

## **BIOFOULING PLATFORMY WIERTNICZEJ NA MORZU BAŁTYCKIM**

Kur Jarosław<sup>1)</sup>, Igliński Piotr<sup>2,3)</sup>, Galant Grzegorz<sup>3)</sup>, Mioduchowska Monika<sup>4,5,6)</sup>

<sup>1)</sup> Empty Spaces Research w Pruszczu Gdańskim

<sup>2)</sup> Lotos Petrobaltic S.A in Gdańsk, Poland<sup>2)</sup> Lotos Petrobaltic w Gdańsku

<sup>3)</sup> Politechnika Gdańska, Katedra Elektrochemii, Korozji i Inżynierii Materiałowej w Gdańsku

<sup>4)</sup> Uniwersytet Łódzki, Katedra Zoologii Bezkręgowców i Hydrobiologii w Łodzi

<sup>5)</sup> Uniwersytet Gdański, Katedra Genetyki Ewolucyjnej i Biosystematyki w Gdańsku

<sup>6)</sup> Uniwersytet Gdański, Zakład Badań Planktonu Morskiego w Gdyni

### **STRESZCZENIE**

Biofouling potocznie nazywany jest „lekcją od natury”. Obecnie rządy i przemysł wydają ponad 5,7 miliarda USD rocznie, aby kontrolować biofouling w morzach i oceanach, który stanowi nagromadzenie fauny i flory na podwodnych konstrukcjach, co w efekcie prowadzi do różnych problemów technicznych i ekologicznych. Natomiast Morze Bałtyckie jest definiowane jako „wehikuł czasu”, ponieważ zmiany w nim zachodzące aktualnie stanowią odzwierciedlenie przyszłych zmian środowiskowych w innych regionach morskich i oceanicznych. Nasze badania przedstawiają zbiorowiska makrobentosu pobranego z 12 lokalizacji położonych na różnych głębokościach nóg platformy wiertniczej „Baltic Beta”. Zidentyfikowaliśmy maksymalnie do 1300 osobników na 400 cm<sup>2</sup>. Przeanalizowaliśmy: przestrzenne rozmieszczenie dominujących organizmów morskich żyjących na stalowej powierzchni platformy, ich liczebność i masę. Badania nie wykazały znaczących różnic w masie próbek bentosowych pomiędzy różnymi głębokościami i kierunkami geograficznymi. Nasze badania mogą pomóc w przewidywaniu rozwoju biofoulingu na innych urządzeniach w Morzu Bałtyckim, identyfikacji występowania gatunków inwazyjnych i oszacowaniu obciążenia konstrukcji podwodnych.

**Słowa kluczowe:** porastanie konstrukcji, biomasa, wydajność hydrodynamiczna, gatunki inwazyjne, epifauna.

---

### ARTICLE INFO

PolHypRes 2021 Vol. 75 Issue 2 pp. 41 – 56

**ISSN:** 1734-7009 **eISSN:** 2084-0535

**DOI:** 10.2478/phr-2021-0010

Strony: 16, rysunki: 6, tabele: 1

**page www of the periodical:** [www.phr.net.pl](http://www.phr.net.pl)

#### **Publisher**

Polish Hyperbaric Medicine and Technology Society

**Typ artykułu:** oryginalny

**Termin nadesłania:** 14.02.2021 r.

**Termin zatwierdzenia do druku:** 44.03.2021 r.



## WSTĘP

Pojęcie „biofouling” odnosi się do niepożądanego gromadzenia się materiału biologicznego na sztucznych strukturach [1]. The Offshore Renewables Joint Industry Programme for Ocean Energy opisuje biofouling jako „rafę” i „wprowadzenie nierodzących gatunków inwazyjnych” [2]. Sztuczne podłoże stanowi idealne miejsce dla rozwoju zasiedlających organizmów morskich. Jednak zbiorowiska organizmów biofoulingu rozwijające się na sztucznych podłożach nie przypominają tych, które tworzą się na naturalnych rafach [3,4,5,6]. Biofouling jest wreszcie ważnym czynnikiem dla projektantów konstrukcji i wpływa na wydajność hydrodynamiczną, ale do tej pory nie został uznany, przez organy regulacyjne, za kluczowy czynnik strategiczny w przemyśle odnawialnej energii morskiej [1].

Niewiele wiadomo na temat skutków porostania konstrukcji metalowych na morzu, chociaż niektóre badania przeprowadzone na takich obiektach obejmowały fermy wiatrowe czy też platformy wiertnicze [7,8]. W środowisku wodnym biofilmy zwiększają korozję konstrukcji metalowych [9]. Informacje te mogą pomóc w zarządzaniu pracami konserwacyjnymi lub doborze specyfikacji powłoki ochronnej a także w przewidywaniu „jak chronić urządzenia” i zredukować koszty zarządzania obiektem [10]. Det Norske Veritas [11] opublikował normy offshore, zgodnie z którymi w obliczeniach hydrodynamicznych obciążeń falowych i prądowych należy uwzględniać hydrodynamikę konstrukcji podwodnej z powodu zwiększenia średnicy zewnętrznej elementu konstrukcyjnego. Natomiast ilość porastających konstrukcję organizmów zależy od głębokości i orientacji elementu strukturalnego konstrukcji [12,13].

Poszukiwania złóż ropy naftowej i gazu ziemnego na obszarach morskich nie zostały jeszcze mocno rozwinięte. Niemniej skala tego przemysłu może w niedalekiej przyszłości wzrosnąć. Obecnie w planach są zakrojone na szeroką skalę eksploatacje szeregu złóż naftowych na morskim terytorium należącym do Polski, a także Rosji. Niestety, tak istotne dane biologiczne opisujące społeczność biofoulingu na platformach morskich są ciągle nieliczne i dotyczą głównie platform wiertniczych oraz ferm wiatrowych [14,15,16].

Większość bezkręgowców bentosowych wytwarza swobodnie pływające larwy, które unoszą się w toni wodnej. Rozwój pelagiczny i bierna dyspersja skutkują niskim zróżnicowaniem genetycznym wśród populacji gatunków bentosowych [17]. Do tej pory opisano 4000 gatunków na elementach podwodnych w morzach i oceanach [18]; jest to jednak bardzo mały odsetek znanych gatunków morskich [19]. Ponadto zbiorowiska biofoulingu na sztucznych strukturach mogą sprzyjać dyspersji gatunków inwazyjnych [1]. Co ciekawe, badania biofoulingu, przeprowadzone w rejonie Morza Północnego, ograniczały się w dużej mierze do przewidywań dotyczących porostania konstrukcji i skupiały się na organizmach ważnych pod względem obciążenia hydrodynamicznego i procesu korozji [14,15,16,17].

