 cm, with the ridges up to 4 cm in height. However, they are of no great significance for the offshore under consideration because they are readily destroyed.

No current ripples have as yet been described from the offshore areas of tideless seas. In the offshore of the Baltic Sea they are caused by longshore

currents and rip currents (Fig. 6) which are rather small as compared with the rip currents of the ocean shores. They have been observed in the lows after a storm (Figs 5 and 8).

The current ripples formed by rip currents stretched as belts several meters in width and up to some tens of meters in length. Ripples very much like those in the lows occurred side by side with current ripples more variable in shape and dimensions (Fig. 7a), encountered in the belt chiefly affected by the action of the current. Their average spaces are from 20 to 30 cm, the height 2—3 cm. They have a high ripple symmetry index ($RSI = 10-15$). Linguoid ripples are common, too (Fig. 7b); in the lateral parts of the area affected by the action of the current they are irregular, formed by a transformation of the asymmetrical wave ripples (Fig. 7c).

Rhomboid ripples

These occur sporadically in the shallowest part of the offshore, at a depth below 1—1.5 m. They are minute, with spaces 10—15 cm, 1—2 mm in height, easily destructible and rare.

DISTRIBUTION OF SMALLSCALE RIPPLES IN THE OFFSHORE ZONE

Three main distribution patterns of ripples have been distinguished within the offshore zone based on the conditions of the waving, viz. those associated with storms, with the strong waving and the weak waving (Fig. 8). Local differences may occur within the three distribution patterns of the ripples; they are connected with the action of the rip currents, of the translation waves and the interference waves.

Stormy conditions

The greatest part of the sea floor is covered by asymmetrical wave ripples (Fig. 8, I) encountered even at a depth of 7—8 meters. The symmetrical wave ripples, almost exclusively rounded, occur in the deeper parts (below 6—8 m) of the lows. In the axial parts of these lows stretch elongated belts of current ripples formed by longshore current. Owing to the excessively active "upper flow regime" there are no ripples over parts of the sea floor less than 3—4 m in depth.

Strong waving conditions

Under these conditions, ripples being then formed occur side by side (at depths below 6—7 m) with previously formed ripples that are usually poorly reworked. The area occupied by the symmetrical wave ripples increases as compared with that under stormy conditions. The asymmetrical ripples are then formed at smaller depths than under stormy conditions. No ripples are formed in the top of ball one and ball two.

The ripples associated with conditions of strong waving, also their distribution pattern, may be regarded as most representative of the area.

Since observations of the sea floor could only be made with the wind not stronger than 3B, two examples of the distribution pattern of ripples associated

with strong waving are shown (Fig. 8). One of them (Fig. 8,IIb) concerns ripples actually observed, with the sea at 2—3B; the other one (Fig. 8,IIa), gives the probable distribution of ripples in a sea at 3—5B, as based on the waving, the morphology of the sea bottom and of the ripples that persisted after a calming down of the sea.

Weak waving conditions:

Ripples occur down to a depth between 3 and 4 m (Fig. 8, III) where only symmetrical wave ripples are formed. The asymmetrical ripples form on the top of the first ball only, sporadically on that of the second ball. The current ripples and the linguoid ripples occur only within the area of the action of the local rip currents. At depths exceeding 3—4 m there are ripples formed previously under strong waving.

Under these conditions the most characteristic occurrence is that of wave metaripples encountered chiefly on the slopes of ball one and ball two.

Under conditions of weak waving, one may distinguish many varieties of ripple which occupy small areas of the sea floor close to the shoreline.

COMPARATIVE REMARKS

Ripples in the offshore zones of other tideless water basins display notable analogies with the ripples here described. The differences concern mainly the frequency of occurrence of the particular types of wave ripples, their dimensions and distribution pattern. They are due foremost to the varying action of the waves on each particular bottom surface. Thus, for example, at the bottom of the offshore of Lake Michigan (Evans 1941, 1943; Wulf 1963; Davis 1965) there are hardly any other ripples besides the symmetrical ones, while the asymmetrical ripples are encountered only at small depths. This is due to smaller wave dimensions as compared with those in the Baltic Sea. The lack of descriptions of current ripples from the offshore zones of tideless water basins may be explained not so much by the absence of the pre-requisite conditions as by the lack of direct observations under suitable waving conditions.

