

Autoreferat

1. **Imię i nazwisko:** Piotr Markuszewski
2. **Posiadane dyplomy, stopnie naukowe lub artystyczne – z podaniem podmiotu nadającego stopień, roku ich uzyskania oraz tytułu rozprawy doktorskiej:**
 - **Doktor nauk o Ziemi w zakresie Oceanologii**, Instytut Oceanologii Polskiej Akademii Nauk w Sopocie. 11.06.2018.
Tytuł rozprawy doktorskiej: „Strumienie aerozolu morskiego w przywodnej warstwie atmosfery w rejonach południowego Bałtyku oraz europejskiej części Arktyki”
 - **Magister**, kierunek fizyka techniczna specjalizacja fizyka stosowana, Wydział Fizyki Technicznej i Matematyki Stosowanej, Politechnika Gdańska, 7.09.2012.
Tytuł pracy magisterskiej: „Badanie strumieni aerozoli w przywodnej warstwie atmosfery na podstawie jednoczesnych pomiarów gradientu pionowego oraz wysoko częstotliwościowych zmian koncentracji aerozolu”
 - **Inżynier**, kierunek fizyka techniczna specjalizacja fizyka stosowana, Wydział Fizyki Technicznej i Matematyki Stosowanej, Politechnika Gdańska, 17.01.2011.
Tytuł pracy inżynierskiej: „Badanie własności kwadrupolowego spektrometru masowego QSM 300”
3. **Informacja o dotychczasowym zatrudnieniu w jednostkach naukowych lub artystycznych.**
 - od 2018-obecnie: **adiunkt:** Pracownia Wzajemnego Oddziaływania Morza i Atmosfery, Zakład Dynamiki Morza, Instytut Oceanologii Polskiej Akademii Nauk w Sopocie.
 - 2020-2022: **postdock** (w ramach stypendium im. Bekkera) w Department of Environmental Science and Analytical Chemistry, ACES, Stockholm University, Stockholm, Sweden.
 - 2016-2018: **oceanograf:** Pracownia Wzajemnego Oddziaływania Morza i Atmosfery, Zakład Dynamiki Morza, Instytut Oceanologii Polskiej Akademii Nauk w Sopocie.
4. **Omówienie osiągnięć, o których mowa w art. 219 ust. 1 pkt. 2 ustawy z dnia 20 lipca 2018 r. Prawo o szkolnictwie wyższym i nauce (Dz. U. z 2021 r. poz. 478 z późn. zm.). Omówienie to winno dotyczyć merytorycznego ujęcia przedmiotowych osiągnięć, jak i w sposób precyzyjny określać indywidualny wkład w ich powstanie, w przypadku, gdy dane osiągnięcie jest dziełem współautorskim, z uwzględnieniem możliwości wskazywania dorobku z okresu całej kariery zawodowej:**

Tytuł osiągnięcia naukowego/artystycznego:

Analiza porównawcza emisji aerozolu marygenicznego przy uwzględnieniu wpływu parametrów falowania, aktywności biologicznej oraz ich znaczenie dla transportu mikroplastiku w rejonach Morza Bałtyckiego oraz Północnego Atlantyku.

Lista publikacji stanowiących osiągnięcie naukowe:

1. Markuszewski, P., Nilsson, E. D., Zinke, J., Mårtensson, E. M., Salter, M., Makuch, P., ... & Piskozub, J. (2024). Multi-year gradient measurements of sea spray fluxes over the Baltic Sea and the North Atlantic Ocean. *Atmospheric Chemistry and Physics* 24, 11227–11253, <https://doi.org/10.5194/acp-24-11227-2024>

Wkład autorski: Przygotowanie koncepcji badań, wykonanie pomiarów podczas rejsów badawczych, opracowanie danych pomiarowych, przygotowanie rycin i tabel, interpretacja wyników, analiza statystyczna, dobór literatury, przygotowanie i edytowanie manuskryptu, autor wiodący oraz korespondencyjny.

2. Zinke, J., Nilsson, E. D., Markuszewski, P., Zieger, P., Mårtensson, E. M., Rutgersson, A., Nilsson, E., & Salter, M. E. (2024). Sea spray emissions from the Baltic Sea: comparison of aerosol eddy covariance fluxes and chamber-simulated sea spray emissions. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 24(3), 1895-1918. <https://doi.org/10.5194/acp-24-1895-2024>

Wkład autorski: Przygotowanie koncepcji badań, wykonanie pomiarów podczas rejsów badawczych i kampanii brzegowej, opracowanie danych pomiarowych, interpretacja wyników, współpraca przy przygotowaniu manuskryptu.