Bioróżnorodność i sukcesja epifauny na sztucznych urządzeniach zlokalizowanych w południowym rejonie Morza Bałtyckiego została zbadana przez Bałazy i in. [24] oraz [25,26,27]. Adaptacja gatunków do słonawych warunków środowiskowych Morza Bałtyckiego przyczyniła się do powstania różnic zarówno na poziomie morfologicznym, jak i genetycznym w porównaniu z gatunkami słono- i słodkowodnymi [17]. Na powierzchni obiektów zanurzonych na ogół odnotowuje się od dwóch do trzech gatunków organizmów bezkręgowych i około 25 razy większą liczbę osobników (ale nie bioróżnorodność) niż w środowisku dna morskiego [24].

Morze Bałtyckie może służyć jako „wehikuł czasu” do przewidywania konsekwencji współczesnych zmian ekologicznych, ponieważ zmiany zachodzące w tym akwenie pojawiają się w przyszłości w innych zbiornikach [28]. Liczne gatunki zasiedlające Morze Bałtyckie reprezentują unikalne linie ewolucyjne i charakteryzują się mniejszą różnorodnością genetyczną w porównaniu z organizmami zasiedlającymi Morze Północne [29,30,31]. Co ciekawe, Coolen i in. [32] zasugerowali, że epifauna wykorzystuje sztuczne struktury jako miejsca pośrednie do rozprzestrzeniania się na obszary, które są zbyt odległe, aby dotrzeć do nich w ciągu jednego pokolenia. Uważamy, że epifauna na nogach platformy cechuje się gradientem zależnym od głębokości (liczba osobników i bioróżnorodność zmniejsza się wraz z głębokością) i zależy od głównych kierunków świata. Średnie roczne kierunki wiatrów i siły prądów morskich na głębokościach 5 m i 40 m są znacząco różne, co może mieć wpływ na skład gatunkowy i ich akumulację ilościową. Tym samym niniejsza praca prezentuje badania nad gatunkami makrobentosu tworzące zbiorowisko biofoulingu na platformie „Baltic Beta” na Morzu Bałtyckim. Przetestowano dwie główne hipotezy badawcze, tj. 1) masa biofoulingu-makrobentosu maleje wraz z głębokością, 2) skład gatunkowy i częstość występowania zbiorowisk makrobentosu zależy od kierunków geograficznych lub głębokości wody.

## MATERIAŁY I METODY

Morze Bałtyckie (Ryc. 1) to ewolucyjnie młody ekosystem morski [29]. Gradient zasolenia występujący na obszarze Morza Bałtyckiego wynosi od 25 do 2 w Zatoce Botnickiej. Wraz z tym gradientem gatunki morskie, ze względu na ograniczoną tolerancją na niskie zasolenie, zastępowane są przez gatunki słodkowodne [33].

W Morzu Bałtyckim występuje wiele czynników stresogennych (m.in. eutrofizacja, ocieplenie, niska zawartość tlenu, zakwaszenie) [28]. Obecnie w Morzu Bałtyckim stwierdzono 132 gatunki inwazyjne (ang. *non-indigenous species*, NIS) [34]. Gatunki obce stanowią w sumie około 30% ogólnej liczby taksonów makrofauny zasiedlającej przybrzeżny rejon Zatoki Gdańskiej [35], i ich liczba stale rośnie. Na podstawie przeprowadzonego wieloletniego monitoringu akwenu Morza Bałtyckiego można zaobserwować szybko postępującą globalną presję, w szczególności związaną z ociepleniem wód i otaczającego obszaru zlewni, co może zmniejszyć skuteczność obecnych działań ochroniarskich [28]. Beztlenowe „martwe strefy” powiększają się na całym świecie, ale szczególnie drastyczny 10-krotny wzrost, występujący głównie na większych głębokościach, zaobserwowano w ciągu ostatnich 115 lat w Morzu Bałtyckim [36].

Platforma „Baltic Beta” (Ryc. 2), znajduje się na polu naftowym „B-3” około 80 km na północ od miasta Rozewie (Ryc. 1). Platforma została posadowiona w 1993 roku. „Baltic Beta” ma 3 pary nóg, a każda noga ma 3 kolumny połączone układem ukośnych i poziomych elementów. Metalowa konstrukcja została pokryta farbą antyporostową. Nogi platformy osadzone są na dnie morza na głębokości 80 m (Ryc. 2). Miejsca pobierania próbek charakteryzują się dużymi rocznymi wahaniami temperatury wody morskiej na powierzchni (temperatura wody powierzchniowej waha się od poniżej punktu zamrzania

zimą do powyżej 20°C latem); na większych głębokościach temperatura jest stała (około 3–4°C).

Obszar pobierania próbek (Ryc. 2) znajdował się przy współrzędnych geograficznych GPS 55°28'50.67"N i 18°10'54.03"E na jednej nodze platformy (odnoga 2 i 12 stanowisk w kolumnach 1, 2 i 3). Badanie zostało przeprowadzone 1 sierpnia 2018 r. Wszystkie prace związane z pobieraniem próbek wykonane przez nurka komercyjnego zgodnie z polskimi przepisami. Do oznaczenia obszaru poboru wykorzystano kwadratową ramkę o średnicy 20×20 cm, a cały materiał został zeszkrobany przez nurka i umieszczony w pojemniku. Grubość warstwy organizmów mierzono za pomocą skalibrowanej linijki w miejscu pobierania prób. Materiał utrwalono w 70% alkoholu etylowym. Ponadto przeprowadzono inspekcje wizualne ROV (*Remotely Operated Vehicle Saab Seaeye Falcon*) w celu określenia maksymalnej głębokości biofoulingu na nogach platformy „Baltic Beta” i sąsiedniej platformy „PG-1” (zbudowanej pod koniec lat 90.).

W laboratorium zidentyfikowano i policzono zebrane organizmy. Metoda pobierania próbek nie zapobiegła ucieczce większości gatunków szybko poruszających się (skorupiaki mogły uciec, co prawdopodobnie tłumaczy stosunkowo niewielką liczbę odnotowanych gatunków ruchliwych).

Masę i liczebność wyrażono w jednostkach na 400 cm<sup>2</sup> (wraz z muszlami). Wagę stanowiła zawartość netto materiału w objętości 1000 ml; masa zebranego materiału i etanolu podtrzymującego w objętości 1000 ml. Masę średnią i błąd standardowy (w przedziale 95%) obliczono dla 4 głębokości: 5 m, 10 m, 20 m i 36 m (z różnych kierunków geograficznych). Dla danych obliczono współczynnik korelacji R<sup>2</sup> Pearsona dla regresji, dla liczby osobników makrobentosu i masy prób dla każdej głębokości i kierunków geograficznych. Indeks podobieństwa wykorzystano do ilościowego określenia różnic w składzie gatunkowym i liczebności między różnymi miejscami pobierania prób. Algorytm Bray-Curtis, oparty na sparowanej grupie, został wykorzystany do hierarchicznego grupowania UPGMA w oprogramowaniu PAST 4.1.

