

dr Agnieszka Herman
Instytut Oceanografii
Uniwersytet Gdański

Autoreferat w języku polskim i angielskim

Załącznik nr 2 do wniosku
o przeprowadzenie postępowania habilitacyjnego

**Analiza i Modelowanie Dynamiki Lodu Morskiego
z Wykorzystaniem Metod Fizyki Materiałów Ziarnistych**

**Analysis and Modeling of Sea Ice Dynamics
with Methods used in Physics of Granular Materials**

GDYNIA, CZERWIEC 2014

AUTOREFERAT w języku polskim

1. **Imię i nazwisko:**

Agnieszka Herman

2. **Posiadane dyplomy, stopnie naukowe/ artystyczne – z podaniem nazwy, miejsca i roku ich uzyskania oraz tytułu rozprawy doktorskiej:**

magister oceanografii – 01.07.1999, Uniwersytet Gdański, Wydział Biologii, Geografii i Oceanologii

doktor nauk o Ziemi w zakresie Oceanologii – 21.11.2003, Uniwersytet Gdański, Wydział Biologii, Geografii i Oceanologii (tytuł rozprawy doktorskiej: „Efekty dyfrakcyjne w modelowaniu falowania wiatrowego”)

3. **Informacje o dotychczasowym zatrudnieniu w jednostkach naukowych/ artystycznych:**

1999 – 2003: Zakład Oceanografii Fizycznej, Instytut Oceanografii, Wydział Biologii, Geografii i Oceanologii (BGiO), Uniwersytet Gdański (stanowisko asystenta)

2003 – 2006: Coastal Research Station, Lower Saxony Water Management, Coastal Defence and Nature Conservation Agency (NLWKN), Norderney, Niemcy
(urlop bezpłatny z Uniwersytetu Gdańskiego)

2006 – obecnie: Zakład Oceanografii Fizycznej, Instytut Oceanografii, Wydział Oceanografii i Geografii (do 2008 roku: BGiO), Uniwersytet Gdański (stanowisko adiunkta)

4. **Wskazanie osiągnięcia* wynikającego z art. 16 ust. 2 ustawy z dnia 14 marca 2003 r. o stopniach naukowych i tytule naukowym oraz o stopniach i tytule w zakresie sztuki (Dz. U. nr 65, poz. 595 ze zm.):**

a. **tytuł osiągnięcia naukowego/artystycznego:**

ANALIZA I MODELOWANIE DYNAMIKI ŁODU MORSKIEGO Z WYKORZYSTANIEM METOD FIZYKI MATERIAŁÓW ZIARNISTYCH

b. **(autor/autorzy, tytuł/tytuły publikacji, rok wydania, nazwa wydawnictwa):**

Herman, A., 2010. Sea-ice floe-size distribution in the context of spontaneous scaling emergence in stochastic systems. *Phys. Rev. E*, 81, 066123, doi:10.1103/PhysRevE.81.066123.

Herman, A., 2011. Molecular-dynamics simulation of clustering processes in sea-ice floes. *Phys. Rev. E*, 84, 056104, doi:10.1103/PhysRevE.84.056104.

Herman, A., 2012. Influence of ice concentration and floe-size distribution on cluster formation in sea ice floes. *Cent. Europ. J. Phys.*, 10, 715-722, doi:10.2478/s11534-012-0071-6.

Herman, A., 2013. Numerical modeling of force and contact networks in fragmented sea ice. *Annals Glaciology*, 54, 114-120, doi:10.3189/2013AoG62A055.

Herman, A., 2013. Shear-jamming in two-dimensional granular materials with power-law grain-size distribution. *Entropy*, 15, 4802-4821, doi:10.3390/e15114802.

- c. **omówienie celu naukowego/artystycznego ww. pracy/prac i osiągniętych wyników wraz z omówieniem ich ewentualnego wykorzystania:**

WPROWADZENIE

Osiągnięcia będące przedmiotem niniejszej pracy habilitacyjnej stały się możliwe dzięki znaczącym postępom, jakie w ostatnich latach dokonały się w dwóch dotychczas niemal odrębnych dziedzinach wiedzy. Postępy te w obu przypadkach dotyczą zarówno aspektów czysto teoretycznych, jak i praktycznych, związanych z postępem technologicznym, który pozwala na coraz dokładniejsze obserwacje i coraz wydajniejsze modelowanie numeryczne analizowanych zjawisk. Przedmiotem badań pierwszej z tych dwóch dziedzin są systemy złożone z dużej liczby stosunkowo prostych, oddziałujących ze sobą elementów składowych. Przykładem takich systemów są materiały ziarniste (luźne lub spójne; naturalne lub wytworzone przez człowieka) o rozmiarach cząstek obejmujących wiele rzędów wielkości – od proszków, poprzez piasek, ziarno, kamienie i skały osadowe, aż po skupiska asteroid i gwiazd. Pomimo tak ogromnej różnorodności tych materiałów, mają one wiele cech wspólnych i dzięki temu mogą być analizowane za pomocą wspólnych metod. Najnowsze osiągnięcia fizyki materiałów ziarnistych – istotne ze względu na zagadnienia omawiane w niniejszej pracy – dotyczą m.in.: związków makroskopowych właściwości danego materiału, w tym jego odporności na naprężenia, z właściwościami w skali „mikro” (czyli cechami fizycznymi materiału, z którego zbudowane są ziarna); wpływu polidispersyjności (zróznicowania wielkości ziaren) na właściwości tych materiałów; mechanizmów powstawania zatorów (ang. *jamming*) w materiałach ziarnistych poddawanych kompresji i/lub naprężeniom ścinającym; mechanizmów przenoszenia sił i naprężeń w tych materiałach oraz właściwości topologicznych tzw. sieci sił (ang. *force networks*).

Drugą ze wspomnianych dziedzin jest fizyka lodu morskiego, w której znaczący postęp w ostatnich latach związany był głównie ze wzrostem rozdzielczości czasowej i przestrzennej zarówno danych satelitarnych (będących głównym źródłem systematycznych danych o lodzie, zwłaszcza w trudno dostępnych rejonach Arktyki i Antarktydy), jak i modeli numerycznych opisujących termodynamikę i dynamikę lodu morskiego. W obu przypadkach rozmiary, odpowiednio, pikseli lub oczek siatki numerycznej, stały się porównywalne z charakterystycznym rozmiarem przestrzennym poszczególnych kier lodowych. Wiele formalnych założeń, leżących u podstaw numerycznych modeli lodu, przestało być spełnionych – dotyczy to np. lepko-plastycznego modelu reologii lodu Hiblera, który jest wykorzystywany w niemal wszystkich wielkoskalowych modelach lodu, m.in. w tych, które są elementem globalnych modeli klimatycznych. Model Hiblera zakłada, że każde oczko siatki numerycznej zawiera dużą liczbę kier. Określenie, jaki wpływ na wyniki ma „złamanie” tego założenia, jest nietrywialne. W szerszym kontekście, obraz wyłaniający się z coraz większej ilości coraz bardziej szczegółowych danych uświadomił badaczom, że **w większości przypadków lód morski nie może być traktowany jako ciągła, lepko-plastyczna „powłoka” pokrywająca powierzchnię morza**, gdyż wiele jego wielkoskalowych właściwości jest efektem jego specyficznej struktury i wynika z oddziaływań pomiędzy poszczególnymi krami lodowymi. Mówiąc krótko, **makroskalowe cechy lodu morskiego są właściwościami emergentnymi, wynikającymi z procesów rozgrywających się w skali kier**. Procesy deformacji i kruszenia kier oraz związane z tym naprężenia

wewnętrzne wpływają na wytrzymałość mechaniczną pokrywy lodowej w skali całych akwenów, a także na wiele innych procesów fizycznych i geochemicznych zachodzących na granicy morza i atmosfery w strefie polarnej i subpolarnej. Jest z tym związany cały szereg sprzężeń zwrotnych. Przykładowo, zmniejszona wytrzymałość mechaniczna lodu, związana z jego fragmentacją, ułatwia propagację falowania w głąb pokrywy lodowej, co prowadzi do dalszej fragmentacji i dezintegracji lodu. W warunkach sprzyjających topnieniu procesom tym sprzyja dodatkowy czynnik: topnienie boczne, którego tempo bardzo silnie rośnie wraz ze wzrostem całkowitego obwodu kier, a więc ze spadkiem ich średniego rozmiaru, na danym obszarze. Podobnych mechanizmów i współzależności jest więcej, a ich działanie może prowadzić do gwałtownych zmian stanu pokrywy lodowej w bardzo krótkim czasie, spowodowanych pozornie „błahym” czynnikiem jak np. pojedynczy sztorm. Dobrym przykładem takiej sytuacji jest rozpad pokrywy lodowej na ogromnym obszarze Morza Beauforta, jaki miał miejsce w lutym i marcu 2013 i jest dobrze udokumentowany na zdjęciach satelitarnych (np. <http://earthobservatory.nasa.gov/IOTD/view.php?id=80752>). Zdarzenia tego typu mają szczególne znaczenie w świetle zmian klimatu w rejonach polarnych i roli, jaką lód morski odgrywa w jego kształtowaniu.

OSIĄGNIĘCIE – CHARAKTERYSTYKA OGÓLNA

Podstawowa idea leżąca u podstaw niniejszej pracy polega na potraktowaniu lodu morskiego jako materiału ziarnistego, w którym „ziarnami” są kry lodowe oddziałujące pomiędzy sobą i poruszające się po powierzchni morza pod wpływem sił pochodzących z morza i/lub atmosfery.

Jednym z głównych celów jest lepsze zrozumienie dynamiki lodu w skali „mikro” (porównywalnej z rozmiarami kier) – co do tej pory niemal nie było badane – a także zrozumienie wpływu procesów zachodzących w skali „mikro” na makroskopowe cechy i zachowanie pokrywy lodowej.

W przyszłości pozwoli to na stworzenie lepszych modeli parametryzujących poszczególne procesy dynamiczne zachodzące w lodzie, a w konsekwencji przyczyni się do powstania lepszych wielkoskalowych modeli lodu i bardziej wiarygodnych prognoz zmian klimatu.

Zasadniczym osiągnięciem mojej pracy jest wykorzystanie i połączenie możliwości i najnowszych dokonań w obu wymienionych we wstępie dziedzinach wiedzy.

Oznacza to, przede wszystkim, **wykorzystanie i dostosowanie metod i modeli wykorzystywanych w badaniach materiałów ziarnistych do badania dynamiki lodu morskiego.**

Podstawowym efektem pracy jest **nowoczesny model numeryczny, oparty na metodzie elementów skończonych** (ang. *discrete element method*, DEM), **umożliwiający symulację dynamiki lodu złożonego z poszczególnych kier o różnych rozmiarach.** Stworzenie tego modelu wymagało zarówno prac natury teoretycznej (wyprowadzenie i analiza odpowiednich równań itp.), jak i numerycznej (opracowanie odpowiednich algorytmów; implementacja równań i algorytmów w kodzie programu; testowanie i weryfikacja programu).

Co niezwykle istotne, model będący rezultatem tych prac nadaje się nie tylko do badania lodu morskiego, lecz również do szerszej klasy dwuwymiarowych materiałów ziarnistych o bardzo szerokim rozkładzie rozmiarów ziaren. **Otrzymane wyniki posiadają innowacyjne aspekty nie tylko jeśli chodzi o dynamikę lodu morskiego, ale pozwalają również na lepsze zrozumienie zagadnień związanych z wpływem silnej polidispersyjności materiałów – niezależnie od szczegółów ich budowy – na ich właściwości makroskopowe.**

Wyrazem interdyscyplinarnego charakteru tych osiągnięć jest fakt, że wzbudzają one zainteresowanie zarówno wśród badaczy lodu morskiego, jak i w środowisku fizyków zajmujących się materiałami ziarnistymi. Wyniki mojej pracy zostały opublikowane w czasopiśmie z obu tych dziedzin oraz zaprezentowane zarówno na konferencjach o wąskiej tematyce dotyczącej lodu morskiego (np. *International Symposium on Seasonal Snow and Ice* w Lahti w Finlandii w 2011 roku;

Fall Meeting of the American Geophysical Union w San Francisco, USA w 2013 roku – referat na zaproszenie), jak również na konferencjach dotyczących fizyki statystycznej czy metod obliczeniowych o szerokim zastosowaniu do systemów złożonych (np. *International Conference on Statistical Physics „Sigma Phi”* w Larnace w 2011 roku; *Conference on Particle-Based Methods “Particles”* w Stuttgarcie w 2013 roku).