3. Ferrero, L., Scibetta, L., Markuszewski, P., Mazurkiewicz, M., Drozdowska, V., Makuch, P., ... & Bolzacchini, E. (2022). Airborne and marine microplastics from an oceanographic survey at the Baltic Sea: An emerging role of air-sea interaction?. *Science of the Total Environment*, 824, 153709. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.153709>

Wkład autorski: Przygotowanie koncepcji badań, wykonanie pomiarów podczas rejsów badawczych, opracowanie danych pomiarowych, przygotowanie rycin i tabel, interpretacja wyników, analiza statystyczna, dobór literatury oraz przygotowanie i edytowanie manuskryptu.

4. Nilsson ED, Hultin KAH, Mårtensson EM, Markuszewski P, Rosman K, Krejci R. (2021), Baltic Sea Spray Emissions: In Situ Eddy Covariance Fluxes vs. Simulated Tank Sea Spray. *Atmosphere*.; 12(2):274. <https://doi.org/10.3390/atmos12020274>

Wkład autorski: opracowanie danych pomiarowych, przygotowanie rycin i tabel, interpretacja wyników, przygotowanie i edytowanie manuskryptu.

5. P. Markuszewski, Z. Klusek, E.D. Nilsson, T. Petelski (2020), *Observations on relations between marine aerosol fluxes and surface-generated noise in the southern Baltic Sea*, *Oceanologia*. doi: <https://doi.org/10.1016/j.oceano.2020.05.001>

Wkład autorski: Przygotowanie koncepcji badań, wykonanie pomiarów podczas rejsów badawczych, opracowanie danych pomiarowych, przygotowanie rycin i tabel, interpretacja wyników, analiza statystyczna, dobór literatury oraz przygotowanie i edytowanie manuskryptu. Autor wiodący i korespondencyjny.

6. Markuszewski P., Kosecki Sz., Petelski T., (2017). *Sea spray aerosol fluxes in the Baltic Sea region: Comparison of the WAM model with measurements*, Estuarine, Coastal and Shelf Science. Vol.195, 16-22. <https://doi.org/10.1016/j.ecss.2016.10.007>

Wkład autorski: Przygotowanie koncepcji badań, wykonanie pomiarów podczas rejsów badawczych, opracowanie danych pomiarowych, przygotowanie rycin i tabel, interpretacja wyników, analiza statystyczna, dobór literatury oraz przygotowanie i edytowanie manuskryptu. Autor wiodący i korespondencyjny.

Omówienie celu naukowego oraz wyników prac stanowiących osiągnięcie habilitacyjne:

Wstęp

Wzajemne oddziaływanie morza i atmosfery jest złożonym, interdyscyplinarnym zagadnieniem, które obejmuje szeroki zakres procesów fizycznych, chemicznych i biologicznych. Aerosol morski, w tym szczególnie aerosol marygeniczny (AM, znany w literaturze anglojęzycznej jako *sea spray aerosol*, zdefiniowany przez Garbalewskiego 1999 jako krople emitowane bezpośrednio z powierzchni morza), odgrywa kluczową rolę w klimacie Ziemi. Wpływa na bilans radiacyjny atmosfery, procesy chmurowe, transport materii biologicznej oraz zanieczyszczeń. Pomimo wieloletnich badań, dokładne oszacowanie strumieni AM pozostaje wyzwaniem, głównie ze względu na dużą złożoność mechanizmów emisji.

Mechanizmy emisji aerozolu marygenicznego

AM generowany jest głównie w wyniku procesów zachodzących na powierzchni morza, w tym łamanie fal wiatrowych oraz pękania pęcherzyków powietrza na powierzchni wody (Nilsson et al., 2001, 2021; Yang et al., 2019; Zinke et al., 2024, Markuszewski et al., 2024). Wyróżnia się trzy główne mechanizmy emisji kropelek wody z powierzchni morza:

1. **Kropelki błonowe (film drops):** Powstają w wyniku pękania i rozprysku cienkiej warstwy wody na powierzchni pęcherzyków powietrza (Woolf et al., 1987). Przyjmuje się że rozmiary tych kropelek są mniejsze niż 1 μm .
2. **Kropelki podbłonowe (jet drops):** Powstają podczas zapadania się kawerny pęcherzyka powietrza (Spiel, 1998). Ich rozmiary są większe niż kropelki błonowe i wynoszą od 1 μm do około 20 μm średnicy.
3. **Kropelki pianowe (spume drops):** Tworzą się, gdy silny wiatr odrywa cząstki wody z grzbietów fal (Mehta et al., 2019). Rozmiary tych kropelek są największe, mogą przyjmować rozmiary od 20 μm nawet do 1000 μm .

Istnieją także inne mechanizmy generowania kropelek AM, choć uważa się, że są one znacznie mniej wydajne. Jednym z takich mechanizmów jest generowanie tzw. kropelek rozbryzgowych (splash drops, Andreas, 2002), które powstają, gdy fala uderzająca w powierzchnię wody odbija się w formie rozbryzgu (Kiger i Duncan, 2012).