## WYNIKI

Zebrano łącznie 7445 organizmów makrobentosowych. Odnotowano spadek masy próbek wraz z głębokością (Ryc. 3). Zaobserwowano również mniejszą masę na kolumnie 2 nogi w porównaniu z innymi kolumnami platformy (Ryc. 4). Współczynnik korelacji Pearsona (Ryc. 3), w tym wartość korelacji R<sup>2</sup> oraz wielkość próby zestawiono w Tabeli 1. Masa epifauny, w powiązaniu z analizą kierunków geograficznych, nie była skorelowana ( $p > 0,05$ , Tabela 1). Należy zauważyć, że w jednym przypadku (36 m) wartość  $p$  osiągnęła poziom 0,13. Wystąpił trend wzrostu masy próbki z południa na północ. Nie mamy jednak wystarczających dowodów potwierdzających tezę, że istnieją różnice w masach próbek i kierunków geograficznych. Podobne wyniki uzyskaliśmy analizując regresję masy do głębokości (Ryc. 3); wartość  $p$  osiągnęła trend 0,27 i R<sup>2</sup> = 0,19 (Tab. 1) i można było stwierdzić, że głębokość nie była skorelowana z masą prób. Pewne korelacje jednak były widoczne, ale nasze analizy były utrudnione ze względu na małą liczbę prób, z drugiej strony wyniki nie różniły się istotnie, co wskazywało na stałą masę i grubość porastającego biofoulingu.

Zaobserwowano 7 grup organizmów makrobentosowych (Ryc. 3). Liczba osobników w każdej grupie miała tendencję do zmniejszania się wraz ze wzrostem głębokości (Ryc. 4). Niektóre gatunki znaleziono tylko na głębokości 5 m. Zależność między liczebnością a głębokością analizowano dla 4 najliczniejszych grup (Ryc. 4), korelacja była istotna tylko dla Amphipoda (R<sup>2</sup> = 0,59,  $p = 0,021$ , Tab. 1). Niektóre wyniki zbliżone do progu istotności uzyskano dla *Mytilus* sp., wartość  $p = 0,22$ , jednak korelacja wynosiła R<sup>2</sup> = 25 (Tab. 1).

Podobnie jak w przypadku pąkli, na powierzchni muszli znajdowano obunogi, a ich liczba zmniejszała się wraz z głębokością. Najwięcej obunogów stwierdzono na stanowiskach płytkich (na 10 lub 5 m, w zależności od kolumny). Stwierdzono również stadia larwalne organizmów bytujących w zbiorowiskach biofoulingu. Turbellaria i *Enteromorpha* występowały w minimalnej liczbie, a badania tych organizmów mogą wymagać innej metodyki pobierania prób.

Zespoły biofoulingu osiągnęły średnią grubość około 50 mm w każdym miejscu pobierania prób, najczęściej w wyniku procesu warstwowego porastania organizmów. Warstwa wewnętrzna została utworzona przez *Mytilus* sp. (100% pokrycia powierzchni na każdej stacji). Największa zaobserwowana długość skorupy dochodziła do 40 mm. Grubość tej warstwy wewnętrznej miejscami dochodziła do 100 mm (w narożach rur konstrukcyjnych). Pąkle *Amphibalanus improvisus* rosły na muszlach małży, tworząc w ten sposób wielowarstwową strukturę, która zależnie od głębokości, składała się z różnej liczby organizmów (maksymalna głębokość wynosiła 20 m, Ryc. 3). Biofouling zawierający małże i skorupiaki był odnotowywany do głębokości 50 m na każdej nodze, a także na tej samej głębokości na towarzyszącej platformie PG1 (inspekcja ROV). Najmniejsza głębokość pobierania prób wynosiła 5 m. Na nogach „Baltic Beta” obserwowaliśmy duże nagromadzenie glonów na głębokości około 1 m, Jednak na głębokości 5 m występowały one tylko na jednym stanowisku.

Hierarchiczne grupowanie wskaźnika podobieństwa Bray-Curtis (Ryc. 6) wykazało trzy główne skupienia próbek; następnie te 3 grupy podzielono na 4. Główny rezultat jest taki, że społeczności można podzielić na 2 główne grupy: „płytkie i głębokie”. Próbkę analizowaną na 5 i 10 m różniły się od grup na 20 i 36 m.

## DYSKUSJA

Powstawanie zbiorowisk biofoulingu-makrobentosu zależy od wielu czynników biotycznych i abiotycznych, takich jak: drapieżnictwo, konkurencja, położenie geograficzne, światło, głębokość, temperatura, zasolenia, warunki hydrodynamiczne, lód, topografia dna i morfologia podłoża [1,11]. Do tej pory występowanie epifauny na platformie wiertniczej „Baltic Beta” nie było badane i nigdy też nie była usuwana z nóg platformy. Nie podjęto również żadnych działań w celu jego ograniczenia, ani nie było też masowego skażenia powodującego jej śmiertelność. Det Norske Veritas [11] opublikował dane wskazujące, że biofouling na głębokości od 2 m do 40 m może osiągnąć 100 mm i 40 mm poniżej głębokości 40 m w środkowej i północnej części Morza Północnego oraz 60 mm (2 do 40 m) i 30 mm (poniżej 40 m) w Morzu Norweskim. Grubość sięgająca 200 mm jest powszechna w przybrzeżnej Afryce oraz w środkowej i południowej Kalifornii. Biofouling w Morzu Bałtyckim (50–100 mm) wydają się mieć mniejsze rozmiary niż w akwenie Morza Północnego, co jest głównie spowodowane odmiennym składem gatunkowym siedlisk [1,11].

*Mytilus* sp., będący filtratorem odżywiającym się głównie fitoplanktonem, był dominującym komponentem badanych zbiorowisk. Omułki są silnymi konkurentami o przestrzeń ze względu na szybki wzrost. Podobnie jak w naszych badaniach, *Mytilus* sp. był jednym z dominujących organizmów w strefie głębokości do 30 m [1,24]. Na platformie Baltic Beta występował do głębokości 50 m, ale został również zidentyfikowany na głębokościach poniżej 50 m w innych lokalizacjach, co może wskazywać, że zasięg jest ograniczony zanikiem lub zmniejszoną zawartością tlenu na dużych głębokościach (Kur niepublikowane).

W eksperymencie kolonizacyjnym przeprowadzonym w wodach przybrzeżnych Morza Bałtyckiego, dwa gatunki były dominującymi konkurentami, tj. *Amphibalanus improvisus* i *Mytilus* sp., i osiągnęły grubość 2 cm w ciągu 2 miesięcy [37]. W eksperymentalnej małej hodowli długość muszli omułków po 3 latach osiągnęła w Zatoce Gdańskiej maksymalnie 40 mm [38]. Podobne maksymalne rozmiary muszli (40 mm) zaobserwowano w naszym badaniach, gdzie proces kolonizacji rozpoczął się około 30 lat temu (od momentu budowy platformy). Początkowo prawdopodobieństwo osiedlenia się pąkli i omułków na nowej konstrukcji było w przybliżeniu równe, ale procent pokrycia *Amphibalanus improvisus* i *Mytilus* sp. zmniejszał się wraz z głębokością [37]. Spadek ten może być jednak efektem opóźnionego zasiedlenia organizmów na większych głębokościach lub mniejszej ilości zawieszanej materii stałej (ang. *suspended particulate matter*, SPM), głównego zasobu pożywienia filtratorów [34,38]. Można dodać, że przedstawiciele zebranych gatunków są w tych częściach Morza Bałtyckiego gatunkami kosmopolitycznymi.