OSIĄGNIĘCIE – CHARAKTERYSTYKA SZCZEGÓŁOWA

Zgodnie z informacją podaną w punkcie 4a, **osiągnięcia składające się na moją pracę habilitacyjną zawarte są w pięciu publikacjach w czasopismach z Journal Citation Reports (JCR). Ich łączny Impact Factor wynosi 8.748, a łączna wartość punktowa 145** (zgodnie z Wykazem Czasopism Naukowych MNiSW z 2013r.). Wyniki opisane w tych publikacjach są odzwierciedleniem stopniowych postępów moich prac nad efektami ziarnistej struktury lodu morskiego oraz nad modelem teoretycznym i numerycznym, który te efekty uwzględnia. W związku z tym, zamieszczony poniżej opis najważniejszych rezultatów poszczególnych publikacji, w kolejności ich ukazywania się, w naturalny sposób porządkuje wyniki składające się na moje osiągnięcie habilitacyjne.

- i. Herman, A., 2010. **Sea-ice floe-size distribution in the context of spontaneous scaling emergence in stochastic systems.** *Phys. Rev. E*, 81, 066123, doi:10.1103/PhysRevE.81.066123.

Jak zostało wspomniane we wstępie, współczesne wielkoskalowe modele lodu morskiego traktują go jak ośrodek ciągły, najczęściej lepko-plastyczny lub elastyczno-lepko-plastyczny. Podejście takie jest wydajne obliczeniowo, jednak posiada cały szereg ograniczeń i w wielu sytuacjach daje wyniki obarczone znacznym błędem, zwłaszcza w warunkach silnych deformacji lodu w krótkich skalach czasowych, na obszarach położonych w pobliżu granicy lodu z otwartą wodą lub granicy stałego lodu przybrzeżnego z pakiem lodowym, a także w cieśninach – wszędzie tam, gdzie dynamika lodu „rozgrywa się” w szerokim zasięgu skal przestrzennych i czasowych, czyli gdy „dochodzi do głosu” specyficzna, ziarnista struktura lodu.

Jedną z podstawowych właściwości materiałów ziarnistych jest rozkład wielkości elementów – ziaren, cząstek, a w przypadku lodu morskiego: kier – składających się na ten materiał. **Lód morski wyróżnia się na tle większości materiałów ziarnistych niezwykle silną polidispersyjnością.** W większości przypadków rozkład wielkości kier (ang. *floe-size distribution*, FSD) jest bardzo szeroki, potęgowy lub zbliżony do potęgowego ($P(x) \sim x^{-1-\alpha}$), co oznacza, że **rozmiary kier na danym obszarze obejmują kilka rzędów wielkości, od około metra do kilkuset, a czasami nawet kilku tysięcy metrów średnicy.** Od czasu pierwszej pracy na ten temat, w której Rothrock i Thorndike (1984) zwrócili uwagę na fraktalny, niezależny od skali charakter pokrywy lodowej, opublikowano wiele artykułów dotyczących obserwowanych FSD na różnych obszarach i w różnych warunkach (patrz Tabela 1 w omawianej pracy Herman 2010). Do dzisiaj nie istnieje jednak żadna teoria ani model, które wyjaśniałyby obserwowane zróżnicowanie wartości wykładnika α (ogólnie, wartości te są przeważnie większe w pobliżu granicy lodu niż w głębi paku lodowego) oraz występujące czasami odchylenia FSD od rozkładu potęgowego. Odchylenia te były na ogół w przeszłości tłumaczone ograniczoną rozdzielczością oraz zasięgiem przestrzennym zdjęć lodu (ang. *finite-size effects*), na podstawie których wyznaczano FSD. Dopiero niedawno Toyota i inni (2006) oraz Steer i inni (2008) zwrócili uwagę na to, że takie wyjaśnienie jest niewystarczające. Głównym, ogólnym celem mojego artykułu było zwrócenie uwagi, że FSD może być postrzegane jako rozwiązanie modelu opisującego w sposób statystyczny procesy

fragmentacji i konsolidacji pokrywy lodowej. Mówiąc krótko, kształt FSD może być otrzymany jako wynik modelowania. Co więcej, mechanizmy decydujące o tym kształcie są najprawdopodobniej uniwersalne, w tym sensie, że dają się opisać za pomocą równań analogicznych do tych, jakie opisują zachowanie innych systemów złożonych. W pracy zaproponowałam prosty model statystyczny, zaczerpnięty z popularnych w dziedzinie ekologii, ekonomii i nauk społecznych badań nad systemami autokatalitycznymi – tzw. Generalized Lotka-Volterra (GLV). W modelu GLV jako własność emergentna otrzymywana jest funkcja gęstości prawdopodobieństwa o kształcie bardzo dobrze opisującym obserwowane FSD w pełnym zakresie wielkości kier. Model ten, co prawda, nie przyporządkowuje jednoznacznie poszczególnych członów w równaniach do procesów prowadzących do powstawania nowych kier – czyli nie podaje pełnego wyjaśnienia roli, jaką procesy te odgrywają w kształtowaniu FSD – ale sugeruje innowacyjny sposób ich analizy i interpretacji. Jest to zupełnie nowe, interdyscyplinarne spojrzenie, otwierające drogę do bardziej zaawansowanych modeli podobnego typu, które przyczynią się do zrozumienia czynników kształtujących FSD w różnych warunkach. Fascynujący aspekt tych badań dotyczy poszukiwania podobieństw i różnic pomiędzy systemami złożonymi z różnych, często pozornie bardzo odległych od siebie dziedzin.

- ii. Herman, A., 2011. **Molecular-dynamics simulation of clustering processes in sea-ice floes.** *Phys. Rev. E*, 84, 056104, doi:10.1103/PhysRevE.84.056104.

Centralnym zagadnieniem poprzedniego artykułu były procesy kształtujące rozkład wielkości kier lodowych (FSD). Kolejne prace stawiają pytanie odwrotne: **w jaki sposób FSD wpływa na dynamikę pokrywy lodowej oraz jej reakcję na siły wymuszające**. Jest to pierwszy z ciągu artykułów, w których lód morski modelowany jest jako dwuwymiarowy materiał ziarnisty, złożony z cylindrycznych kier poruszających się po powierzchni morza pod wpływem sił zewnętrznych (wiatr, prądy morskie etc.) i oddziałujących ze sobą zgodnie z mechaniką materiałów semi-elastycznych. Pierwszy z tych artykułów koncentruje się na procesach zachodzących w lodzie o średniej koncentracji ($0 < A < 1$), tzn. w sytuacji, gdy oddziaływania pomiędzy sąsiednimi krami zdominowane są przez częściowo niesprężyste (współczynnik odbicia $0 < \epsilon < 1$) zderzenia prowadzące do dyssypacji części energii kinetycznej. Jedną z charakterystycznych właściwości tego typu materiałów, wynikającą bezpośrednio z warunku $\epsilon < 1$, jest tendencja do tworzenia skupisk (klastrów) cząstek, czyli rejonów o lokalnie zwiększonej koncentracji materiału (np. Goldhirsch i Zanetti 1993). Zachowuje się tak również lód morski: powstawanie skupisk kier na powierzchni morza jest regułą, nie wyjątkiem. Poza podstawowym, wspomnianym wyżej mechanizmem ich powstawania, w przypadku lodu morskiego istnieją dwa dodatkowe, bardzo istotne czynniki. Pierwszym jest duże zróżnicowanie wielkości poszczególnych kier (czyli szeroki, potężowy FSD). Drugim – reakcja na zewnętrzne siły wymuszające zależna od wielkości kry. Ponieważ część sił zewnętrznych jest proporcjonalna do powierzchni górnej/dolnej, a część do powierzchni bocznej kier, nawet przy stałej prędkości wiatru i/lub prądu wypadkowa siła działająca na kry duże i małe nie jest jednakowa, a w efekcie różne są prędkości i przyspieszenia poszczególnych kier. Prowadzi to do powstawania bardzo charakterystycznych skupisk kier, w obrębie których małe kry gromadzą się wzdłuż krawędzi dużych. Jest to powtarzalny „wzorzec”, bardzo często widoczny na zdjęciach lotniczych i satelitarnych lodu morskiego.

W omawianej pracy procesy te są analizowane za pomocą modelu analogicznego do tych, jakich używa się do modelowania gazów ziarnistych. Podstawą modelu jest założenie, że zderzenia są binarne i nieskończenie krótkie (ang. *hard-disk model*), a algorytm postępuje od

jednego zderzenia do następnego, wyznaczając pozycje i przyspieszenia wszystkich cząstek (kier) składających się na modelowany system (ang. *event-driven algorithm*). Opracowany model opiera się na kodzie programu napisanego w 100% samodzielnie w programie Matlab. Model jest wykorzystany do analizy prostej sytuacji, w której zbiór N kier poddany jest działaniu stałego, zadanego wiatru oraz prądu w warunkach stałej koncentracji lodu $A = \text{const}$. Podstawowa analiza równań ruchu pokazuje, że w takich warunkach zarówno stała czasowa, jak i „docelowa” prędkość równowagi kier zależna jest od ich promienia – tym silniej, im większa grubość lodu. Jak pokazały wyniki symulacji, klastry kier w tych warunkach poruszają się ze średnią prędkością równą średniej ważonej prędkości równowagi kier wchodzących w skład danego klastra: duże kry są „hamowane” przez małe, którym stale przekazują energię kinetyczną, popychając je przed sobą. Co niezwykle istotne, **rozkład wielkości klastrów dla danej koncentracji lodu A jest rozkładem potęgowym, podobnie jak FSD, jednak wartość wykładnika tego rozkładu jest inna – i silnie zależna od A** : im wyższa koncentracja lodu, tym większy wykładnik potęgi α , a więc tym węższy rozkład wielkości klastrów. Ponadto, symulacje wykazały istnienie dwóch reżimów, wyznaczanych przez rozmiar największego klastra na analizowanym obszarze. Gdy koncentracja lodu jest niska, kry tworzą dużą liczbę oddzielnych klastrów, a rozmiary największych z nich są porównywalne z rozmiarami największych kier. Gdy koncentracja lodu jest wysoka, ponad 90% powierzchni lodu tworzy jeden dominujący klaster, obejmujący cały modelowany obszar. Wąski zakres koncentracji lodu o charakterze przejściowym pomiędzy tymi dwoma reżimami charakteryzuje się bardzo ciekawą dynamiką, z ciągłą „przebudową” struktury klastrów; przejście to ma charakter przejścia fazowego (ang. *percolation phase transition*).

O ile mi wiadomo, **praca ta jest pierwszą, w której analizowane są możliwe mechanizmy prowadzące do powstawania skupisk kier na powierzchni morza**. Sam fakt istnienia tych skupisk został zauważony przez Toyotę i współpracowników (2011), którzy zasugerowali, że mogą one odgrywać istotną rolę w tworzeniu „nowych” kier poprzez zamarzanie boczne w obrębie klastrów. W połączeniu z opisywanymi tutaj wynikami modelowania, sugeruje to istnienie interesującego sprzężenia zwrotnego: FSD, decydując o powstawaniu klastrów kier, prowadzi do modyfikacji kształtu wyjściowego FSD, co znowu wpływa na powstawanie klastrów. Ze względu na wpływ FSD na wiele procesów zachodzących na granicy atmosfery i oceanu (przekazywanie pędu między morzem a atmosferą, propagacja fal wiatrowych w paku lodowym, tempo topnienia bocznego lodu, transmisja światła przez lód, wymiana gazów, etc.), lepsze poznanie tego typu mechanizmów ma wartość nie tylko poznawczą, lecz również praktyczną, m.in. w kontekście zmian klimatu w rejonach polarnych (np. Asplin i inni, 2014), żeglugi w lodzie i życia biologicznego na obszarach zlodzonych.

Artykuł ten (podobnie jak poprzedni) został przyjęty do druku bez poprawek, a recenzenci podkreślali potencjalne szersze znaczenie wyników dla zrozumienia roli dynamiki lodu w kształtowaniu klimatu.

W tym właśnie kontekście **o najważniejszych wynikach pracy doniósł portal internetowy „Physics – Spotlighting Exceptional Research” Amerykańskiego Towarzystwa Fizycznego (American Physical Society):**

<http://physics.aps.org/synopsis-for/10.1103/PhysRevE.84.056104>.

Wyniki tej pracy zostały też przeze mnie zaprezentowane na konferencjach: Gordon Research Conference „Exploring Complex Systems in Polar Marine Science” (Ventura, Kalifornia, USA; marzec 2011) oraz International Conference on Statistical Physics "SigmaPhi" (Larnaca, Cypr; lipiec 2011).