Wyemitowane krople aerozolu mogą być wychwytywane przez turbulentną dyfuzję lub zdeponowane na powrót na powierzchni wody. Wychwycone cząstki AM transportowane są dalej wewnątrz warstwy granicznej atmosfery (WGA). Cząstki aerozolu morskiego podlegają różnym procesom transportu i transformacji. Transport AM zależy od warunków meteorologicznych, w tym od prędkości i kierunku wiatru, turbulencji atmosferycznej oraz stabilności atmosfery. Cząstki te mogą być przenoszone na znaczne odległości od miejsca ich emisji jednocześnie ulegając transformacji.

Transformacja AM obejmuje procesy fizyczne w atmosferze, takie jak koagulacja i depozycja, oraz procesy chemiczne, zarówno reakcje z gazami atmosferycznymi, w tym dwutlenkiem siarki, tlenkami azotu i lotnymi związkami organicznymi. Procesy te mogą prowadzić do zmiany składu chemicznego AM oraz ich właściwości optycznych, co z kolei wpływa na ich zdolność do rozpraszania i absorpcji promieniowania.

Znaczenie

Aerozole marygeniczne występują w szerokim zakresie wielkości, od promieni rzędu kilku nanometrów do kilku milimetrów. Mniejsze cząstki marygeniczne mogą pozostawać w atmosferze od kilku dni do kilku tygodni, rozprzestrzeniając się w skali całego globu i uczestnicząc w globalnym cyklu aerozolowym. Biorą one aktywny udział w reakcjach chemicznych w atmosferze lub działają jako jądra kondensacji chmur (Andreae i Rosenfeld, 2008) oraz mgły. Wymywanie w procesie wilgotnej depozycji przez opady atmosferyczne jest głównym mechanizmem, który usuwa te cząstki z atmosfery, jednak dyskutuje się czy w przypadku soli morskiej dominuje sucha czy mokra depozycja (Textor i in., 2006).

Najmniejsze kropelki (o rozmiarach rzędu nanometrów) mogą mieć skład chemiczny znacznie różniący się od składu wody morskiej. Wynika to z akumulacji materii hydrofobowej lub substancji powierzchniowo czynnych na powierzchni wody. Aerozole morskie rozpraszają promieniowanie krótkofalowe, osłabiając promieniowanie słoneczne docierające do powierzchni morza o około 1-5 W/m² (Lewis i Schwartz, 2004) i absorbują promieniowanie długofalowe. Cząstki soli morskiej stanowią około 90% aerozoli w morskiej WGA, prawie połowę całkowitego naturalnego strumienia emisji aerozoli i ponad jedną trzecią globalnego całkowitego strumienia (Seinfeld i Pandis, 1998). Szacuje się, że globalna emisja soli morskiej wynosi rzędu 10¹²–10¹⁴ kg rocznie (Boucher et al., 2013).

Zrozumienie dynamiki procesów związanych z większymi kropelkami hydrozolu morskiego nie jest znacząco lepsze. Większe kropelki pozostają zawieszane w atmosferze od ułamków sekund do kilku minut następnie deponują na powrót na powierzchni wody pod wpływem grawitacji. Hydrozole tego typu znacząco wpływają na strumienie ciepła i pędu między morzem i atmosferą (Andreas, 1992, 2004; Edson i Fairall, 1994; Fairall i in., 1994; Andreas i in., 2008). Ilościowy opis tych procesów jest ciągle przedmiotem dyskusji. Uważa się jednak, że strumienie ciepła związane z AM mogą być kluczowe w rozwoju dużych układów burz tropikalnych (Andreas i Emanuel, 2001; Andreas, 2011; Bao i in., 2011; Bianco i in., 2011). Jednak ze względu na wysokie niepewności w oszacowaniu emisji kropel, brak jest ciągle konsensusu co do skali tego procesu.

Aerozole marygeniczne odgrywają kluczową rolę w procesach chemicznych zachodzących w atmosferze. Mogą stanowić pierwotne źródło zarówno aerozolu nieorganicznego, jak i organicznego (Cochran et al., 2017); ponadto, AM wymywa z atmosfery niektóre związki chemiczne (biogeniczne lub antropogeniczne) przez co zapobiegają generowaniu aerozolu wtórnego, w tym tworzeniu nowych cząstek (Carslaw et al., 2010). Skład chemiczny AM oraz charakterystyka ich struktury wewnętrznej to kolejne obszary badań, w których występują istotne luki w wiedzy, prawdopodobnie ściśle związane z procesem formowania pęcherzyków. Wiadomo, że w miarę jak chmura pęcherzyków unosi się ku

powierzchni morza, pęcherzyki mają dużą zdolność do gromadzenia różnych surfaktantów, które najpierw gromadzą się na ich powierzchni, a następnie wzbogacają AM po ich rozprysku. Dotyczy to zarówno naturalnych surfaktantów (Facchini et al., 2008), jak i antropogenicznych substancji powierzchniowo czynnych (Oppo et al., 1999; Johansson et al., 2019).