Descriptions of ripples from the shorezones of seas with distinct tides are by far the more numerous. This more particularly concerns the tidal flat areas. The ones most fully worked out are the ripples from the Dutch shorezone of the North Sea (e.g. van Straaten 1953a,b; 1959, 1961; Sternberg 1967), from the German shorezone (e.g. Reineck 1963, Reineck & Wunderlich 1968) and from the Atlantic shorezone of the USA and of Canada (e.g. Tanner 1958, 1960, 1963, 1965, 1967; Trefethen & Dow 1960). Within the shorezone of the tidal seas, however, the process of waving does not terminate within the offshore, but may, during high tide, also occur within the foreshore. The ripples of these areas are often very complex in origin, because of the simultaneous action of the waves and currents jointly with that of the swash. For these reasons the Baltic offshore zone is more favourable for studies of the wave-formed ripples.

The types of ripples encountered in the tidal shorezones coincide with those in the tideless shorezones. The differences consist chiefly in the greater dimensions of ripples from the tidal shorezones. Megaripples, only sporadic in the Baltic shorezones, occur there side by side with the ordinary ripples. The areas occupied there by the particular sets of ripples are bigger, too. The current

ripples, both ordinary and linguoid, are much more common and occur over larger areas of the bottom, more especially within major tidal channels.

Changes in the distribution pattern of ripples, in their characteristics and orientation to the shoreline as well as in the direction of the movement of asymmetrical forms are more frequent in the tidal areas where they depend on the direction of the water movement during high and low tide. The tidal and the longshore currents are responsible for additional complications. These processes result in the strong differentiation of ripples which are subject to periodical diurnal changes.

CONCLUSIONS

In view of the absence of tides and the strong uniformity of the floor deposits, the offshore of the southern Baltic Sea is an area providing considerable facilities in the study of wave ripples.

An analysis of the types of ripples and of their distribution pattern within the offshore zone is of great value for the sedimentological investigations of fossil deposits. Particularly important here is the observed lack of differences in the list of ripples from the tidal flat areas and that from the offshore zones without tides (as illustrated by the Baltic offshore). The differences between these two kinds of shorezones consist in the varying dimensions of ripples, in the size of the area they occupy and the occurrence frequency of the particular types of ripples. Their observation in the fossil deposits is rather difficult owing to the limited dimensions of the outcrops. The essential value of the studies here reported is that, they are the first to record the presence within a non-tidal offshore of ordinary and linguoid current ripples formed by longshore currents and rip currents.

On an analysis of the types of ripples, their dimensions, shape and frequency, the offshore of the Baltic Sea has been subdivided into two zones: the deeper offshore at a depth of more than 4–5 m and the shallower offshore whose depth is less than 4–5 meters.

The deeper offshore

The ripples in this zone have big dimensions, long, usually straight ridges, on the whole a low ripple index and ripple symmetry index (Chart 1). No ripples are formed here under weak waving conditions while those occurring at the sea floor had been previously formed. Under conditions of strong and stormy waving the greater part of the bottom in this zone is covered by asymmetrical wave ripples. The symmetrical ripples here are confined to the lows in whose axial parts current ripples are encountered, too. The wave ripples of this zone of the offshore display the greatest differences in the direction of the ridges in relation to that of the shore (average 15° – 35° , maximum 60°).

The shallower offshore

The ripples in the shallower offshore are of smaller dimensions, with shorter ridges, often flattened, strongly curved, with bifurcations and V-shaped juts. The ripple index and ripple symmetry index are higher than within the deeper offshore. (Chart 1).

The ripples in the shallower offshore form mostly under weak waving conditions. Those most common are symmetrical wave ripples while the asymmetrical ripples occur only on the top of bars and near the shore. The current ripples are confined to areas subject to the action of weak rip currents. Meta-ripples and interference ripples are common here, rhomboid ripples are also sporadically encountered. No ripples form in this zone under strong or stormy waving because of the great mobility of the water which also causes the destruction of previously formed ripples.

Within the shallower offshore, lying nearer to the land, at a depth below 1—2 m, the features of ripples here described are strongly emphasized. This applies particularly to the flattening of the ridges of asymmetrical ripples, the frequent bifurcation of ripples, their strong curving, and large numbers of meta-ripples. These characters — “the shallow water ripple marks varieties” after Tanner (1963, 1967) are sufficiently distinct to be regarded as reliable features of shallow-water deposits.

*Institute of Geology
of the Warsaw University
Warszawa 22, Al. Zwirki i Wigury 93
Warsaw, March 1970*