- iii. Herman, A., 2012. **Influence of ice concentration and floe-size distribution on cluster formation in sea ice floes.** *Cent. Europ. J. Phys.*, 10, 715-722, doi:10.2478/s11534-012-0071-6.

Artykuł ten jest kontynuacją poprzedniego, a wyniki w nim zaprezentowane zostały otrzymane za pomocą tego samego modelu. Symulacje przeprowadzone na potrzeby tej pracy obejmowały szerszy zakres wartości parametrów wejściowych, a **główne zagadnienie badawcze dotyczyło związków pomiędzy koncentracją lodu oraz – przede wszystkim – kształtem FSD a cechami skupisk kier lodowych.** W szczególności, analizowana była charakterystyczna asymetria rozkładów kierunkowych kontaktów pomiędzy sąsiednimi krami w obrębie klastrów, związana z opisanym powyżej zróżnicowaniem charakterystycznych prędkości kier o różnych rozmiarach. Właściwości klastrów badane były m.in. za pomocą narzędzi zaczerpniętych z teorii grafów i sieci, jak np. spójność połączeń (ang. *network connectivity*). Pokazano m.in., że „krytyczna” koncentracja lodu, przy której następuje opisane w poprzednim artykule przejście fazowe, zależna jest od kształtu FSD: wzrost wykładnika potęgi FSD powoduje przesunięcie tego przejścia w stronę niższych wartości A . Ponadto, we wszystkich analizowanych przypadkach, wykładnik rozkładu wielkości klastrów w strefie przejściowej pomiędzy reżimami – i tylko w tej strefie – był bardzo zbliżony do wykładnika FSD. W omawianej pracy analizowane były również sytuacje dywergencji pokrywy lodowej, czyli $dA/dt < 0$ (gdzie t oznacza czas). Symulacje pokazały, że w warunkach powolnej dywergencji, gdy system „ma czas” dostosować się do zmieniających się warunków, rozpad globalnego klastra następuje stopniowo i powoli, przy znacznie niższych wartościach koncentracji lodu, niż wynikałoby to z analizy wyników obliczeń stacjonarnych. Wskazuje to na obecność histerezy i oznacza, że rozkład wielkości klastrów kier w danych warunkach zależy nie tylko od aktualnych warunków, ale również od historii (minionych stanów) systemu.

Bardzo istotny aspekt otrzymanych wyników dotyczy naprężeń wewnętrznych w lodzie o średniej koncentracji. W wielkoskalowych modelach lodu morskiego przyjmuje się standardowe założenie, że dla koncentracji lodu poniżej pewnej ustalonej *a priori* wartości (typowo równej 0,8) lód znajduje się w stanie dryfu swobodnego, a naprężenia wewnętrzne są równe zero. Dostępne modele reologii lodu uwzględniające naprężenia pochodzące od zderzeń kier nie rozwiązują problemu, gdyż są oparte na nierealistycznych założeniach o jednorodnym, równomiernym rozmieszczeniu kier na powierzchni morza; w konsekwencji, modele te dają różne od zera wartości naprężeń wewnętrznych tylko w warunkach przestrzennej zmienności sił wymuszających. **Wyniki otrzymane w opisywanych pracach pokazują jednoznacznie, że obecność klastrów kier na powierzchni morza związana jest z niezerowymi wartościami naprężeń, związanymi ze zderzeniami kier o różnych rozmiarach w obrębie klastrów.** Co więcej, opracowany model, w którym jako rozwiązanie otrzymywane są m.in. siły działające na każdą krę z osobna, pozwala w bezpośredni sposób obliczyć składowe tensora naprężeń w danych warunkach. **Stwarza to możliwość opracowania ulepszonych modeli reologii lodu złożonego z oddzielnych kier.**

- iv. Herman, A., 2013. **Numerical modeling of force and contact networks in fragmented sea ice.** *Annals Glaciology*, 54, 114-120, doi:10.3189/2013AoG62A055.

Model wykorzystywany w moich pierwszych pracach dotyczących dynamiki kier lodowych był oparty na kilku istotnych założeniach, które pozwalały stworzyć stosunkowo prosty algorytm numeryczny. Z założeniami tymi związane były pewne ograniczenia zakresu stosowalności modelu. Najważniejsze z nich dotyczyło nieskończenie krótkiego czasu trwania

poszczególnych zderzeń – jest ono spełnione tylko w sytuacjach, gdy koncentracja lodu jest na tyle niska, że nie dochodzi do powstawania (quasi-)stałych kontaktów między sąsiednimi krami. Model ten nie nadawał się więc np. do analizy deformacji zwartej pokrywy lodowej. Ponadto, w sytuacjach dużej liczby zderzeń w ciągu sekundy, np. w obrębie obszarów o lokalnie wyższej koncentracji, algorytm stawał się bardzo kosztowny obliczeniowo, co ograniczało maksymalną możliwą ilość obiektów (kier), które mogły być modelowane. Pojawiła się więc potrzeba zastąpienia tego modelu nowszym, bardziej zaawansowanym, możliwym do stosowania w znacznie szerszym zakresie warunków.

Nowy model został stworzony na bazie biblioteki numerycznej LAMMPS (Large-scale Atomic/Molecular Massively Parallel Simulator; <http://lammps.sandia.gov>), która zawiera algorytmy zaprojektowane do efektywnego, wieloprocessorowego modelowania dynamiki systemów złożonych z dużej liczby oddziałujących ze sobą obiektów (atomów, cząsteczek, ziaren itd.). **Na potrzeby modelowania lodu morskiego, zmodyfikowałam/rozszerzyłam bibliotekę LAMMPS o nowe funkcje i możliwości:** zdefiniowałam nowy typ obiektów (o cylindrycznym kształcie), zaimplementowałam wszystkie równania opisujące ruch tych obiektów na dwuwymiarowej powierzchni morza (naprężenia styczne i normalne związane z oddziaływaniem wiatru i prądu, siła Coriolisa etc.) oraz zmodyfikowałam równania opisujące siły pomiędzy stykającymi się ze sobą obiektami (ang. *contact mechanics*) tak, by nadawały się do obiektów cylindrycznych.

Opisywana praca koncentruje się na właściwościach sieci kontaktów oraz sił w pokrywie lodowej złożonej z oddzielnych kier, poddawanej różnego rodzaju odkształceniom i siłom zewnętrznym. Globalne właściwości tych sieci mogą być analizowane za pomocą, odpowiednio, tensora kontaktów (ang. *contact fabric tensor*) i tensora naprężeń wewnętrznych (ang. *internal stress tensor*), a także zmiennych otrzymywanych na podstawie wartości własnych tych tensorów (odpowiednio: średnia liczba kontaktów oraz anizotropia sieci kontaktów; ciśnienie oraz naprężenie ścinające). Wielkości te są typowo stosowane w badaniach reologii materiałów ziarnistych, jednak **ich zastosowanie do analizy lodu morskiego jest nowością.**

Sytuacje analizowane w pracy to: (i) jednorodna konwergencja pokrywy lodowej, bez wiatru; (ii) wiatr o stałej prędkości w warunkach stałej koncentracji lodu; oraz (iii) wiatr o stałej prędkości wiejący pod kątem do granicy lodu (wyidealizowana strefa marginalna paku lodowego: *marginal ice zone*).

Pierwsza z tych sytuacji pozwala prześledzić transformację pokrywy lodowej od stanu niskiej koncentracji i sporadycznych, binarnych zderzeń kier do stanu w pełni rozwiniętej, zwartej sieci kontaktów obejmującej cały modelowany obszar (ang. *jamming phase transition*). Co ciekawe, faza przejściowa pomiędzy tymi dwoma reżimami posiada wiele cech wspólnych z drugą z analizowanych sytuacji – między innymi pod względem średnich wartości ciśnienia oraz liczby kontaktów. Z drugiej strony, sieci sił i kontaktów w lodzie poddanym działaniu wiatru charakteryzują się znacznie większą anizotropią oraz różnymi od zera wartościami naprężeń ścinających, zwłaszcza przy stosunkowo niskiej koncentracji lodu, gdy opisane w poprzednich pracach zróżnicowanie reakcji kier na siły wymuszające manifestuje się najsilniej. **Lokalnie więc lód morski poddany działaniu wiatru posiada wiele cech charakterystycznych dla tzw. *shear jamming*, opisanego w ostatnich latach dla innych materiałów ziarnistych** (Bi i inni 2011). Podobne zachowanie, ze specyficznymi epizodami lokalnie zwiększonego lub zmniejszonego ciśnienia, zostało zaobserwowane w wynikach dla strefy marginalnej lodu.

Istotną cechą wspólną analizowanych przypadków jest specyficzny charakter sieci kontaktów, związany z potęgowym rozkładem wielkości kier – sieci te mają „ażurową” strukturę i są

„podtrzymywane” przez stosunkowo niewielką część wszystkich kier na danym obszarze. Ponadto, **nawet w warunkach stałych sił wymuszających, naprężenia wewnętrzne w lodzie ulegają bardzo silnym wahaniom zarówno w przestrzeni, jak i w czasie. Ma to zasadnicze znaczenie ze względu na nasze rozumienie reakcji lodu morskiego na odkształcenia, a także ze względu na możliwości i sposoby pomiaru naprężeń w lodzie *in situ*.**

Wyniki otrzymane w opisywanej pracy zostały również zaprezentowane w formie referatów na dwóch konferencjach w 2012 roku: *International Symposium on Seasonal Snow and Ice* (Lahti, Finlandia) oraz *American Geophysical Union (AGU) Fall Meeting* (San Francisco, California, USA).

- v. Herman, A., 2013. **Shear-jamming in two-dimensional granular materials with power-law grain-size distribution.** *Entropy*, 15, 4802-4821, doi:10.3390/e15114802.

Jak zostało już kilkakrotnie powiedziane, podstawową ideą przyświecającą mojej pracy jest potraktowanie lodu morskiego jako szczególnego przypadku materiału ziarnistego oraz zbadanie możliwości zastosowania wiedzy o tych materiałach w badaniach lodu. Ze względu na bardzo szeroki, potęgowy rozkład wielkości kier, szczególnie interesujące w tym kontekście są inne materiały posiadające tę cechę. Jednakże – choć na pierwszy rzut oka ten fakt może się wydawać zaskakujący – **nasza wiedza o materiałach zbudowanych z cząstek o rozmiarach obejmujących kilka rzędów wielkości jest bardzo ograniczona.** Ogromna większość prac zarówno eksperymentalnych, jak i teoretycznych, poświęcona jest materiałom o wąskich rozkładach rozmiarów cząstek. Spośród pozostałych prac, w których analizowane są materiały o silnej polidispersyjności (najczęściej rozkłady lognormalne), tylko niektóre koncentrują się na wpływie tego czynnika na własności materiału. Oznacza to, że istniejące wyniki nie pozwalają odpowiedzieć na pytanie, jak potęgowy rozkład rozmiarów cząstek wpływa na dynamikę danego materiału, a w szczególności, jaka jest rola FSD w dynamice lodu morskiego. Fakt ten był główną motywacją prac zaprezentowanych w opisywanym artykule. **Obliczenia, które zostały wykonane na jego potrzeby, zostały przeprowadzone w takiej konfiguracji modelu, która pozwala na interpretację wyników nie tylko w odniesieniu do lodu morskiego, ale również w szerszym kontekście dwuwymiarowych materiałów ziarnistych w ogóle.** Wszystkie symulacje zostały przeprowadzone w warunkach wysokiej, stałej koncentracji cząstek i przy zadanym tempie deformacji ścinających (które są dominującym rodzajem deformacji w zwartym paku lodowym, z dala od granicy lodu). Dla lepszego zilustrowania wpływu FSD na otrzymywane wyniki, obliczenia były przeprowadzone dla rozkładu potęgowego oraz wąskiego, dwuwartościowego rozkładu dyskretnego. Ogólnie, o zachowaniu systemu w analizowanych przypadkach decydują dwa niezależne parametry: koncentracja oraz tempo deformacji. W większości zakresu wartości tych parametrów, globalne charakterystyki systemu – jak np. ciśnienie lub średnia liczba kontaktów – są stabilne w czasie i po wystąpieniu ewentualnych zaburzeń szybko powracają do typowych wartości. Tylko w pewnym wąskim zakresie warunków system wykazuje bardzo gwałtowne, chaotyczne zmiany, zbliżone do tych, jakie opisywane były w poprzednim artykule, i posiadające cechy typowe dla tzw. *fragile states* w innych materiałach ziarnistych (np. obecność długich „nici” i „łańcuchów” ziaren przenoszących siły, ułożonych w jednym dominującym kierunku).