W wyniku przeprowadzonego grupowania UPGMA (Ryc. 6) epifauna została podzielona na zbiorowiska związane z występowaniem na poszczególnych głębokościach. Zbiorowiska wykazują podobny skład organizmów do głębokości 20 m oraz różnią się od zbiorowisk poniżej 20 m. Otrzymane wyniki są spójne z wcześniejszymi pracami innych autorów [24,27,37]. Ogólny wniosek jest taki, że płytkie zbiorowiska składają się z większej liczby gatunków. Witalis i in. [27] znaleźli sześć gatunków epifauny i sześć taksonów powiązanej fauny ruchomej osiedlającej się na sztucznych panelach zlokalizowanych w trzech portach południowego Bałtyku. Międzynarodowe porty morskie i platformy wiertnicze to siedliska silnie zaburzone przez działalność antropogeniczną. W portach bogactwo gatunkowe było większe, mimo że panele wystawione były na osiedlenie tylko przez 12 miesięcy.

My znaleźliśmy mniejszą liczbę gatunków, a epifauna nigdy nie była usuwana z nóg bałtyckiej platformy Baltic Beta. Może to też wynikać z faktu, że na nogach platformy panuje duża konkurencja o przestrzeń gatunków inwazyjnych, co może ograniczać liczbę innych gatunków. Większa liczba gatunków w portach może być wynikiem wpływów wód słodkowodnych, co mogło skutkować wzrostem bioróżnorodności.

Rywalizacja o przestrzeń i pożywienie między *Amphibalanus improvisus* and *Mytilus* sp. jest powszechnym zjawiskiem, zwykle rozpoczynającym się na początku sukcesji, kiedy omułki tworzą warstwę na powierzchni pąkli. W trakcie sukcesji rozwija się odwrócona stratyfikacja (pąkle rozwijają się na omułkach), co świadczy o możliwym komensalizmie między tymi gatunkami [37].

Omułki w swoim cyklu rozwojowym mają planktoniczną fazę larwalną, trwającą zwykle 3-4 tygodnie, ale w Morzu Bałtyckim etap ten może trwać nawet 5-6 tygodni, co daje możliwość rozprzestrzeniania się na duże odległości. Żyją około 12 lat, a czas generacji wynosi 1-2 lata. Pąkle natomiast rosną bardzo szybko i w ciągu trzech tygodni mogą osiągnąć średnicę 5 mm, a gatunek może mieć trzy pokolenia w jednym sezonie letnim. Osiedlając się na *Mytilus* sp. preferują tylny koniec muszli, w pobliżu syfonów wdechowych i wydechowych omułka, tj. mogą korzystać z prądu żywieniowego omułka [39].

Występowanie większej liczby osobników w stosunkowo mniejszej masie na małej głębokości może uchronić je przed narażeniem na działanie fal i jest ważnym czynnikiem określającym strukturę zbiorowiska organizmów morskich [40,41]. Całkowita liczba osobników *Mytilus edulis* znalezionych na bojach oznaczających w Brofjorden wyniosła 3792. Średnia biomasa *Mytilus edulis* na bojach oznaczających wynosiła  $11,3 \pm 3,2$  kg/m<sup>2</sup> i była istotnie wyższa na bojach odsoniętych niż osłoniętych. W naszym przypadku trudno było porównać masy próbek, ponieważ mieliśmy inną metodykę pomiaru, ale mogliśmy porównać liczbę osobników. Znaleźliśmy około 838 osobników na obszarze 400 cm<sup>2</sup>, interpolacja daje około 2095 osobników na 1000 cm<sup>2</sup>, ale nasze próbki nie zostały zebrane na powierzchni. Turbulencje wody przy powierzchni są większe niż na 10-15 m. McLachlan i in., [41] postulowali, że osłonięty brzeg utrzymuje więcej gatunków makrofauny niż odsłonięte brzegi, a chroniony brzeg ma niższą biomasę niż odsłonięty. Ponadto badania terenowe wykazały pozytywne zależności między prędkością prądu, wielkością i różnorodnością podajników zawieszenia [16,32]. W niniejszym badaniu nie stwierdziliśmy statystycznego związku z kierunkami prądu lub działania fal. Z drugiej strony wzięliśmy pod uwagę średni roczny kierunek wiatru i prądów na głębokościach, co nie wykluczało prądów i wiatrów z innych kierunków.

*Amphibalanus improvisus* może występować w gęstościach do kilku tysięcy na m<sup>-2</sup>; znaleźliśmy maksymalnie 287 osobników na 1000 cm<sup>2</sup>. Bałazy i in. [24] stwierdzili obfite (średnio 379 os./144 cm<sup>2</sup>) zbiorowiska i potwierdzili, że różnice w strukturze zbiorowiska między różnymi obiektami były obecnie prawdopodobnie związane ze zmiennymi środowiskowymi związanymi z głębokością na płytkich stanowiskach. Amfipoda nie były oznaczane do poziomu gatunku, jednak istniało duże prawdopodobieństwo, że wśród stosunkowo licznej grupy znalazły się gatunki uznane za inwazyjne. Ich nagromadzenie było stosunkowo wysokie w porównaniu z innymi badaniami. Jednak nogi platformy mogą być miejscem „odpoczynku” w drodze przyszłej dyspersji gatunków inwazyjnych. Gatunki inwazyjne zostały znalezione na polskim wybrzeżu i na wyspie Bornholm, która leży w promieniu 100 km od platformy [42].

Glony mogą dominować na nogach platformy przy samej powierzchni, gdzie może przenikać światło, podczas gdy małże mogą dominować głębiej w słupie wody [38]. Zielone algi występują sporadycznie na głębokościach większych niż 1 m na obiektach podwodnych [24].

Wiele badań skupiało się na czynnikach kontrolujących osiadanie [1,2] i rozwój środków przeciwporostowych. Odkryliśmy, że na głębokości do 10 m muszle były przyłączone do podłoża znacznie silniej niż na głębszych poziomach. Nasze badania nie były w stanie ocenić wpływu epifauny na występowanie korozji lub ewentualnych zmian w strukturze metalu. Tworzy to interesujący temat do przyszłych badań. Można też argumentować, że usunięcie epifauny z podwodnych konstrukcji spowoduje jedynie tymczasowe zmniejszenie liczebności organizmów. Po usunięciu biofoulingu rozpoczyna się kolonizacja i zasiedlanie drobnoustrojów na podłożu, a powrót do stanu wyjściowego następuje po kilku miesiącach.