Oprócz wyżej wymienionych przykładów, AM mają również duże znaczenie w procesach transportu innych substancji w WGA. Przykładem takich procesów jest transport zanieczyszczeń z morza do powietrza, są substancje takie jak perfluoroalkilowe kwasy tłuszczowe (Sha et al., 2020, 2021) lub mikroplastiki (Alen et al., 2020; Ferrero et al., 2022).

Ponadto, skład AM zmienia się wraz z porami roku i aktywnością biologiczną (Parent et al., 2023). Wykazano, że w zależności od danego akwenu AM zawiera znaczący składnik organiczny (Cavalli et al., 2004; Facchini et al., 2008), co ma implikacje dla jego higroskopijności i aktywności nukleacji (Darr et al., 2018). Ponadto, AM okazuje się być geochemicznie istotne w długich okresach geologicznych ze względu na obecność pierwiastków śladowych i zanieczyszczeń metalami w aerozolu (Marx et al., 2014).

Pomimo zgody co do ogromnego znaczenia AM dla własności atmosfery, dużym wyzwaniem jest dokładne sparometryzowanie zjawiska jego emisji. W celu oszacowania emisji stosuje się różnego rodzaju podejścia do pomiarów. Możliwe jest stosowanie technik laboratoryjnych, które polegają na sztucznym generowaniu pęcherzyków powietrza i emisji AM (Monahan et al., 1982; Mårtensson et al., 2003; Keene et al., 2007; Tyree et al., 2007; Long et al., 2011; Salter et al., 2015). Alternatywą, bardziej zbliżoną do rzeczywistości są bezpośrednie obserwacje strumieni aerozolu w badaniach w środowisku morskim takimi technikami jak metoda kowariancji wirów (m.in. Nilsson et al., 2001; Yang et al., 2019; Nilsson et al., 2021; Zinke et al., 2024), metoda gradientowa (Petelski 2003, Petelski i Piskozub 2006, Petelski et al., 2014, Savelyev et al., 2014 Markuszewski et al., 2024) czy metoda suchego wypadania (Smith et al. (1993)).

Złożoność procesów na powierzchni morza, wynikająca z synergii różnych czynników, powoduje dużą niepewność w parametryzacji emisji AM. Obok głównego parametru przyczyniającego się do emisji aerozolu jakim jest prędkość wiatru, dyskutuje się też nad wkładem innych parametrów wywierających wpływ na emisję (np. de Leeuw i in 2011, Zinke i in 2024, Markuszewski i in 2024).

Przykładowo istnieją przesłanki, że temperatura powierzchni morza (SST) wpływa na strumień AM poprzez zmiany w napięciu powierzchniowym i lepkości kinematycznej (np. Bowyer et al., 1990; Mårtensson et al., 2003; Hultin et al., 2011; Zabori et al., 2012; Foresteri et al., 2018), a w następstwie zmiany widma rozmiarów pęcherzyków (Salter et al., 2014; Zinke et al., 2022). Dokładne procesy zachodzące w tym połączeniu nie są zrozumiane, ale najbardziej prawdopodobnym mechanizmem do wytłumaczenia tego zjawiska jest koalescencja pęcherzyków (Ribeiro i Meiwes, 2006).

W trakcie badań zweryfikowano następujące hipotezy badawcze:

1. Czynniki takie jak prędkość wiatru, wysokość fali znacznej, wiek falowania i aktywność biologiczna znacząco wpływają na emisję hydrozolu.
2. Istnieje zależność między poziomem hałasu generowanego przez łamanie fal na powierzchni morza a emisją aerozolu morskiego w południowej części Morza Bałtyckiego. Zwiększenie prędkości wiatru i rozwój pola falowego powodują wzrost emisji hydrozolu, co można monitorować za pomocą poziomu hałasu podwodnego.

3. Emisja aerozolu marygenicznego może przyczyniać się do dalekiego transportu mikroplastiku.
4. Symulacje laboratoryjne emisji hydrozolu nie odwzorowują w pełni warunków morskich, co prowadzi do różnic w oszacowaniach strumieni. Emisja kropeł z Morza Bałtyckiego jest modulowana przez lokalne czynniki środowiskowe, takie jak temperatura wody, zasolenie i aktywność biologiczna.