Szczegółowa analiza wyników modelowania pozwoliła pokazać, że przejście systemu ze stanu niskiej (*unjammed*) do stanu wysokiej (*jammed*) koncentracji wiąże się z charakterystycznymi zmianami zarówno średnich prędkości ziaren, jak i anomalii prędkości. Przejście fazowe między tymi stanami objawia się pojawieniem globalnych korelacji anomalii prędkości ziaren

i wzrostem entropii, będącej w tym wypadku miarą zróżnicowania (szerokości rozkładów prawdopodobieństwa) tych anomalii. Znamienne jednak jest to, że korelacje te stają się statystycznie istotne tylko dla stosunkowo niewielkiego podzbioru największych ziaren (kier), dla ziaren najmniejszych pozostają zaś bliskie zeru. Wskazuje to na fakt, że **w przekazywaniu sił i naprężeń w analizowanym materiale dominującą rolę odgrywają ziarna o największych rozmiarach**. W pewnym sensie, najmniejsze ziarna stanowią plastyczny „wypełniacz”, zajmujący puste przestrzenie pomiędzy ziarnami największymi, które biorą udział w budowaniu sieci sił. Jedną z konsekwencji tej szczególnej struktury tych sieci jest to, że przy potęgowym FSD nawet w stanie „zablokowanym” (*jammed*) liczba ziaren budujących szkielet sieci niewiele przekracza 30% (w porównaniu do ponad 80% w analogicznym systemie o wąskim FSD). **Szkielet ten ma charakter „ażurowy”, a jego „komórki” otaczają wypełnione bardzo małymi ziarnami obszary o lokalnie niższej koncentracji. To z kolei implikuje bardzo dużą przestrzenną zmienność naprężeń wewnętrznych, w zależności od tego, czy są one „mierzone” w obrębie szkieletu, czy poza nim. Charakterystyczne gwałtowne skoki globalnych wartości tych naprężeń związane są z kolei z przebudową struktury szkieletu, czyli zmianą względnych pozycji ziaren największych**. Jeden z praktycznych aspektów tych obserwacji jest związany z pomiarami *in situ* naprężeń wewnętrznych w lodzie oraz ruchu kier lodowych, np. na podstawie analizy zdjęć lotniczych i satelitarnych. Z oczywistych względów, obserwacje i pomiary na ogół ograniczone są do największych kier na danym obszarze. Opisane tutaj wyniki modelowania nakazują ostrożność w interpretacji tych pomiarów, gdyż mogą one nie być reprezentatywne dla pokrywy lodowej jako całości. Wyniki otrzymane w opisywanej pracy zostały również zaprezentowane w formie referatów na dwóch konferencjach w 2013 roku: *3rd Conference on Particle-Based Methods: PARTICLES 2013* (Stuttgart, Niemcy) oraz *American Geophysical Union (AGU) Fall Meeting* (San Francisco, California, USA; referat na zaproszenie).

DALSZE PERSPEKTYWY

Istotnym elementem każdej pracy naukowej jest to, by jej efekty otwierały drogę dalszego rozwoju dla dziedziny wiedzy, której dotyczą. W omawianym przypadku rysuje się wiele możliwości i kierunków dalszych badań, zarówno możliwych do realizacji w ciągu najbliższych lat i będących bezpośrednią kontynuacją prac przedstawionych w opisywanych tutaj artykułach, jak i w dalszej perspektywie.

Model opisany w pracach będących elementem mojego dorobku habilitacyjnego jest przeze mnie dalej rozwijany, dzięki czemu staje się odpowiedni do modelowania w coraz szerszym zakresie warunków. Najnowsza, jeszcze nieopublikowana wersja bazuje na bibliotece LIGGGHTS (LAMMPS Improved for General Granular and Granular Heat Transfer Simulations; <http://www.cfdem.com>), a najważniejsze zawarte w niej innowacje to: (i) możliwość modelowania kruszenia pokrywy lodowej oraz zamarzania kier (w ogólniejszym kontekście: uwzględniania elastycznych połączeń pomiędzy ziarnami; ang. *bonded-particle model*); (ii) uwzględnienie wybranych efektów związanych z wpływem falowania wiatrowego na pokrywę lodową, m.in. okresowych zmian prądu powierzchniowego związanych z ruchem oscylacyjnym wody oraz naprężeń powstających wskutek wyginania pokrywy lodowej na sfalowanej powierzchni morza. Dzięki tym zmianom model może być wykorzystany do analizy procesów formowania kier lodowych (czyli FSD może być otrzymane jako rozwiązanie modelu), również w strefie marginalnej paku lodowego, gdzie falowanie wiatrowe odgrywa ważną, często nawet dominującą rolę. **Nowa wersja modelu, wraz z pełną dokumentacją, będzie w pełni dostępna w internecie, a wyniki prezentujące jej możliwości będą przedstawione w artykule pt. „Discrete-element bonded-particle sea ice model. Model description and implementation”, który jest obecnie przygotowywany do złożenia w czasopiśmie “Geoscientific**

Model Development”.

Pomimo bardzo szybkiego tempa wzrostu mocy obliczeniowych i rozwoju metod numerycznych, jaki ma miejsce w ostatnich latach i najprawdopodobniej będzie miał miejsce w najbliższej przyszłości, wykorzystanie opisywanych tutaj modeli lodu morskiego w skali całych akwenów (np. Morza Arktycznego) pozostaje problematyczne, zwłaszcza wtedy, gdy modele takie mają być wykorzystane do prognozowania w trybie operacyjnym. Mogą być jednak bardzo cenne przy analizie wybranych sytuacji (*case studies*). Ponadto, atrakcyjna wydaje się możliwość łączenia modeli ciągłych z modelami opartymi na metodzie elementów skończonych (DEM: *discrete element model*), uruchamianymi na obszarach, gdzie spodziewane jest, że „efekty ziarniste” odgrywają istotną rolę. Jedną z zalet wspomnianej wyżej biblioteki LIGGGHTS, na której oparta jest najnowsza wersja mojego modelu, jest to, że jest ona dostosowana do współpracy z modelami typu GFS (*geophysical fluid dynamics*), czyli modelami opartymi na równaniach ośrodków ciągłych. Co ważniejsze jednak, **modele DEM stwarzają możliwości opracowania parametryzacji efektów makroskalowych związanych z procesami na poziomie poszczególnych kier, co powinno przyczynić się do poprawy jakości modeli ciągłych**. Przykładem może być model reologii lodu dla strefy marginalnej, poprawnie uwzględniający cechy szczególne pokrywy lodowej oraz sił na nią oddziałujących w tej strefie. Wyniki modelowania za pomocą DEM mogą też być pomocne przy ocenie błędów, jakimi obarczone są wyniki modeli ciągłych w wyniku nieuwzględniania pewnych procesów. Pomimo tego więc, że zaprezentowane w opisywanych tutaj pracach wyniki mogą wydawać się pełne technicznych detali, mogą one być wykorzystane do wielu zagadnień o charakterze praktycznym.

Jak zostało wielokrotnie podkreślone w omawianych publikacjach, zaprezentowane w nich osiągnięcia mają znaczenie w szerszej perspektywie, dotyczącej funkcjonowania i zmian klimatu w strefie polarnej oraz na całej kuli ziemskiej. Obserwowane w ciągu ostatnich lat kurczenie się pokrywy lodowej w Arktyce jest jednym z najbardziej widocznych – i najczęściej komentowanych – aspektów zachodzących obecnie zmian klimatycznych. Jest ono związane z zanikaniem grubego, wieloletniego lodu w centralnej części Oceanu Arktycznego, który w sezonach zimowych zastępowany jest „świeżym”, cienkim lodem sezonowym. W związku z mniejszą grubością, lód tego typu posiada mniejszą wytrzymałość mechaniczną, poddany działaniu fal, wiatru i prądów łatwiej ulega deformacji i fragmentacji – i w konsekwencji przypomina złożoną z oddzielnych kier pokrywę lodową charakterystyczną dla strefy marginalnej (ang. *marginal ice zone*, MIZ) oraz mórz strefy subpolarnej (np. Morza Bałtyckiego).

Moje osiągnięcia dotyczące opisywanego tutaj modelu lodu zostały docenione przez międzynarodową społeczność badaczy zajmujących się zarówno dynamiką lodu morskiego, jak i fizyką materiałów ziarnistych. Przejawem są m.in. zaproszenia do wygłoszenia wykładów na konferencji American Geophysical Union w San Francisco w grudniu 2013 roku (sesja OS013: „Marginal Ice Zone Dynamics”) oraz na sympozjum „Sea-ice mechanical modeling: from physics to applied mathematics” w Grenoble w czerwcu 2014 roku, a także na konferencjach, które dopiero się odbędą: „Continuum Models and Discrete Systems” w Salt Lake City w USA w lipcu 2014 oraz 4th International Conference on Particle-Based Methods: Fundamentals and Applications (sesja pt. „Fracture and Fragmentation with DEM”) w Barcelonie w 2015 roku.

Na zakończenie warto podkreślić, że w polskim środowisku naukowym zagadnienia związane z fizyką i dynamiką lodu morskiego były dotychczas niemal zupełnie pomijane – pomimo faktu, że Polska jest krajem od lat aktywnie zaangażowanym w badania polarne zarówno na Antarktydzie,

jak i w Arktyce, głównie w rejonie Spitsbergenu. Lód morski pojawiał się oczywiście jako element prac dotyczących innych, mniej lub bardziej powiązanych z nim zagadnień, nie stanowił jednak centrum zainteresowania, a wyniki tych prac nie były zauważane poza granicami naszego kraju w środowisku naukowców zajmujących się fizyką lodu morskiego i wyznaczających dominujące kierunki badań w tej dziedzinie. **Zaprezentowane w mojej pracy habilitacyjnej wyniki wydają się dobrze wpasowywać w aktualne trendy badań, o czym świadczy wspomniane już kilkakrotnie zainteresowanie wynikami mojej pracy.**

5. **Omówienie pozostałych osiągnięć naukowo - badawczych (artystycznych):**

Moje dotychczasowe osiągnięcia badawcze zawarte są w artykułach, których całkowita liczba cytowań wg bazy Web of Science wynosi 127 (bez autocytowań: 110); 16 z nich to artykuły w czasopismach z bazy JCR, posiadających Impact Factor (5 wchodzących w skład dorobku habilitacyjnego; 11 pozostałych). Jestem również (współ)autorem 12 innych prac oraz 19 wystąpień konferencyjnych. Mój indeks Hirscha wynosi 5 (stan na dzień 23.06.2014).

Powyższe statystyki plasują się ponad przeciętną w uprawianej przeze mnie dziedzinie wiedzy w Polsce.

Moje pozostałe osiągnięcia naukowo-badawcze, nie wchodzące w skład osiągnięcia habilitacyjnego, obejmują:

MODELOWANIE LODU W BAŁTYKU ORAZ ANALIZA DEFORMACJI POKRYWY LODOWEJ W ARKTYCE

Moje zainteresowanie lodem morskim nie ogranicza się do modelowania metodami elementów skończonych, będącego głównym tematem mojej pracy habilitacyjnej. W ostatnich latach, w ramach realizowanego w Zakładzie Oceanografii Fizycznej IOUG projektu europejskiego ECOOP („European COastal-shelf sea OPerational monitoring and forecasting system”), opracowałam i uruchomiłam numeryczny model lodu dla Morza Bałtyckiego, zintegrowany z modelem hydrodynamicznym i oparty na „klasycznych” równaniach lodu jako ośrodka ciągłego. Prace nad tym modelem są obecnie kontynuowane w ramach projektu SatBałtyk („Satelitarna Kontrola Środowiska Morza Bałtyckiego”), w którym pracuję również nad algorytmem pozwalającym wyznaczać zasięg, koncentrację i albedo lodu w Morzu Bałtyckim na podstawie danych z multispektralnych czujników satelity Meteosat.

Dwa najbardziej znaczące tematy badawcze związane z lodem morskim, jakie realizuję w ostatnim czasie, to, po pierwsze, zależność tempa deformacji lodu w Arktyce od prędkości wiatru (analizowana na podstawie danych satelitarnych) oraz, po drugie, wpływ lodu morskiego na dolną atmosferę i procesy wymiany ciepła pomiędzy morzem a atmosferą (analizowane za pomocą numerycznego modelu pogody WRF: Weather Research and Forecasting).

Dotychczasowym rezultatem tych prac są artykuły:

Herman, A., Glowacki, O., 2012. Variability of sea ice deformation rates in the Arctic and their relationship with basin-scale wind forcing. *The Cryosphere*, 6, 1553-1559.