## WNIOSKI

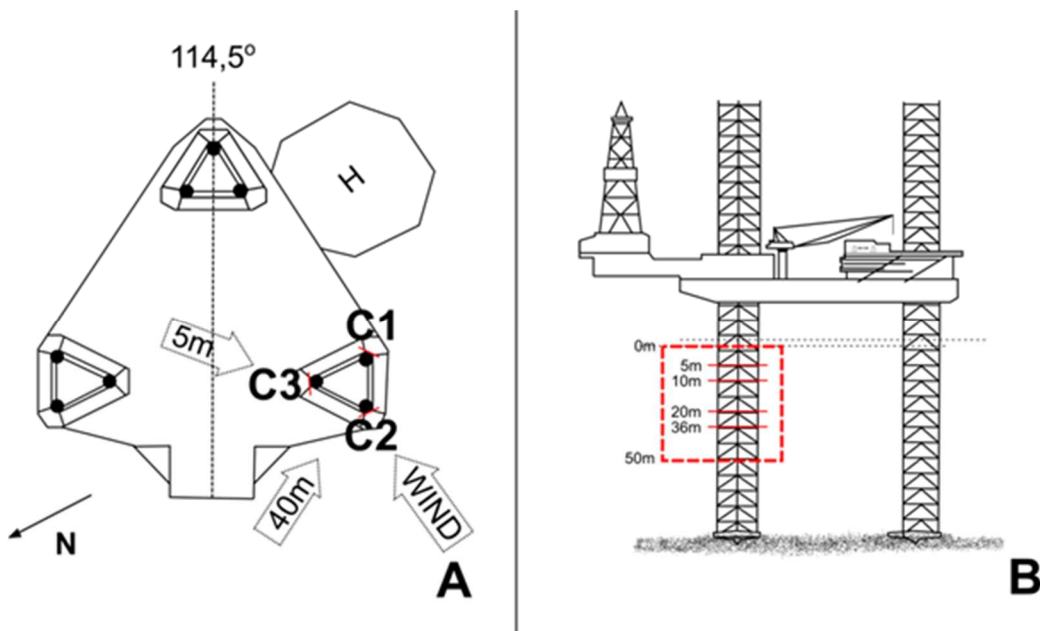
Nie zostały potwierdzone żadne istotne statystycznie różnice w biomacie organizmów makrobentosowych, biorąc pod uwagę głębokość czy kierunki geograficzne. Przemysłowe podwodne konstrukcje pionowe w Bałtyku są dość równomiernie pokryte porastającym makrobentosem, który tworzy wielowarstwową strukturę o grubości 5-10 cm do głębokości 50m. Nasze wyniki można uznać za uniwersalne dla konstrukcji zanurzonych budowanych w tym regionie, a zaobserwowane cechy biofoulingu są ważnym czynnikiem w przyszłych projektach i obliczeń obciążenia pionowych konstrukcji zanurzonych. Ponadto zaobserwowaliśmy niewielką zmienność liczby taksonów niezależnie od głębokości. Należy również zwrócić uwagę na 2 kwestie: konstrukcje mogą zwiększać bioróżnorodność na małych głębokościach. Z drugiej strony każda struktura morska jest wektorem przenoszenia nierodzimych gatunków inwazyjnych na większych odległości. Stają się one „sztucznymi wyspami” lub „przystankami autostopowicza” dla inwazyjnej fauny. Poziom bałtyckiej strefy beztlenowej jest tak naprawdę „martwą strefą” nawet dla inwazyjnych organizmów wszechobecnych poniżej 50 m tym regionie.

## PODZIĘKOWANIE

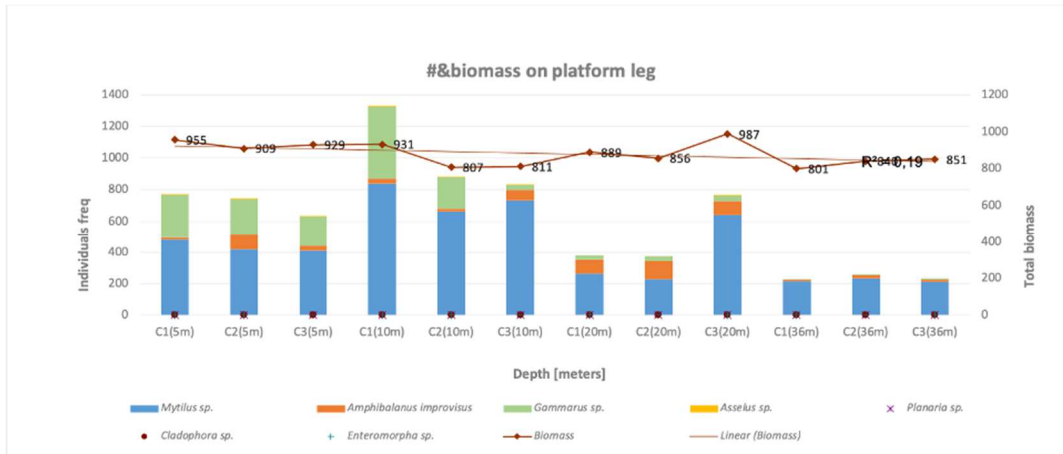
*Serdecznie dziękujemy wszystkim, którzy pomogli w przygotowaniu tego manuskryptu: pracownikom i dyrekcji Lotos Petrobaltic, firmie Aquaworks oraz Akademii Marynarki Wojennej. Duże podziękowania należą się również: Jerzemu Maculewiczowi, Sławomirowi Szczęsnemu, Markowi Rewersowi, Stanisławowi Skrzyńskiemu i wielu innym osobom, które brały udział w przygotowaniu i realizacji nurkowań saturowanych w Morzu Bałtyckim.*