Rozwiązanie postawionych hipotez i zadań badawczych pozwoliło na sformułowanie następujących osiągnięć habilitacyjnych:

1. Określenie wpływu różnych czynników oceanograficznych i meteorologicznych na emisję kropeł marygenicznych (publikacje: 1, 2, 5, 6).
2. Określenie znaczenia aerozolu morskiego na daleki transport mikroplastiku (publikacja 3).
3. Porównanie dwóch niezależnych metod pomiarowych strumieni aerozolu marygenicznego (publikacje 2, 4).

Zakres badań i uzyskane wyniki

Poniżej przedstawiam w zarysie najważniejsze wyniki badań udokumentowanych w przedłożonym cyklu publikacji, składającym się na moją rozprawę habilitacyjną.

Osiągnięcie 1:

Określenie wpływu rozmaitych czynników oceanograficznych i meteorologicznych na emisję kropeł marygenicznych.

Osiągnięciem habilitacyjnym jest określenie wpływu szeregów czynników środowiskowych wpływających na emisję aerozolu marygenicznego. W cyklu publikacji analizowane były kolejne aspekty wpływu tych parametrów na emisję aerozolu (ad 1, 2, 5 i 6). W publikacji Markuszewski i in. 2017 (ad 6.) na podstawie szeregów czasowych mierzonych emisji aerozolu wykazano istnienie potencjalnych możliwych związków w rejonie Morza Bałtyckiego. W artykule Markuszewski i in 2020 (ad 5.) przedstawiona została dokładniejsza analiza wyników z rejsu badawczego podczas którego obserwowano jednocześnie zmienność strumieni aerozolu oraz intensywność podwodnych szumów akustycznych. Kompleksowym podsumowaniem dzieła są dwie publikacje Markuszewski i in. 2024 oraz Zinke i in 2024 (ad 1 oraz 2) w których przeanalizowano szereg parametrów środowiskowych czynników i ich wpływ na emisję aerozolu.

W pracy Markuszewski i in. 2017 wykazano istnienie silnego wpływu rozwoju i zaniku pola falowego na emisję aerozolu. Osiągnięto to poprzez zestawienie teoretycznych funkcji źródłowych zależnych od parametrów falowych (wysokość fali znacznej oraz częstotliwość piku widma falowania) zaproponowanych przez Massela (2007) z wykonanymi pomiarami strumieni aerozolu metodą gradientową. Nasze obserwacje wskazały nawet rząd wielkości wyższe emisje aerozolu w przypadku rosnącej prędkości wiatru niż w sytuacji wiatru słabnącego. W pierwszym przypadku obserwacje były zgodne z funkcją tzw. ograniczonej stromości (limiting steepness, Massel 2007), w drugiej sytuacji zmierzone strumienie były zgodne z modelem progowego przyspieszenia pionowego (threshold vertical acceleration) oraz z funkcją Callaghanana (Callaghan 2013). Na podstawie przedstawionych w publikacji wyników zapostulowano konieczność bardziej szczegółowej analizy wpływu własności pola falowego na strumienie aerozolu marygenicznego.

Kontynuacją tego cyklu badań jest analiza i wyjaśnienie związków pomiędzy podwodnym szumem pochodzenia naturalnego (generowanego głównie przez akustycznie aktywne pęcherzyki), polem

falowym i emisją aerozoli (ad 6). Jest to zarazem propozycja alternatywnej metody parametryzacji emisji aerozolu za pomocą podwodnych szumów hydroakustycznych falowania wiatrowego. Taka technika pomiarowa pierwotnie pochodzi od znanej metody pomiarów opadów atmosferycznych w rejonie otwartego morza (Vagle i in. 1990). Jak wykazano możliwe jest badanie procesów falowych i własności warstwy morze-atmosfera za pomocą zaproponowanej pasywnej techniki hydroakustycznej.

Badania przeprowadzono w październiku 2015 roku w rejonie Rynny Słupskiej, na pokładzie statku badawczego r/v Oceania. W kampanii pomiarowej wykorzystano system do monitorowania szumów podwodnych opracowany w Instytucie Oceanologii Polskiej Akademii Nauk. System został umieszczony na głębokości 15 metrów pod powierzchnią morza. Jednocześnie z pomiarami hydroakustycznymi prowadzono pomiary strumieni aerozolu marygenicznego przy użyciu metody gradientowej.

Wyniki badań wykazały wysoką zależność pomiędzy prędkością wiatru, a poziomem szumu podwodnego, a także pomiędzy szumem, a emisją aerozolu. Zaobserwowano, że w początkowej fazie pomiarów, gdy fale morskie były w fazie rozwoju (niskie wartości tzw. parametru wieku fali), strumienie AM były wyższe, a poziom szumów był wyższy. W miarę rozwoju pola falowego (większe wartości wieku fali), poziom hałasu malał, co wskazuje na to, że głównym źródłem hałasu były pęcherzyki powietrza generowane podczas łamania się fal wiatrowych.