Herman, A., Jędrasik, J., Kowalewski, M., 2011. Numerical modelling of thermodynamics and dynamics of sea ice in the Baltic Sea. *Ocean Sci.*, 7, 257-276.

MODELOWANIE PROCESÓW DYNAMICZNYCH W MORZU

Z WYKORZYSTANIEM SIECI NEURONOWYCH ORAZ METOD ANALIZY PRZESTRZENNEJ

Moja praca doktorska, realizowana w latach 2000–2003, poświęcona była modelowaniu numerycznemu falowania wiatrowego w strefie brzegowej, a jej głównym zadaniem badawczym była implementacja procesu dyfrakcji w modelu falowym SWAN (*Simulating WAVes Nearshore*). Po

ukończeniu doktoratu kontynuowałam prace związane z modelowaniem numerycznym zarówno falowania, jak i prądów oraz poziomów morza. Zasadniczym innowacyjnym elementem tych prac było wykorzystanie w modelowaniu, po pierwsze, sztucznych sieci neuronowych, oraz po drugie, nowoczesnych metod liniowej i nieliniowej analizy danych wielowymiarowych. Łączenie „tradycyjnych” metod modelowania, opartych na podstawowych równaniach opisujących fizykę analizowanych procesów, z metodami statystycznymi, posiada wiele zalet natury praktycznej, pozwalając m.in. na znaczące zwiększenie wydajności obliczeniowej przy znikomej utracie jakości wyników modelowania i zachowaniu wysokiej zdolności predykcyjnej. Ten praktyczny aspekt miał bardzo istotne znaczenie w projektach realizowanych przeze mnie podczas pobytu w Brzegowej Stacji Badawczej niemieckiego Ministerstwa Gospodarki Wodnej i Ochrony Brzegów Dolnej Saksonii (NLWKN). Realizacja tych projektów wymagała przeprowadzenia bardzo dużej ilości obliczeń na obszarach o złożonej batymetrii i linii brzegowej oraz w zmiennych warunkach hydrometeorologicznych, a ich głównym celem była ocena bezpieczeństwa powodziowego wybrzeży i portów. Pożądana była więc metoda z jednej strony szybka, z drugiej zaś – jak najbardziej wiarygodna, dostarczająca solidnych argumentów dla podjęcia decyzji np. o podwyższeniu wałów przeciwpowodziowych w danym miejscu. Realizowane przeze mnie w tych projektach prace miały więc aspekt zarówno naukowy, jak i praktyczny. Dodatkową zaletą metod analizy wielowymiarowej – jak np. liniowa i nieliniowa analiza składowych głównych (PCA: *Principal Component Analysis*) – jest to, że pozwalają one na lepsze zrozumienie charakterystycznych wzorców zmienności czasowej i przestrzennej danych, wykrywanie powtarzalnych sytuacji itp.

Rezultatem opisywanych badań są artykuły:

Herman, A., 2011. Neural-Network Modeling and Data Analysis Techniques in Coastal Hydrodynamic Studies: A Review. In: L.L. Wright (Ed.), *Sea Level Rise, Coastal Engineering, Shorelines and Tides* (Oceanography and Ocean Engineering Series), Nova Science Publishers, ISBN: 978-1-61728-655-1, 295-317.

Herman, A., Kaiser, R., Niemeyer, H.D., 2009. Wind-wave variability in a shallow tidal sea – spectral modelling combined with neural network methods. *Coastal Engng*, 56, 759-772.

Herman, A., Kaiser, R., Niemeyer, H.D., 2007. Modelling of a medium-term dynamics in a shallow tidal sea, based on combined physical and neural network methods. *Ocean Modelling*, 17, 277-299.

Herman, A., 2007. Nonlinear principal component analysis of the tidal dynamics in a shallow sea. *Geophys. Res. Lett.*, 34, L02608.

a także szereg wystąpień konferencyjnych oraz reporty techniczne z projektów realizowanych podczas pobytu w niemieckim NLWKN:

Herman, A., Kaiser, R., 2009. Ermittlung des Bemessungsseegangs am Nordwest- und Südweststrand von Borkum. Ekspertyza NLWKN – Forschungsstelle Küste, 334s.

Herman, A., Kaiser, R., Niemeyer, H.D., 2007. Schlussbericht zum KFKI-Forschungsvorhaben „Modellierung des mittelfristigen Seegangsklimas im deutschen Nordseeküstengebiet” (MOSES). Raport nr 01/2007, NLWKN – Forschungsstelle Küste, 94s.

MECHANIZMY WYMIANY WÓD W SYSTEMIE POŁĄCZONYCH BASENÓW PŁYWOWYCH

Nowoczesne modele hydrodynamiczne, oparte na różniczkowych równaniach ruchu i uwzględniające szczegóły kształtu i batymetrii analizowanych zbiorników wodnych, pozwalają na uzyskanie trójwymiarowego, zmiennego w czasie obrazu prądów i poziomu morza. Związane z ich konfiguracją i uruchamianiem koszty obliczeniowe oraz stopień złożoności otrzymywanych wyników nie zawsze jednak uzasadniają ich wykorzystanie. W wielu sytuacjach do zrozumienia i odtworzenia podstawowych procesów dynamicznych zachodzących na badanym obszarze nie tylko wystarczają, ale wręcz pożądane są narzędzia prostsze i bardziej przejrzyste, pozwalające

prześledzić związki przyczynowo-skutkowe i zależności pomiędzy parametrami i zmiennymi modelu. Stworzenie takiego narzędzia było głównym celem moich prac nad modelem opisującym zmiany poziomu wody oraz wymianę objętościową w systemie zbiorników połączonych, jaki stanowią np. poszczególne baseny pływowe wzdłuż południowo-wschodnich wybrzeży Morza Północnego. Model ma za zadanie wyjaśniać obserwowaną nieliniowość w przebiegu czasowym poziomu morza i przepływów na podstawie wyłącznie krzywych batymetrycznych, bez uwzględniania pełnej topografii dna badanego obszaru (ang. *lumped-parameter model*). Kod modelu, napisany w programie Matlab, wraz z wygodnym, stworzonym samodzielnie środowiskiem graficznym umożliwiającym jego konfigurację i przeprowadzanie obliczeń, a także z przykładowymi danymi i pełną dokumentacją, jest dostępny pod adresem (pod nazwą SeCoTide: *Semi-Connected Tidal Inlets*):

<http://ocean.ug.edu.pl/~herman/SeCoTide/SeCoTide.htm>.

Model ten może być wykorzystywany do celów dydaktycznych, jako narzędzie ułatwiające zrozumienie podstawowych mechanizmów kształtujących cyrkulację i wymianę wód w strefie brzegowej mórz pływowych, a także do celów naukowych, niekoniecznie w takiej konfiguracji, do jakiej model ten został pierwotnie zaprojektowany. Przykładowo, w projekcie Narodowego Centrum Nauki realizowanym obecnie na Spitsbergenie, w którym jestem jednym z głównych wykonawców (patrz Załącznik 3, punkt II-I.1), SeCoTide będzie wykorzystany wraz z danymi pomiarowymi do analizy prądów pływowych w lagunie położonej u czoła lodowca Recherche (Recherchefjorden, Bellsund).

Rezultatem opisywanych badań są artykuły:

Urbański, J.A., Herman, A., 2009. Water exchange between the basins of the German Wadden Sea studied with a coupled Matlab-ArcGIS model. *J. Coastal Res.*, SI 56, 1085-1089.

Herman, A., 2007. Numerical modelling of water transport processes in partially-connected tidal basins. *Coastal Engng*, 54, 297-320.

ANALIZA STRUMIENI PĘDU TOWARZYSZĄCYCH PROPAGACJI FAL W WODZIE O ZMIENNEJ GŁĘBOKOŚCI

Elementem mojej pracy doktorskiej był model propagacji fal na powierzchni wody, będących superpozycją pewnej zadanej liczby fal elementarnych. Efektem „ubocznym” badań towarzyszących formułowaniu tego modelu była wnikliwa analiza równań opisujących propagację fal nad pochyłym dnem. Analiza ta pozwoliła pokazać, jaki wpływ ma uwzględnienie pełnych, poprawnych warunków brzegowych przy dnie (bez stosowanych rutynowo uproszczeń) na pionowy profil składowych strumieni pędu związanych z falowaniem. Otrzymane wyniki są istotne ze względu na sposób wyznaczania naprężeń radiacyjnych, a co za tym idzie, prądów generowanych falowaniem w strefie brzegowej.

Wyniki tych prac zostały opisane w artykule:

Herman, A., 2006. Three-dimensional structure of wave-induced momentum flux in irrotational waves in combined shoaling-refraction conditions. *Coastal Engng*, 53, 545-555.

6. Literatura

Asplin, M.G., Scharien, R., Else, B., Howell, S., Barber, D.G., Papakyriakou, T., Prinsenberg, S., 2014. Implications of fractured Arctic perennial ice cover on thermodynamic and dynamic sea ice processes. *J. Geophys. Res.*, 119, 2327–2343.

Bi, D., Zhang, J., Chakraborty, B., Behringer, R.P., 2011. Jamming by shear. *Nature*, 480, 355–358.

Goldhirsch, I., Zanetti, G., 1993. Clustering instability in dissipative gases. *Phys. Rev. Lett.*, 70,

1619–1622.

Rothrock, D.A., Thorndike, A.S., 1984. Measuring the sea-ice floe size distribution. *J. Geophys. Res.*, 89, 6477–6486.

Steer, A., Worby, A., Heil, P., 2008. Observed changes in sea-ice floe size distribution during early summer in the western Weddell Sea. *Deep-Sea Res. II*, 55, 933–942.

Toyota, T., Takatsuji, S., Nakayama, M., 2006. Characteristic of sea ice floe size distribution in the seasonal ice zone. *Geophys. Res. Lett.*, 33, L02616.

Toyota, T., Hass, C., Tamura, T., 2011. Size distribution and shape properties of relatively small sea-ice floes in the Antarctic marginal ice zone in late winter. *Deep-Sea Res. II*, 58, 1182–1193.

Agnieszka Herunen

SUMMARY OF PROFESSIONAL ACCOMPLISHMENTS

7. **Name:**

Agnieszka Herman

8. **University degrees –with name, place and year of their acquisition, and the title of the PhD thesis:**

MSc in Oceanography – 1 July 1999, University of Gdańsk, Faculty of Biology, Geography and Oceanography

PhD in Earth Science, in the field of Oceanology – 21 November 2003, University of Gdańsk, Faculty of Biology, Geography and Oceanography (thesis title: „Diffraction effects in wind wave modelling”)

9. **Information on hitherto employment in scientific institutions:**

1999 – 2003: Department of Physical Oceanography, Institute of Oceanography, Faculty of Biology, Geography and Oceanography, University of Gdańsk (research assistant)

2003 – 2006: Coastal Research Station, Lower Saxony Water Management, Coastal Defence and Nature Conservation Agency (NLWKN), Norderney, Germany
(unpaid leave from the University of Gdańsk)

2006 – present: Department of Physical Oceanography, Institute of Oceanography, Faculty of Oceanography and Geography, University of Gdańsk (adjunct)

10. **Scientific achievement, according to art. 16 sec. 2 of the bill from 14 March 2003 r. on scientific degrees and title and degrees and title in the domain of arts (J. Laws No. 65, item 595 with modif.):**

d. **title of the achievement:**

ANALYSIS AND MODELING OF SEA ICE DYNAMICS WITH METHODS USED IN PHYSICS OF GRANULAR MATERIALS

e. **(author/authors, title/titles of publication, year of publication, publisher):**

Herman, A., 2010. Sea-ice floe-size distribution in the context of spontaneous scaling emergence in stochastic systems. *Phys. Rev. E*, 81, 066123, doi:10.1103/PhysRevE.81.066123.

Herman, A., 2011. Molecular-dynamics simulation of clustering processes in sea-ice floes. *Phys. Rev. E*, 84, 056104, doi:10.1103/PhysRevE.84.056104.

Herman, A., 2012. Influence of ice concentration and floe-size distribution on cluster formation in sea ice floes. *Cent. Europ. J. Phys.*, 10, 715-722, doi:10.2478/s11534-012-0071-6.

Herman, A., 2013. Numerical modeling of force and contact networks in fragmented sea ice. *Annals Glaciology*, 54, 114-120, doi:10.3189/2013AoG62A055.