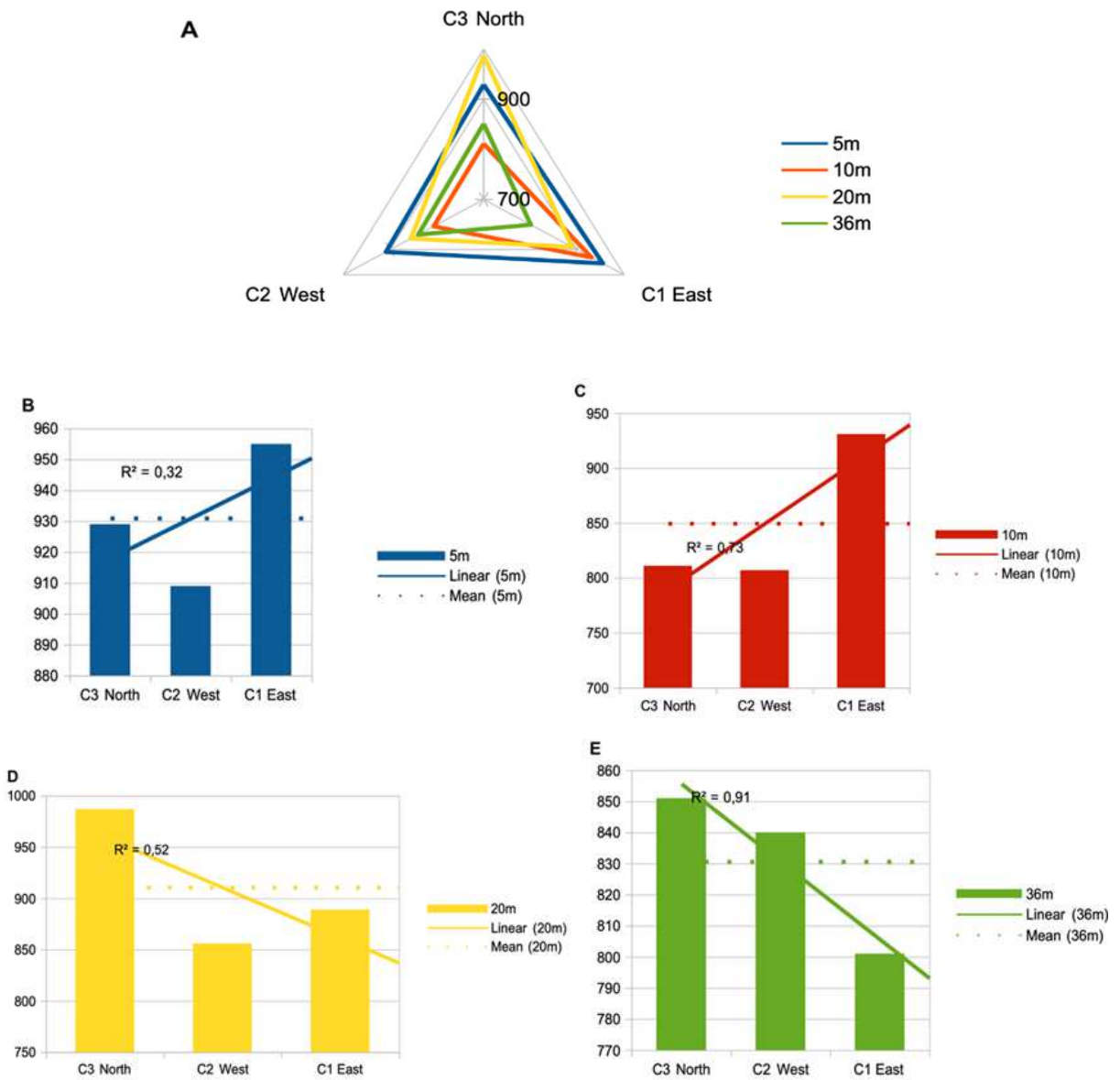
Rys. 1 Lokalizacja platformy "Baltic Beta".



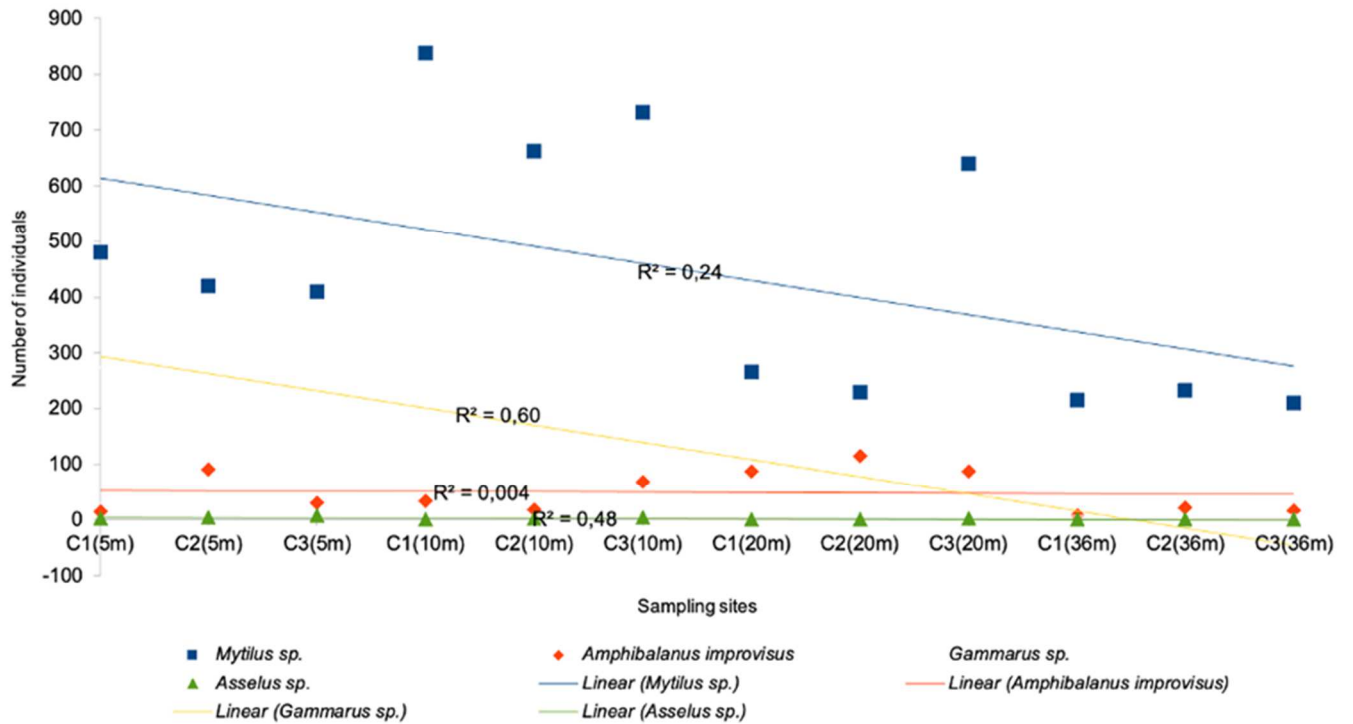
Rys. 2 "Baltic Beta" na powierzchni i pod wodą z zaznaczonymi stanowiskami badawczymi. A: widok z góry oraz kierunki geograficzne, C1-C3 – kolumny nogi platformy wiertniczej. Oszacowanie średnich rocznych kierunków: wiatrów i prądów morskich na głębokościach 5 m i 40 m odczytane z rycin Jędrasika i Kowalewskiego [43]. B: przekrój z zaznaczonymi głębokościami stacji pobierania próbek.



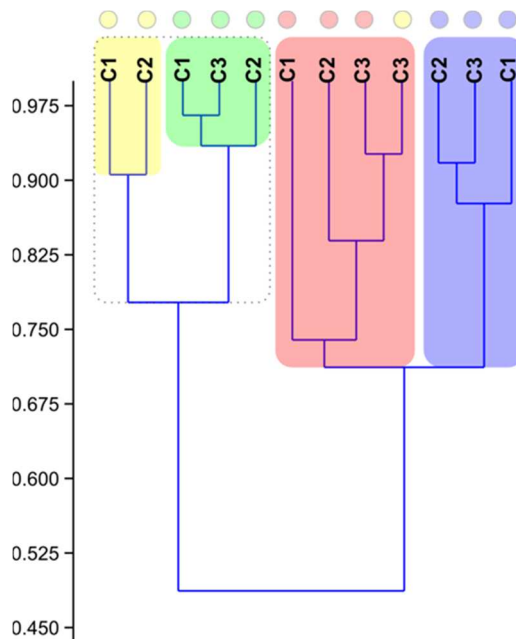
Rys. 3 Zagęszczenie (słupki) i biomasa (punkty) biofoulingu na stanowiskach: (C1, C2, C3) i głębokościach (5,10,20, 36 m) na nogach konstrukcji platformy „Baltic Beta”. Dodatkowo prawa oś zawiera wartość współczynnika R2.