Badania te mają duże znaczenie dla zrozumienia dynamiki emisji AM w regionach o niskim zasoleniu, takich jak Morze Bałtyckie. Obserwacje szumów podwodnych i odniesienie ich do stanu sfalowania powierzchni morza ma również na celu lepsze zrozumienie procesów dyssypacji energii falowania wiatrowego. Wykazano, że istniejące modele parametryzacji AM, które uwzględniają wyłącznie prędkość wiatru, mogą nie być wystarczająco precyzyjne w przewidywaniu emisji aerozolu w różnych własnościach pola falowego. Wyniki sugerują, że przyszłe modele powinny uwzględniać również parametry opisujące własności falowania, takie jak wiek fali lub stromość fali.

Zaprezentowane wyniki badań wskazują również na znaczący potencjał w wykorzystaniu pomiarów szumów akustycznych falowania jako narzędzia do monitorowania strumieni aerozolu morskiego oraz właściwości pola falowego.

Szeroka analiza porównawcza pomiędzy strumieniami aerozolu oraz parametrami środowiskowymi, takimi jak: prędkość wiatru, wiek fali, falowa liczba Reynoldsa, historia wiatru, temperatura wody i powietrza, stabilność atmosfery, aktywność biologiczna (opisana za pomocą stężenia chlorofilu-a, chl-a) przedstawiona została w dwóch kolejnych publikacjach Markuszewski i in. (2024) oraz Zinke i in. (2024), (ad 1 i 2). Artykuły te stanowią naturalne podsumowanie dotychczasowych badań, które prowadzone były w obszarze badań nad emisją aerozolu marygenicznego przez autora autoreferatu.

Artykuł Zinke i in. 2024 oparty został na pomiarach wykonanych metodą kowariancji wirów oraz metodą laboratoryjną (tzw. tank experiment) podczas dwóch kampanii pomiarowych. Obok opisu wpływu czynników środowiskowych porównane zostały ze sobą te dwie metody pomiarowe. Artykuł Markuszewski i in. 2024 stanowi podsumowanie wieloletnich pomiarów gradientowych na pokładzie r/v Oceania w rejonach Morza Bałtyckiego oraz północnego Oceanu Atlantyckiego.

Badania przeprowadzono podczas dwóch kampanii badawczych w maju i sierpniu 2021 roku w pobliżu wyspy Östergarnsholm (wschodni rejon Gotlandii) na Morzu Bałtyckim. W trakcie tych kampanii dokonaliśmy pomiarów strumieni AM przy użyciu techniki kowariancji wirów na wieży pomiarowej zainstalowanej na wyspie oraz równocześnie prowadzono symulacje laboratoryjne przy użyciu komory do symulacji aerozolu morskiego umieszczonej na statkach badawczych r/v Oceania (maj) i r/v Electra (sierpień).

Bezpośrednie pomiary metodą EC strumieni AM wykonaliśmy za pomocą optycznego licznika cząstek (Grimm 1.109 OPC) zainstalowanego na wieży pomiarowej, który mierzył wysokoczęstotliwościowe pulsacje koncentracji aerozolu w przedziale średnic cząstek od 0,25 do 2,5 μm . Dane te następnie wykorzystaliśmy do obliczenia strumieni AM oraz ich sparametryzowaniu dla różnych warunków środowiskowych.

Symulacje emisji AM przeprowadzono w specjalnej komorze, w której za pomocą strumienia wody, generowane były pęcherzyki powietrza, których rozpryski emitowały aerozol marygeniczny. Komora ta była stale zasilana świeżą wodą zaburtową, co pozwalało na symulację rzeczywistych warunków morskich.

Badania wykazały logarytmiczny wzrost emisji AM wraz ze wzrostem prędkości wiatru, co jest zgodne z wcześniejszymi badaniami przeprowadzonymi w innych rejonach morskich. Ponadto stwierdzono, że emisja AM wykazuje silną zależność od wysokości fali znacznej, przy czym większe wysokości fal prowadzą do wyższych strumieni AM. Jest to zgodne z hipotezą, że proces łamania się fal wiatrowych jest ważnym czynnikiem wpływającym na generowanie AM.

Badania wykazały ujemną korelację między stężeniami chl-a w wodzie morskiej, a emisją AM w symulacjach laboratoryjnych, co sugeruje, że obecność substancji organicznych może wpływać na produkcję cząstek AM. Jednocześnie stwierdziliśmy, że koncentracja rozpuszczonych organicznych substancji fluorescencyjnych miała słabą dodatnią korelację z emisjami AM, co może sugerować bardziej złożony wpływ aktywności biologicznej na generowanie AM.