Herman, A., 2013. Shear-jamming in two-dimensional granular materials with power-law grain-size distribution. *Entropy*, 15, 4802-4821, doi:10.3390/e15114802.

f. ***discussion of the scientific goal of the above work, the results and their possible application:***

INTRODUCTION

The scientific achievements presented in this work have been made possible thanks to substantial developments that have taken place in two distinct disciplines. In both cases, these developments are related to both purely theoretical as well as practical aspects, regarding technological progress that enables more and more detailed observations and more and more effective numerical modeling of the analyzed phenomena.

The subject of the first of the two disciplines are systems consisting of a large number of relatively simple, interacting elements. Examples of such systems include granular materials (loose or cohesive; natural or manmade) with particle sizes covering many orders of magnitude – from powders, sand, rice, corn, stones and sedimentary rocks up to asteroid belts and galaxies. Despite of such enormous variability of those materials, they have many common properties and therefore can be analyzed by means of the same or similar methods. Some of the most recent achievements of the physics of granular materials – important from the point of view of issues discussed in this work – are related to: relationships between the macroscopic properties of a given material, including its response to strain, with its properties at a „micro“-scale (i.e., physical properties of the material building the grains); the influence of polydispersity (variability of the grain size) on the properties of those materials; mechanisms of jamming in materials subject to compression and/or shear deformation; mechanisms of force and stress transmission in those materials and topological properties of the contact and force networks.

The second of the two above-mentioned disciplines is the sea ice physics, in which the recent progress has been closely coupled to the increase of spatial and temporal resolution of both satellite data (the main systematic source of sea ice data, especially in remote regions of the Arctic and Antarctic) and numerical models of sea ice thermodynamics and dynamics. In both cases, the sizes of pixels and numerical grids, respectively, have become comparable to the characteristic size of individual sea-ice floes. Thus, a number of formal assumptions underlying numerical sea ice models are violated, like, for example, Hibler’s viscous-plastic sea-ice rheology model used in almost all large-scale models, including those used in global climate simulations. In Hibler’s model, the basic assumption is that each mesh of the numerical grid contains a very large number of ice floes. It is not trivial to determine how violating this assumption influences the modeling results. In a broader context, the picture emerging from the ever growing amounts of more and more detailed data has led to a realization among scientists that **in most cases sea ice cannot be treated as a viscous-plastic continuum covering the sea surface**, because many large-scale properties of the ice cover result from its specific, granular nature and interactions at the floe–floe level. In short, the **macro-scale properties of sea ice are emergent properties, produced by smaller-scale processes**. Deformation and fracturing of individual ice floes, and the related internal stress, influence the mechanical strength of the ice cover at the basin scale, as well as many other physical and geochemical processes taking place at the ocean–atmosphere interface in polar and sub-polar regions. Moreover, those processes are interrelated, mutually connected by a number of feedbacks. For example, lower mechanical strength of sea ice, resulting from its fragmentation, facilitates propagation of ocean surface waves deep into the ice pack, leading to further

fragmentation and disintegration of the ice cover. In conditions favorable for melting, this closed chain of processes is reinforced by an additional factor: lateral melting, the rate of which strongly depends upon the total perimeter of ice floes, i.e., their average size, within a given area. More similar feedback loops exist, and they may jointly lead to rapid changes in the overall state of the ice cover, triggered by apparently insignificant events like a single, average-strength storm. A good example of such a situation is disintegration of sea ice over vast expanses of the Beaufort Sea that took place in February and March 2013 and is well documented in satellite images (see, e.g., <http://earthobservatory.nasa.gov/IOTD/view.php?id=80752>). Such dramatic events are particularly relevant in the context of climate change in the polar regions and the role that sea ice plays in shaping that climate.

HABILITATION ACHIEVEMENT – A GENERAL DESCRIPTION

The central idea underlying this work consists in treating sea ice as a granular material, with ice floes playing the role of grains, interacting with each other and moving on the sea surface due to forces from the ocean and the atmosphere.

One of the main goals is a better understanding of sea ice dynamics at a „micro“-scale (i.e., scale comparable with the size of individual floes) – a subject hardly investigated until now – as well as understanding of the influence of the „micro“-scale on large-scale properties and behavior of sea ice. In the future, it will contribute to the development of improved models parameterizing dynamical processes in sea ice, and consequently to more reliable large-scale sea-ice models and climate predictions.

The fundamental achievement of my work lies in combining possibilities and recent achievements from both disciplines mentioned in the introduction.

It means, first of all, **adaptation of methods and models used in granular-material research to research on sea ice dynamics.**

The fundamental effect of that work is **a modern numerical model, based on the discrete-element method (DEM), suitable for simulating sea ice as an assembly of individual ice floes.** Development of this model included theoretical research (derivation and analysis of the model equations etc.), as well as numerical work (development of suitable algorithms; implementation of the equations and algorithms in the programme code; testing and verification of the code).

What's very important, the model obtained as a result of that work is applicable not only to sea ice, but also to a much broader class of two-dimensional granular materials with very wide grain-size distributions. **The results have innovative aspects not only with respect to sea-ice dynamics, but they contribute to a better understanding of problems related to the influence of strong polydispersity of materials – independently of details of their structure – on their macroscopic properties.**

An indication of the interdisciplinary character of those achievements is a fact that they arouse interest among both sea-ice scientists and physicists studying granular materials. The results have been published in journals from both disciplines and presented at conferences devoted to narrow subject matters of sea-ice physics (e.g., *International Symposium on Seasonal Snow and Ice* in Lahti, Finland, in 2011; *Fall Meeting of the American Geophysical Union* in San Francisco, USA, in 2013 – invited lecture), as well as at conferences related to broad issues of statistical physics and computational methods (e.g., *International Conference on Statistical Physics „Sigma Phi“* in Larnaca in 2011; *Conference on Particle-Based Methods “Particles”* in Stuttgart in 2013).

HABILITATION ACHIEVEMENT – A DETAILED DESCRIPTION

According to the information provided in section 4a, **my habilitation work consists of scientific achievements published in five papers in journals from the Journal Citation Reports (JCR) database. Their total Impact Factor equals 8.748, and their total score equals 145 points** according to the List of Scientific Journals published by the Polish Ministry of Science and Higher Education. The results described in those publications reflect the gradual progress of my work on the granular nature of sea ice and on the theoretical and numerical model describing the analyzed processes. Thus, the description below, presenting the most important results of each of those five papers in chronological order, provides a natural way of ordering these results.

- i. Herman, A., 2010. **Sea-ice floe-size distribution in the context of spontaneous scaling emergence in stochastic systems.** *Phys. Rev. E*, 81, 066123, doi:10.1103/PhysRevE.81.066123.

As already mentioned in the introduction, the state-of-the-art large-scale sea ice models treat it as a (typically viscous-plastic or elastic-viscous-plastic) continuum. Although this approach is very efficient computationally, it has a number of drawbacks and in many situations it produces significant errors in the results, especially in situations with strong deformations taking place at short timescales, in regions close to the ice edge or the fast-ice boundary, as well as in narrow passages and straits – overall, in places where sea-ice dynamics covers a wide range of spatial and temporal scales and where the specific, granular structure of sea ice becomes important.

One of the basic properties of any granular material is the size distribution of elements – grains, particles, or, in the case of sea ice, floes – building that material. **A distinguishing feature of sea ice in this respect is its extremely strong polydispersity.** In most cases the floe-size distribution (FSD) is very wide, power-law or nearly-power-law ($P(x) \sim x^{-1-\alpha}$), which means that **the sizes of floes within a given region cover a few orders of magnitude, from sub-meter size up to a few hundred or even a few thousands of meters.** Since the seminal work of Rothrock and Thorndike (1984), in which they analyzed the fractal, scale-independent character of sea ice floes, many papers have been published describing observed FSD in various locations and situations (see Table 1 in Herman 2010). However, no theory exists that would explain the observed variability of the power-law exponent α (which, in general, seems to have larger values close to the ice edge than deep inside of the ice pack) and the deviations of FSD from the power law occurring under some conditions. These deviations have been usually attributed to a limited resolution and size of images used to estimate the FSD (the so-called finite-size effects). Only recently Toyota et al. (2006) and Steer et al. (2008) suggested that this explanation is not satisfactory. The main overall goal of my work was to point out that FSD may be regarded as a solution of a statistical model that describes processes of fragmentation and consolidation of the ice cover. In short, the shape of the FSD may be obtained as a result of modeling. Moreover, mechanisms influencing that shape are presumably universal – in the sense that they can be described quantitatively by means of equations analogous to those describing other complex systems. In the paper, I proposed a simple statistical model, inspired by models of autocatalytic systems popular in ecology, economics and social science – the so-called Generalized Lotka-Volterra (GLV) model. As an emergent property in this model, a probability density function is obtained that fits very well to the observed FSD in the full range of floe sizes. Although this model does not unambiguously assign the terms of the governing equations to the individual processes responsible for floe formation and breaking – and thus it does not provide an explanation of how these processes influence the shape of the FSD – it suggests an innovative way of their

analysis and interpretation. It is a new, interdisciplinary approach that opens a way to more advanced models of that type and to an understanding of factors influencing the FSD shape in various conditions. A fascinating aspect of that research is related to finding analogies and differences between systems of interacting “agents” from apparently very distant disciplines.

- ii. Herman, A., 2011. **Molecular-dynamics simulation of clustering processes in sea-ice floes.** *Phys. Rev. E*, 84, 056104, doi:10.1103/PhysRevE.84.056104.

A central subject of the previous paper were processes influencing the size distribution of sea ice floes. My next works put an opposite question: **how the FSD influences sea ice dynamics and the response of the sea-ice cover to the external forces**. It is the first of the series of papers in which sea ice is modeled as a two-dimensional granular material composed of cylindrical (disk-shaped) ice floes that move on the sea surface under the action of forces from the ocean and the atmosphere (wind, ocean currents etc.) and interact with each other according to the mechanics of semi-elastic materials. The first paper in the series concentrates on processes taking place in sea ice at medium ice concentration ($0 < A < 1$), i.e., in situations when the interactions between ice floes are dominated by inelastic collisions (restitution coefficient $0 < \epsilon < 1$) leading to dissipation of part of their kinetic energy. One of the characteristic properties of this type of materials, following directly from the condition $\epsilon < 1$, is a tendency to form clusters of particles – regions with locally increased particle density (e.g., Goldhirsch and Zanetti 1993). Sea ice definitely belongs to that class of materials: the presence of clusters of ice floes on the sea surface is a rule, not an exception. However, apart from the basic mechanism of cluster formation, mentioned above, in the case of sea ice there are two additional, very important factors influencing that behavior. The first is a very strong variability of floe sizes (i.e., a very wide, power-law FSD). The second is size-dependent response of individual floes to the forces acting on them. Due to the fact that some forces are proportional to the upper/lower surface area of the floes, and some are proportional to their lateral surface area, the resultant net forces acting on small and large floes are not equal – even if the wind and current speed is constant. As a result, the velocities and accelerations of small and large floes are different, and it leads to formation of very distinctive clusters, in which small floes tend to accumulate along the edges of large ones. It is a recurrent pattern, very common in air-borne and satellite images of sea ice.

In the discussed paper, these processes are analyzed by means of a model analogous to those used in modeling of granular gases (the so-called hard-disk, or hard-sphere models). The foundation of the model is an assumption that the collisions between grains/particles/floes are binary and instantaneous (infinitely short), and the algorithm proceeds from one collision to the next, at each step determining the positions and accelerations of all particles (floes) building the analyzed system (the so-called event-driven algorithm). The model developed is based on a numerical code written in Matlab. It is applied to a simple situation of N floes subject to a constant, prescribed wind and current at a constant ice concentration $A = \text{const}$. A straightforward analysis of the governing equations shows that in this case both the time constant and the equilibrium velocity of floes depend on their radius – the more so, the larger the ice thickness. As the results of the simulations demonstrated, under these conditions the clusters of floes move with an average velocity equal to the weighted-average of equilibrium velocities of floes forming a given cluster: large floes are slowed down by the small ones, to which they constantly pass some of their kinetic energy. What’s very important, **the cluster-size distribution at a given ice concentration A is a power law, similarly as the original FSD, but the exponent of that distribution is different – and strongly dependent on A :** the higher

the ice concentration, the larger the exponent and thus the narrower the cluster-size distribution. Moreover, the simulations showed the existence of two regimes, determined by the size of the largest cluster in the model domain. When the ice concentration is low, the ice floes form a large number of separate clusters, and the sizes of the largest of them are comparable to the sizes of the largest floes in the ensemble. When the ice concentration is high, more than 90% of the ice area is forming one, dominating cluster, extending over the whole model domain. Within a narrow range of concentration values between those two regimes, a very interesting dynamics can be observed, with a constant rearrangement of the clusters; this transition has properties of the percolation phase transition.