Rys. 4 A: biomasa prób na różnych geograficznie miejscach poboru prób (C1, C2, C3). B: R2 dla głębokości 5m. C: R2 dla głębokości 10m. D: R2 dla głębokości 20m. E: R2 dla głębokości 36m. Głębokości są oznaczone kolorami, niebieski to 5 m, czerwony to 10 m, 20 m to żółty i 36 m zielony.



Rys. 5 Liczba osobników występujących na różnych stanowiskach i na różnych głębokościach oraz wyliczony współczynnik korelacji R<sup>2</sup> dla liczby osobników poszczególnych grup organizmów oraz głębokości.



Rys. 6 Hierarchiczne grupowanie podobieństwa Braya-Curtisa między próbkami. Algorytm oparty jest na sparowanej grupie (UPGMA). C1, C2, C3 - nazwy kolumn nogi platformy, głębokości są oznaczone kolorami (niebieski to 5 m, czerwony to 10 m, 20 m to żółty i 36 m zielony).



Tabela główna składa się z 4 części (wyniki istotne/zbliżone do istotności statystycznej wyróżniono pogrubioną czcionką).

A: wyniki R<sup>2</sup>, N – liczba próbek w teście oraz wartość P istotności regresji w masie próbek na głębokości 5 m - masa maleje R<sup>2</sup> = 0,32 z południa na północ. Na 10 m maleje z południa na północ R<sup>2</sup> = 0,73. Na głębokości 20 m zwiększa się z południa na północ R<sup>2</sup> = 0,52. Na 36 m zwiększa się z południa na północ R<sup>2</sup> = 0,32. B: regresja wagi prób związana z głębokością (opis w kolumnie jw). C: spadek liczby organizmów wraz z głębokością (opis w kolumnie jw).

A Test R <sup>2</sup>	R <sup>2</sup>	N	p-value
5m	0,32	3	0,39
10m	0,73	3	0,23
20m	0,52	3	0,32
36m	0,91	3	0,13
B Mass/depth	R <sup>2</sup>	N	p-value
	0,19	12	0,27
C Individ./depth	R <sup>2</sup>	N	p-value
<i>M. trossulus</i>	0,24	12	0,22
<i>A. improvisus</i>	0,004	12	0,49
Amphipods	0,59	12	0,02
Isopods	0,48	12	0,57
Turbellaria	n/a		
Enteromorpha	n/a		
Cladophora	n/a		

## LITERATURA

1. Miller RG, Macleod AK. Marine growth mapping and monitoring: feasibility of predictive mapping of marine growth. A report by SAMS Research Services Ltd to the Offshore Renewable Energy Catapult, Glasgow, UK, 2016; 51;
2. ORJIP "ORJIP Ocean Energy: The Forward Look; an Ocean Energy Environmental Research Strategy for the UK (Report No. P627)", Report by Aquatera Ltd. Report for the Crown Estate, 2015;
3. Connell SD. Urban structures as marine habitats: an experimental comparison of the composition and abundance of subtidal epibiota among pilings, pontoons and rocky reefs. *Marine Environmental Research* 2001; 52:115-125. DOI 10.1016/S0141-1136(00)00266-X;
4. Svane I, Petersen JK. On the problems of epibioses, fouling and artificial reefs, a review. *Marine Ecology-Pubblicazioni Della Stazione Zoologica Di Napoli I.* 2001; 22:169-188. DOI 10.1046/j.1439-0485.2001.01729.x;
5. Knott NA, Underwood AJ, Chapman MG, Glasby TM. Epibiota on vertical and on horizontal surfaces on natural reefs and on artificial structures. *Journal of the Marine Biological Association of the United Kingdom* 2004; 84:1117-1130. DOI 10.1017/S0025315404010550h;
6. Petersen JK, Malm T. Offshore windmill farms: Threats to or possibilities for the marine environment. *Ambio* 2006 35: 75-80. DOI 10.1579/0044-7447(2006)35;
7. Whomersley P, Picken GB. Long-term dynamics of fouling communities found on offshore installations in the North Sea. *Journal of the Marine Biological Association of the United Kingdom* 2003; 83:897-901. DOI 10.1017/S0025315403008014h;
8. Wilhelmsson D, Malm T. Fouling assemblages on offshore wind power plants and adjacent substrata. *Estuarine Coastal and Shelf Science* 2006; 79:459-466. DOI 10.1016/j.ecss.2008.04.020;
9. Beech IB, Sunner J. Biocorrosion: towards understanding interactions between biofilms and metals. *Current Opinion Biotechnology* 2004; 15:181-186. DOI 10.1016/j.copbio.2004.05.001;
10. Miller RG, Macleod AK. Marine Growth Mapping and Monitoring: Feasibility of Predictive Mapping of Marine Growth. A report by SAMS Research Services Ltd to the Offshore Renewable Energy Catapult. Glasgow, UK, 2016; 51;
11. DNV- Design of Offshore Wind Turbine Structures. Offshore Standard DNV-OS-J101 2014;
12. Eashwar M, Subramanian G, Chandrasekaran P, Manickam ST, Maruthamuthu S, Balakrishnan K. The interrelation of cathodic protection and marine macrofouling. *Biofouling* 1995; 8(4):303-312. DOI 10.1080/08927019509378283;
13. Mallat C, Corbett A, Harris G, Lefranc M. Marine Growth on North Sea Fixed Steel Platforms: Insights From the Decommissioning Industry. in: ASME 2014 33rd International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering. American Society of Mechanical Engineers; 2014. DOI 10.1115/omae2014-23352;
14. Forteath NR, Picken GB, Ralph R, William J. Marine growth studies on the North Sea oil. *Marine Ecology - Progress Series* 1982; 8:61-68. DOI 10.3354/meps008061;
15. Langhamer O, Wilhelmsson D, Engström J. Artificial reef effect and fouling impacts on offshore wave power foundations and buoys - a pilot study. *Estuarine Coastal and Shelf Science* 2009; 82(3):426-432. DOI 10.1016/j.ecss.2009.02.009;
16. Mallat C, Corbett A, Harris G, Lefranc M. Marine growth on North Sea fixed steel platforms: insights from the decommissioning industry. 33rd International Conference on Ocean, Offshore and Arctic Engineering, American Society of Mechanical Engineers 2014; DOI 10.1115/omae2014-23352;
17. Bohonak AJ. Dispersal, gene flow, and population structure. *The Quarterly Review of Biology* 1999; 74:21e45. DOI 10.1086/392950;
18. Langhamer O. Colonization of blue mussels (*Mytilus edulis*) on offshore wave power installations. in: *Biofouling: Types, Impact and Anti-Fouling* Editors: Jun Chan and Shing Wong; 2010: 14;
19. Crisp DJ. Overview of research on marine invertebrate larvae, 1940-1980. in: Tipper RC (Eds.), *Marine Biodeterioration: An Interdisciplinary Study*. Annapolis, Maryland: Naval Institute Press 1984; 103-127. DOI 10.1007/978-1-4615-9720-9\_15;
20. Freeman JH. The marine fouling of fixed offshore installations. Dept. of Energy, Offshore Technology Paper 1977; 1:1-16;
21. Goodman KS, Ralph R. The marine growth industry. *Offshore Engineering* 1979; 113-117;
22. Ralph R, Troake RP. Marine growth on North Sea oil and gas platforms. in: 12th. Annual Offshore Technology Conference 1980; 4:49-51. DOI 10.4043/3860-ms;