Ostatni artykuł opublikowany w ramach cyklu publikacji mojego pierwszego dzieła stanowi podsumowanie wieloletnich obserwacji aerozolowych na pokładzie r/v Oceania (ad 1). Badania te miały na celu zrozumienie procesów fizycznych odpowiedzialnych za emisję AM oraz określenie wpływu różnych parametrów meteorologicznych i oceanograficznych na emisję AM. Przeprowadzone badania są pierwszymi, w których wykonano pomiary emisji AM tą samą metodą w dwóch kontrastujących środowiskach morskich. W pracy przedstawiono również pierwsze wyniki badań, które zostały wykonane w naturalnym środowisku morskim sugerujące istnienie efektu tłumiącego emisję aerozolu związanego z materią organiczną reprezentowaną przez chl-a.

Badania przeprowadzono na pokładzie statku badawczego r/v Oceania. Pomiary obejmowały gradientowe strumienie aerozolu AM w zakresie średnic od 0,5 do 47 μm , zebrane w latach 2009–2017. Wykorzystano metodę gradientową (GM) do określania strumieni AM, a także szereg dodatkowych parametrów meteorologicznych i oceanograficznych, takich jak prędkość wiatru, wysokość fali znacznej, temperatura wody i powietrza, oraz stężenia chl-a jako wskaźnika aktywności biologicznej.

Badania wykazały silną zależność między prędkością wiatru, a emisją AM, przy czym wyższe prędkości wiatru prowadziły do większych strumieni aerozolu. W regionie Morza Bałtyckiego obserwowano większe emisje AM przy niższych wartościach parametru wieku fali w porównaniu do Atlantyku, co sugeruje, że młodsze fale sprzyjają większej emisji AM. Przeprowadzone analizy wykazały, że emisja AM była większa podczas fazy rozwoju pola falowego oraz wzrastającej prędkości wiatru (parametr opisany jako historia wiatru lub przyspieszenie wiatrowe), co potwierdza hipotezę, że stan rozwoju pola falowego jest ważnym czynnikiem wpływającym na emisję aerozolu morskiego.

Wyniki pracy wykazały, że obecność wyższych stężeń chl-a (powyżej 3,5 mg/m^3) w wodach Morza Bałtyckiego prowadziła do stłumienia strumieni AM przy wyższych prędkościach wiatru. Zjawisko to przypisano wpływowi substancji organicznych na właściwości pęcherzyków powietrza, co może zmieniać grubość filmu pęcherzyków i czas ich życia. Oznacza to, że aktywność biologiczna może mieć tłumiący wpływ na emisję AM, szczególnie mniejszych frakcji związanych z emisją błonową.

Porównanie między Morzem Bałtyckim oraz Oceanem Atlantyckim wykazało istotne różnice w charakterystyce emisji AM. W przypadku emisji z Oceanu Atlantyckiego, zmierzone wartości były wyższe w przypadku niższych zakresów prędkości wiatru, natomiast Bałtyckie emisje AM były bardziej zróżnicowane, co wynikało z wpływu zmiennych warunków falowych i biologicznych.

Wyniki tych badań dostarczają nowych informacji na temat wpływu warunków środowiskowych na emisję AM. Szczególne znaczenie ma stwierdzenie, że aktywność biologiczna może znacząco wpływać na emisję AM co jest pierwszym tego typu dowodem w literaturze naukowej. Wynik ten świadczy o potrzebie uwzględnienia tych procesów w modelach klimatycznych. Ponadto obok znanych i postulowanych wcześniej parametrów związanych z własnościami pola falowego uzyskano przesłanki o istnieniu również efektów temperaturowych związanych z temperaturą wody oraz tzw. parametrem stabilności atmosfery (różnica pomiędzy temperaturą wody i powietrza). Wyniki te jednak nie były istotne statystycznie.

Opisany cykl publikacji stanowi integralną całość gdzie pierwsza publikacja stanowi wstęp do cyklu. W drugiej pracy przedstawiono alternatywne podejście do obserwacji emisji aerozolu i własności pola falowego. Dwie ostatnie publikacje natomiast stanowią podsumowanie badań zaprezentowanych jako osiągnięcie nr 1 autoreferatu.

Osiągnięcie nr 2:

Określenie znaczenia aerozolu morskiego na daleki transport mikroplastiku.