To the best of my knowledge, this work is the first that analyzes possible mechanisms leading to formation of floe clusters in sea ice. The very fact of the existence of those clusters has been recently noted by Toyota et al. (2011), who suggested that clusters may be important in floe formation thanks to lateral freezing of neighboring floes within them. In combination with the modeling results described here, the hypothesis of Toyota and colleagues suggests the existence of an interesting feedback loop: the FSD, deciding upon cluster formation, combined with freezing leads to the formation of new floes and to the modification of the initial FSD, which in turn influences cluster formation etc. etc. Because the FSD influences a number of processes taking place at the ocean–atmosphere interface (momentum transfer between the ocean and atmosphere, wind-wave propagation into the ice pack, lateral melting rates, light transmission through the ice, gas exchange etc.), a better understanding of those mechanisms is important not only scientifically, but also from a practical point of view, among other things in the context of the recent climate change in polar regions (e.g., Asplin et al., 2014), for marine transport in the ice and for biological life.

This paper (same as the previous one) was accepted for publication without any corrections, and the reviewers stressed the potential broad implications of the results for our understanding of the role of sea ice dynamics in shaping the climate.

In this context, **the summary of the most important findings from this paper has been published on the internet portal „Physics – Spotlighting Exceptional Research” of the American Physical Society:**

<http://physics.aps.org/synopsis-for/10.1103/PhysRevE.84.056104>.

I also presented the results at the Gordon Research Conference „Exploring Complex Systems in Polar Marine Science” (Ventura, California, USA; March 2011) and International Conference on Statistical Physics "SigmaPhi" (Larnaca, Cyprus; July 2011).

- iii. Herman, A., 2012. **Influence of ice concentration and floe-size distribution on cluster formation in sea ice floes.** *Cent. Europ. J. Phys.*, 10, 715-722, doi:10.2478/s11534-012-0071-6.

This paper is a continuation of the previous one, and the results presented in it were obtained with the same model. The simulation performed for this paper covered a wider range of values of the model input parameters, and **the main research question was related to relationships between the ice concentration and – first of all – the shape of the FSD, and the properties of the clusters of floes.** In particular, the analysis concentrated on the characteristic asymmetry observed in the directional distribution of contacts between floes within clusters, related to the previously-mentioned variability of equilibrium velocities of ice floes of different sizes. The properties of clusters have been analyzed with methods from the theory of graphs and networks, like e.g. network connectivity. It has been shown that the value of the critical ice concentration, at which the phase transition described in the previous paper takes place, depends on the shape of the FSD: with increasing values of the FSD

exponent, the critical A shifts towards lower values. Moreover, in all cases analyzed, the exponent of the cluster-size distribution in the transitional zone between the two regimes – and only in this zone – was approximately equal to the exponent of the FSD. Additionally, the paper analyzed situations of divergence of the ice cover, $dA/dt < 0$ (where t denotes time). The simulations have shown that under slow divergence, when the system has sufficient time to adjust to the changing conditions, the disintegration of the global cluster takes place slowly and gradually, under much lower values of ice concentration than could be predicted from the analysis of stationary model runs. It suggests the presence of hysteresis and means that the cluster-size distribution under any given conditions depends not only on instantaneous conditions, but also on the history of the system.

A very important aspect of the results is related to internal stress in sea ice at medium ice concentration. In large-scale sea ice models, a standard assumption is routinely made that at ice concentrations below a certain threshold (typically equal 0.8) the ice is in a state of free drift and the internal stress equals zero. The available sea ice rheology models that take into account stress generated by collisions between floes do not solve the problem, because they are based on unrealistic assumptions about a uniform distribution of floes on the sea surface. Consequently, these models produce non-zero values of the internal stress only in situations with spatially-varying external forces. **The results of my work clearly show that the presence of clusters of floes on the sea surface is associated with non-zero values of the internal stress, produced by collisions of floes of different sizes within clusters.** Moreover, the model, in which forces acting on individual floes are part of the solution, enables direct estimation of the components of the internal-stress tensor. **It provides a possibility of developing improved rheology models of fragmented sea ice.**

- iv. Herman, A., 2013. **Numerical modeling of force and contact networks in fragmented sea ice.** *Annals Glaciology*, 54, 114-120, doi:10.3189/2013AoG62A055.

The model used in my first works related to the dynamics of ice floes was based on a few important assumptions that made it possible to design a relatively simple numerical algorithm. Those assumptions resulted in certain limitations regarding the range of applicability of the model. The most important of them considered the infinitely short duration of individual collisions. This assumption is fulfilled only at a relatively low ice concentration, when no (quasi-)stationary contacts between floes can develop. Thus, the first version of the model was not suitable for example for the analysis of a compact ice cover. Moreover, in situations with high collision rates (a large number of collisions per second), e.g., within regions of locally higher concentration, the algorithm tended to slow down and became very computationally expensive. This limited the total number of floes that could be modeled.

As a result, it was desirable to replace that model with a new, more advanced one, applicable in a much wider range of conditions.

The new model has been developed based on the LAMMPS (Large-scale Atomic/Molecular Massively Parallel Simulator; <http://lammms.sandia.gov>) numerical library, containing algorithms designed for effective, parallel modeling of the dynamics of systems composed of a large number of interacting objects (atoms, particles, grains, etc.). For the purpose of sea ice modeling, I modified/extended the LAMMPS library with new functionalities: I defined a new object type (with cylindrical shape), implemented all equations describing the motion of these object on a two-dimensional sea surface (tangential and normal stress due to wind and current, Coriolis force, etc.) and I modified the formulae describing forces generated

between objects in contact to adjust them to disk-shaped geometry of the floes.

The paper described here concentrates on the properties of contact and force networks in sea ice composed of separate floes, subject to various deformation types and external forcing. Global properties of these networks can be analyzed by means of the contact fabric tensor and the internal stress tensor, respectively, as well as variables obtained from the eigenvalues of these tensors (mean contact number and contact anisotropy; pressure and shear stress). These quantities are routinely used in studies on rheology of granular materials, but **their application to sea-ice research is a novelty**.

The situations analyzed in this paper include: (i) uniform convergence of the ice cover, without wind; (ii) wind with a constant speed at a constant ice concentration; and (iii) wind with a constant speed, blowing at a certain angle to the ice edge (an idealized marginal ice zone).

The first of these situations allows to trace the transformation of the ice cover from the state of low concentration and sporadic, binary collisions of floes, to the state of fully developed, dense contact network covering the whole model domain (jamming phase transition). What's interesting, the transitional phase between these two regimes possesses a number of features in common with the second of the above-mentioned model configurations – for example in terms of the typical values of pressure and the mean contact number. On the other hand, contact and force networks in sea ice subject to wind are characterized by much higher values of anisotropy and different from zero values of the shear stress, especially at medium ice concentrations, when the size-dependent response of floes to forcing, described in my previous works, manifests itself particularly strong. Thus, **locally, sea ice under the action of wind has many features typical for the so-called shear jamming, described recently for other granular materials** (Bi et al. 2011). A similar behavior, with characteristic episodes of locally increased or decreased pressure, has been observed in the results for the idealized marginal ice zone.

An important common feature of the analyzed cases is a specific structure of the contact networks, related to the power-law distribution of the floe sizes. The networks have an “openwork” structure, supported by a relatively small subset of all floes within a given area. Additionally, **even if the external forcing remains constant, the internal stress in the ice undergoes strong fluctuations both in space and in time. It is crucial for our understanding of the response of sea ice to deformation and for methods of measuring the internal stress in situ**.

The results of this work were also presented at two conferences in 2012: *International Symposium on Seasonal Snow and Ice* (Lahti, Finland) and *American Geophysical Union (AGU) Fall Meeting* (San Francisco, California, USA).

- v. Herman, A., 2013. **Shear-jamming in two-dimensional granular materials with power-law grain-size distribution**. *Entropy*, 15, 4802-4821, doi:10.3390/e15114802.

As has been already mentioned a number of times, the main idea of my work is to treat sea ice as a special case of a granular material, and to investigate the possibilities of applying the expertise from the physics of granular materials in sea ice research. With regard to a very wide, power-law distribution of the floe sizes, other materials possessing this property seem particularly relevant. However – although it may seem surprising – **our knowledge about materials composed of particles with sizes covering many orders of magnitude is very limited**. A great majority of works, both theoretical and experimental, is devoted to materials with narrow grain-size distributions. Among the remaining works, which deal with strongly

polydisperse materials (typically with lognormal size-distributions), only a few concentrate on the influence of that factor on the material's properties. Consequently, the available results are not sufficient to answer the question of how an extreme polydispersity influences the dynamics in general – and how the power-law FSD influences the dynamics of sea ice, in particular. This has been the main motivation for the work presented in this paper. **For the simulations performed for that purpose, model configurations have been used that enable a broader interpretation of the results, not only with reference to sea ice, but also in a wider context of granular materials in general.** All simulations were performed at high concentrations of particles, for a prescribed rate of shear deformation (which is the dominant mode of deformation in the central Arctic ice pack, far from the ice edge). For a better illustration of the influence of the FSD on the modeling results, the computations were performed for both a power-law and a narrow, bidisperse grain-size distributions. Generally, the behavior of the system in this case is governed by two independent parameters: grain concentration and the deformation rate. In most of the analyzed range of variability of these two parameters, the global properties of the system – like, for example, pressure or the mean contact number – are stable in time and quickly return to typical values in the case of any disturbances. Only in a certain narrow range of conditions the system exhibits rapid, chaotic changes, similar to those described in the previous paper and possessing properties typical for so-called fragile states observed in other granular materials (e.g., the presence of long chains of grains transmitting forces, aligned in one, dominating direction). A detailed analysis of the results demonstrated that the transition from the unjammed to the jammed state is associated with characteristic changes of both the average grain velocities and the velocity anomalies. The transition manifests itself by the emergence of global correlations in the velocity anomalies and by an increase in entropy, which in this case is a measure of the width of the probability distribution of those anomalies. Symptomatically, long-range correlations are statistically significant only for a relatively small subset of the largest grains; for small grains they remain close to zero. It suggests that **the largest grains play a dominant role in transmitting forces and stress in the analyzed material.** In a sense, the smallest grains form a plastic 'filler', filling spaces between the largest grains that build the force network. One of the consequences of this specific structure of force networks is that, for power-law FSD, the amount of grains building the skeleton, or frame, of the force network in the jammed state hardly exceeds 30% (as compared to over 80% in the analogous system with narrow FSD). **This skeleton has an openwork structure, and its 'cells' surround regions with locally lower concentration, filled with very small grains. This leads to a very strong spatial variability of the internal stress, depending whether it is 'measured' within or outside of the force-bearing frame. Distinctive, rapid fluctuations of the global values of stress are in turn related to the rearrangement of the skeleton structure, i.e., to the relative displacement of the largest grains.** One of the practical aspects of these conclusions is related to measurements of internal stress in sea ice, as well as the motion of ice floes, e.g., based on series of airborne or satellite images. For obvious reasons, the observations are usually limited to the largest floes in the ensemble. The results of my work urge to treat such estimations with caution, as they may be unrepresentative for the ice cover as a whole. The results of this work were also presented at two conferences in 2013: *3rd Conference on Particle-Based Methods: PARTICLES 2013* (Stuttgart, Germany) and *American Geophysical Union (AGU) Fall Meeting* (San Francisco, California, USA; invited lecture).

FURTHER PERSPECTIVES

An important aspect of any scientific work is that its results should open paths to further

developments of the discipline(s) to which it is relevant. In this case, there are a number of possibilities and directions of further research, that may be taken up both in the nearest future, as a direct continuation of the work presented here, as well as in a further perspective.