23. Ralph R, Goodman KS, Picken G. Marine growth corrosion problems: the need for a central information unit. in: Symposium on marine corrosion on offshore structures, Society of Chemical Industry's Aberdeen Section and Materials Preservation Group 1981; 63-70. 1981. DOI10.1016/j.marstruc.2020.102881;
24. Bałazy B, Copeland U, Sokolowski A. Shipwrecks and underwater objects of southern Baltic – Hard substrata islands in the brackish, soft bottom marine environment. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 2019; 225:106240. DOI 10.1016/j.ecss.2019.05.022;
25. Sokolowski A, Ziółkowska M, Bałazy P, Plichta I, Kukliński P, Mudrak-Cegiołka S. Recruitment pattern of benthic fauna on artificial substrates in brackish low-diversity system (the Baltic Sea). *Hydrobiologia* 2016; 784:125–141. DOI 10.1007/s10750-016-2862-z;
26. Sokolowski A, Ziółkowska M, Bałazy P, Kukliński P, Plichta I. Seasonal and multi-annual patterns of colonisation and growth of sessile benthic fauna on artificial substrates in the brackish low-diversity system of the Baltic Sea. *Hydrobiologia* 2017; 790:183–200. DOI 10.1007/s10750-016-3043-9;
27. Witalis B, Iglukowska A, Ronowicz M, Kukliński P. Biodiversity of epifauna in the ports of Southern Baltic Sea revealed by study of recruitment and succession on artificial panels. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 2021; 249:107107. DOI 10.1016/j.ecss.2020.107107;
28. Reusch T, Dierking J, Andersson H, Bonsdorff E, Carstensen J, Casini M et al. The Baltic Sea: a time machine for the future coastal ocean. *Science Advances* 2018; DOI 10.1126/sciadv.aar8195;
29. Johannesson K, Andre C. Invited review: life on the margin: genetic isolation and diversity loss in a peripheral marine ecosystem, the Baltic Sea. *Molecular Ecology* 2006; 15:2013e2029. DOI 10.1111/j.1365-294x.2006.02919.x;
30. Johannesson K, Smolarz K, Grahn M, Andre C. The future of Baltic Sea populations: local extinction or evolutionary rescue? *AMBIO: Journal Of the Human-Environmental System* 2011; 40:179-190. DOI10.1007/s13280-010-0129-x;
31. Larsson J, Lind EE, Corell H, Grahn M, Smolarz K, Lönn M. Regional genetic differentiation in the blue mussel from the Baltic Sea area. *Estuarine, Coastal and Shelf Science* 2017; 195: 98-109. DOI 10.1016/j.ecss.2016.06.016;
32. Coolen JWP, Boon AR, Crooijmans R, van Pelt H, Kleissen F, Gerla D, et al. Marine stepping-stones: Connectivity of *Mytilus edulis* populations between offshore energy installations. *Molecular Ecology* 2020; 29:686–703. DOI 10.1111/mec.15364;
33. Ojaveer H, Jaanus A, Mackenzie BR, Martin G, Olenin S, Radziejewska T. et al. Status of biodiversity in the Baltic Sea. *PLOS ONE* 2010; 5:e12467. DOI 10.1371/journal.pone.0012467;
34. Ojaveer H, Olenin S, Narscius A, Florin AB, Ezhove E, Gollasch E, et al. Dynamics of biological invasions and pathways over time: A case study of a temperate coastal sea. *Biological Invasions* 2017; 19:799–813. DOI 10.1007/s10530-016-1316-x;
35. Janus U, Kendzierska H. Benthic non-indigenous species among indigenous species and their habitat preferences in Puck Bay (southern Baltic Sea). *Oceanologia* 2014; 56(3):603–628 DOI 10.5697/oc.56-3.603;
36. Carstensen J, Andersen HJ, Gustafsson BH, Conley DJ. Deoxygenation of the Baltic Sea during the last century. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, PNAS 2014; 111:5628–5633. DOI 10.1073/pnas.1323156111;
37. Dziubański A, Szaniawska A. Short-term study on the early succession stages of fouling communities in the coastal zone of Puck Bay (southern Baltic Sea). *Oceanological and Hydrobiological Studies* 2010. 39(4):3-16. DOI 10.2478/v10009-010-0055-z;
38. Minnhagen S. Farming of blue mussels in the Baltic Sea. A review of pilot studies. Kalmar municipality, 2017;
39. Laihonon P, Furman ER. The site of settlement indicates commensalism between bluemussel and its epibiont. *Oecologia* 1986; 71: 38-40. DOI 10.1007/bf00377317;
40. Rainbow PS, Fiałkowski W, Sokolowski A, Smith BD, Wolowicz M. Geographical and seasonal variation of trace metal bioavailabilities in the Gulf of Gdansk, Baltic Sea using mussels (*Mytilus trossulus*) and barnacles (*Balanus improvisus*) as biomonitors. *Marine Biology* 2004; 144:271–286. DOI 10.1007/s00227-003-1197-2;
41. McLachlan A, Lombard HW, Louwrens S. Trophic structure and biomass distribution on 2 East Cape Rocky Shores. *South African Journal of Zoology* 1981; 16:85-89. DOI 10.1080/02541858.1981.11447738;
42. Rewicz T, Grabowski M, Tończyk G, Konopacka A, Bącela-Spychalska K., *Gammarus tigrinus* Sexton, 1939 continues its invasion in the Baltic Sea: first record from Bornholm (Denmark). *BiolInvasions Records* 2019; 8. DOI 10.3391/bir.2019.8.4.14;
43. Jędrasik J, Kowalewski M. Mean annual and seasonal circulation patterns and long-term variability of currents in the Baltic Sea. *Journal of Marine Systems* 2019; 193:1-26. DOI 10.1016/j.jmarsys.2018.12.011.

**Jarosław Kur**

Empty Spaces Research  
Pruszcz Gdanski, Polska  
e-mail: jarek.kur@gmail.com