At present, I continue my work on the model described here, so that it becomes applicable to a wider and wider range of conditions. The newest, still unpublished version is based on the LIGGGHTS (LAMMPS Improved for General Granular and Granular Heat Transfer Simulations; <http://www.cfdem.com>) library. The most important innovations implemented in that version include: (i) the possibility of modeling breaking and fragmentation of the ice cover, and lateral freezing of floes (in a broader context: elastic joints between grains – it is a so-called bonded-particle model); (ii) accounting for some effects related with the influence of surface waves on sea ice, including periodic changes of the surface current related to the oscillating motion of water, as well as flexural stresses generated due to the curvature of the water surface. Thanks to these new features, the model can be applied to the analysis of processes of formation of ice floes (i.e., the FSD can be obtained as a model solution), not only in the central ice pack but also within the marginal ice zone, where wind waves play an important, often dominant role. **The new model version, with a full documentation, will be available on the Internet, and the results presenting the new features will be described in the paper „Discrete-element bonded-particle sea ice model. Model description and implementation”, which is currently in preparation for the “Geoscientific Model Development” journal.**

In spite of a very fast increase of available computing power and the development of numerical methods that has been taking place in recent years, the application of granular sea-ice models at the scale of whole water basins (e.g., the Arctic) is still problematic, especially when the models are expected to provide results operationally. However, these models may prove very valuable for analyses of selected cases (case studies). Also, an attractive prospect seems to lie in integrating models based on the discrete-element method (DEM), run in regions where granular effects are expected to be significant, with ‘traditional’ continuum models. One of the advantages of the above-mentioned LIGGGHTS library is that it is adapted to work with geophysical fluid dynamics (GFS) models, i.e., with models based on the equations of continuous media. What’s even more important, however, is that **DEM models provide an opportunity to develop parameterizations of macro-scale effects related to processes taking place at the scale of individual ice floes. This could contribute to improvements in the performance of continuum models.** An example could be a model of ice rheology dedicated to the marginal ice zone, correctly taking into account specific properties of sea ice and forces acting on it in that zone. The results of DEM models can be also helpful by estimation of errors resulting from non-accounting for certain processes in continuum models. Thus, even though the results presented in the papers described here may seem very technical, they may be applicable to many practically relevant issues.

As has been stressed a number of times in my papers, their results are relevant also in a wider perspective, namely that of the functioning and variability of climate in the polar regions and the Earth as a whole. The shrinking of the perennial ice cover in the Arctic, observed in the last decades, is undoubtedly one of the most visible – and most hotly debated and commented – aspects of the ongoing climate change. A fundamental part of these changes is replacement of thick, multi-year ice occupying the central part of the Arctic Ocean by thin, seasonal ice, which has much lower mechanical strength and gets relatively easily broken and fragmented due to the action of waves, currents, and wind. Consequently, even far from the ice edge it behaves similarly to the ice cover in the marginal ice zone or in seasonally ice-covered seas of the sub-polar zone (e.g., the Baltic Sea).

My achievements related to the granular sea-ice modeling have found interest among the international community of researchers working on both sea ice dynamics and physics of granular materials. It resulted in invitations to give lectures at the conference of the American Geophysical Union in San Francisco in December 2013 (session OS013: „Marginal Ice Zone Dynamics”) and the conference „Sea-ice mechanical modeling: from physics to applied mathematics” in Grenoble in June 2014, as well as at conferences that will take place in the future: „Continuum Models and Discrete Systems” in Salt Lake City, USA, in July 2014 and the 4th International Conference on Particle-Based Methods: Fundamentals and Applications (session „Fracture and Fragmentation with DEM”) in Barcelona in 2015.

Finally, it is worth stressing that in the Polish scientific community, problems related with physics and dynamics of sea ice have played only marginal role – despite the fact that Poland is a country very actively involved in polar research in both the Antarctic and Arctic (especially in the area of Spitsbergen). Of course, sea ice has appeared as a component of research projects concentrating on other subjects, but has not been ‘in the limelight’, and the results have remained almost unnoticed among sea-ice scientists abroad. However, **the results presented in my habilitation work seem to fit in the most actual trends in sea ice research.**

11. *Description of the remaining scientific achievements:*

My hitherto scientific achievements are presented in publications which, according to the Web of Science database, have been cited 127 times (without self-citations: 110 times); 16 of them appeared in journals with an Impact Factor, included in the JCR database (5 forming my habilitation work, and 11 additional). I am also a (co-)author of 12 other works and 19 conference presentations. My Hirsch index equals 5 (as of 23. June 2014). The above statistics are higher than the average in my scientific discipline in Poland.

My remaining scientific achievements, not being part of my habilitation work, include:

SEA ICE MODELING IN THE BALTIC SEA AND ANALYSIS OF SEA-ICE DEFORMATION IN THE ARCTIC

My interest in sea ice is not limited to modeling with DEM methods, which is the main subject of my habilitation work. In the recent years, as part of a EU research project ECOOP („European COastal-shelf sea OPerational monitoring and forecasting system”) realized at the Department of Physical Oceanography IOUG, I developed and implemented a numerical sea ice model for the Baltic Sea, integrated with a hydrodynamic model and based on “classical” equations of sea ice as a continuum. At present, I continue the work on this model in the EU project SatBaltic („Satellite Monitoring of the State of the Baltic Sea”), in which I am also involved in work on an algorithm for estimating sea ice range, concentration and albedo in the Baltic Sea from multispectral data collected by the Meteosat satellites.

Two most important research problems related to sea ice that I have been investigating recently are, first, relationships between the sea-ice deformation rates and wind speed in the Arctic (analyzed based on satellite data), and, second, influence of sea ice on the lower troposphere and ocean-atmosphere heat exchange (analyzed by means of a numerical weather prediction model WRF: Weather Research and Forecasting).

The hitherto results of this work are described in:

Herman, A., Glowacki, O., 2012. Variability of sea ice deformation rates in the Arctic and their relationship

with basin-scale wind forcing. *The Cryosphere*, 6, 1553-1559.

Herman, A., Jędrasik, J., Kowalewski, M., 2011. Numerical modelling of thermodynamics and dynamics of sea ice in the Baltic Sea. *Ocean Sci.*, 7, 257-276.

MODELING OF DYNAMICAL PROCESSES IN THE SEA

BY MEANS OF NEURAL NETWORKS AND METHODS OF SPATIAL DATA ANALYSIS

My PhD thesis, realized in the years 2000–2003, concentrated on numerical modeling of wind waves in the coastal zone and implementation of a diffraction approximation in the wave model SWAN (Simulating WAVes Nearshore). After finishing my PhD I continued my work on numerical modeling of waves, currents and sea levels. An important innovative element of that work was the application of, first, neural networks, and second, modern methods of linear and nonlinear analysis of multidimensional data. Integration of “traditional” modeling methods, based on equations describing the physics of the analyzed processes, with statistical methods has a number of advantages important from a practical point of view, as it allows for a significant increase of computational efficiency with only a minor loss of the quality of the results and with preservation of the models’ predictive power. That practical aspect was particularly relevant in projects in which I was involved during my stay at the Coastal Research Station of the German Lower Saxon Ministry of Water Management and Coastal Protection (NLWKN). Accomplishment of those projects required huge amounts of computations in regions with complex bathymetry and coastline and highly variable hydrometeorological conditions. One of the main goals was an assessment of inundation probabilities for ports and coastal protection structures in the area of interest. Thus, a desired modeling method had to be, on the one hand, fast and efficient, and on the other hand, reliable, providing solid arguments supporting decisions regarding, e.g., elevating the dykes at a given location. Thus, my work in those project had both scientific and practical aspects. An additional advantage of multidimensional data analysis – like, for example, linear and nonlinear principal component analysis (PCA) – is that they allow for a better understanding of characteristic temporal and spatial patterns in the data, detection of recurrent situations etc.

The results of that work have been published in:

Herman, A., 2011. Neural-Network Modeling and Data Analysis Techniques in Coastal Hydrodynamic Studies: A Review. In: L.L. Wright (Ed.), *Sea Level Rise, Coastal Engineering, Shorelines and Tides* (Oceanography and Ocean Engineering Series), Nova Science Publishers, ISBN: 978-1-61728-655-1, 295-317.

Herman, A., Kaiser, R., Niemeyer, H.D., 2009. Wind-wave variability in a shallow tidal sea – spectral modelling combined with neural network methods. *Coastal Engng*, 56, 759-772.

Herman, A., Kaiser, R., Niemeyer, H.D., 2007. Modelling of a medium-term dynamics in a shallow tidal sea, based on combined physical and neural network methods. *Ocean Modelling*, 17, 277-299.

Herman, A., 2007. Nonlinear principal component analysis of the tidal dynamics in a shallow sea. *Geophys. Res. Lett.*, 34, L02608.

as well as in conference papers and technical reports:

Herman, A., Kaiser, R., 2009. Ermittlung des Bemessungsseegangs am Nordwest- und Südweststrand von Borkum. Ekspertyza NLWKN – Forschungsstelle Küste, 334s.

Herman, A., Kaiser, R., Niemeyer, H.D., 2007. Schlussbericht zum KFKI-Forschungsvorhaben „Modellierung des mittelfristigen Seegangsklimas im deutschen Nordseeküstengebiet“ (MOSES). Raport nr 01/2007, NLWKN – Forschungsstelle Küste, 94s.

MECHANISMS OF WATER EXCHANGE IN SEMI-CONNECTED TIDAL BASINS

State-of-the-art hydrodynamic models, based on differential momentum equations and taking into account the details of the shape and bathymetry of the analyzed water basins, provide a three-

dimensional, time-dependent picture of currents and water levels. However, due to huge computational time and memory costs associated with their configuration and operation, as well as the level of complexity of the results, their usage is not always justified. In many situations, simpler, more transparent tools are not only sufficient, but even desirable, as they allow to track cause-and-effect relationships between the model variables and parameters. The development of such a tool was the main goal of my work on a model describing water exchange and water-level variability in a system of semi-connected basins, like those found, e.g., along the south-eastern coasts of the North Sea. The purpose of the model was to explain nonlinearities in time series of water levels and volume transport between the basins, based on their bathymetric curves, without taking into account full topography of the area of study (a so-called lumped-parameter model).

The model code, written in Matlab, together with a convenient, single-handedly developed graphical user's interface enabling model configuration and operation, as well as example results and full documentation, are available at:

<http://ocean.ug.edu.pl/~herman/SeCoTide/SeCoTide.htm>

(under the name SeCoTide: Semi-Connected Tidal Inlets).

The model can be used for educational purposes, as a tool supporting a better understanding of basic mechanisms governing water exchange and circulation in a coastal zone of tidal seas, as well as for engineering and scientific applications, not necessarily identical with the one for which it was originally designed. For example, in a research project of the Polish National Science Center realized presently on Spitsbergen, in which I am one of the principal investigators (see Attachment 3, point II-I.1), SeCoTide will be applied together with observational data to the analysis of tidal currents in a lagoon situated in front of the Recherche glacier (Recherchefjorden, Bellsund).

The results of that work can be found in papers:

Urbański, J.A., Herman, A., 2009. Water exchange between the basins of the German Wadden Sea studied with a coupled Matlab-ArcGIS model. *J. Coastal Res.*, SI 56, 1085-1089.

Herman, A., 2007. Numerical modelling of water transport processes in partially-connected tidal basins. *Coastal Engng*, 54, 297-320.

ANALYSIS OF WAVE-GENERATED MOMENTUM FLUX IN WATER OF VARIABLE DEPTH

An element of my PhD work was related to a phase-resolving model of irregular water-surface waves treated as a superposition of a given number of elementary waves. A "side effect" of my research on this subject was a detailed analysis of the equations describing propagation of waves over a sloping, steep bottom. The analysis revealed the influence of taking into account full, correct bottom boundary conditions (without routinely-made simplifications) on the vertical profiles of wave-generated momentum flux. The results are relevant from the point of view of methods used to calculate radiation stress, and consequently, wave-generated currents in the coastal zone.

The results were presented in the paper:

Herman, A., 2006. Three-dimensional structure of wave-induced momentum flux in irrotational waves in combined shoaling-refraction conditions. *Coastal Engng*, 53, 545-555.

g. **References**

Asplin, M.G., Scharien, R., Else, B., Howell, S., Barber, D.G., Papakyriakou, T., Prinsenberg, S., 2014.

Implications of fractured Arctic perennial ice cover on thermodynamic and dynamic sea ice processes. *J. Geophys. Res.*, 119, 2327–2343.

Bi, D., Zhang, J., Chakraborty, B., Behringer, R.P., 2011. Jamming by shear. *Nature*, 480, 355–358.

Goldhirsch, I., Zanetti, G., 1993. Clustering instability in dissipative gases. *Phys. Rev. Lett.*, 70,

1619–1622.

Rothrock, D.A., Thorndike, A.S., 1984. Measuring the sea-ice floe size distribution. *J. Geophys. Res.*, 89, 6477–6486.

Steer, A., Worby, A., Heil, P., 2008. Observed changes in sea-ice floe size distribution during early summer in the western Weddell Sea. *Deep-Sea Res. II*, 55, 933–942.

Toyota, T., Takatsuji, S., Nakayama, M., 2006. Characteristic of sea ice floe size distribution in the seasonal ice zone. *Geophys. Res. Lett.*, 33, L02616.

Toyota, T., Hass, C., Tamura, T., 2011. Size distribution and shape properties of relatively small sea-ice floes in the Antarctic marginal ice zone in late winter. *Deep-Sea Res. II*, 58, 1182–1193.

Agnieszka Herwan