Zanieczyszczenie mikroplastikami (MPs) jest jednym z najważniejszych problemów środowiskowych współczesnego świata. Mikroplastiki są wszechobecne zarówno w rejonach zurbanizowanych, ale także w odległych rejonach świata takich jak oceany czy rejony górskie. Wyniki badań dotyczących koncentracji mikroplastików zarówno w powietrzu, jak i w wodzie Morza Bałtyckiego przedstawiono w artykule Ferrero i in. (2022) (ad 3). W pracy szczególną uwagę poświęcono roli interakcji między morzem i atmosferą, oraz roli emisji aerozolu morskiego jaką może on pełnić w transporcie mikroplastiku. Badania te są ważne, ponieważ pozwalają na lepsze zrozumienie mechanizmów rządzących wymianą substancji między oceanem a atmosferą oraz wpływu tego procesu na środowisko morskie.

Przedstawione tu wyniki badań są unikalne w literaturze światowej. Jedyne opublikowane wyniki poza zaprezentowanymi tutaj, równoczesne obserwacje mikroplastików w wodzie i powietrzu, opisane zostały przez Allena i in. 2020. Pomiary te jednak ograniczyły się do plaży, przy niskim falowaniu i słabym wietrze, przez co identyfikacja roli emisji aerozolu była ograniczona.

Pomiary koncentracji mikroplastiku w wodzie i powietrzu oraz pomiary aerozolowe i meteorologiczne prowadzono podczas rejsu badawczego na Morzu Bałtyckim w dniach od 16 do 31 października 2019 roku na pokładzie statku badawczego r/v Oceania. Pierwsza część rejsu odbywała się w rejonie Zatoki Gdańskiej. Drugim etapem było otwarty rejon Morza Bałtyckiego oraz wschodnie rejony wyspy Gotlandia (wyspa Östergarnsholm) w centralnej części Bałtyku. Długość trasy wynosiła 960 km na obszarze 12 800 km². Na potrzeby analizy danych cała kampania została podzielona na cztery obszary badawcze: port w Gdańsku, Półwysep Helski, Morze Bałtyckie oraz wyspa Gotlandia. Podział ten został przeprowadzony głównie w celu oddzielenia obszarów pod wpływem lokalnych źródeł emisji antropogenicznych (tj. w porcie w Gdańsku i na Półwyspie Helskim) od innych obszarów. Podczas rejsu próbki mikroplastików były zbierane z atmosfery wzdłuż trasy oraz z morza podczas postojów statku.

Wyspa Gotlandia została wybrana jako miejsce stacjonarnych pomiarów, ponieważ znajduje się tam lądowa stacja badawcza specjalizująca się w pomiarach strumieni aerozolu morskiego (stacja Östergarnsholm; 57°26'07.3"N 19°00'58.0"E). Stacja badawcza Östergarnsholm jest również częścią

sieci ICOS (Integrated Carbon Observatory System) specjalizującej się w pomiarach mikrometeorologicznych głównie dwutlenku węgla. Na stacji znajdują się dwie główne wieże: pierwsza, o wysokości 30 m, jest przeznaczona do obserwacji zjawisk wzajemnego oddziaływania morza i atmosfery (głównie strumieni dwutlenku węgla i pędu, Rutgersson i in., 2020), natomiast druga, o wysokości 10 m (zarządzana przez Uniwersytet Sztokholmski), jest przeznaczona do pomiarów strumieni aerozoli.

Jednym z głównych wniosków płynących z naszych badań jest stwierdzenie, że aerozole marygeniczne mogą pełnić rolę w transporcie mikroplastików na znaczne odległości. W artykule zidentyfikowano, że mikroplastiki zawarte w aerozolu morskim mogą być ponownie emitowane razem z kroplami marygenicznymi z morza do atmosfery, a następnie dalej transportowane przez procesy adwekcji oraz turbulentnej dyfuzji. Zjawisko to zostało określone mianem "transportu skokowego" (ang. grasshopper long-range transport), gdzie mikroplastiki mogą przemieszczać się w atmosferze na duże odległości, a następnie deponować się ponownie na powierzchni morza.

Koncentracje mikroplastików nad Bałtykiem były najwyższe w pobliżu portów i stref przybrzeżnych, co wskazuje na silny wpływ lokalnych źródeł zanieczyszczeń. Co więcej, analiza widmowa wykonana za pomocą mikroskopu ramanowskiego wykazała, że skład mikroplastików w atmosferze był podobny do tych obecnych w wodach morskich, co sugeruje ich wspólne pochodzenie. Najczęściej identyfikowane były tworzywa sztuczne takie jak polietylen (PE) i politereftalan etylenu (PET), które są powszechnie stosowane w przemyśle i gospodarstwach domowych.

Przeprowadzone badania dostarczają cennych informacji na temat mechanizmów odpowiedzialnych za transport mikroplastików w warstwie granicznej pomiędzy morzem i atmosferą. Wyniki te są istotne nie tylko dla regionu Morza Bałtyckiego, ale mają również szersze implikacje dla zrozumienia globalnych procesów transportu zanieczyszczeń.

Osiągnięcie 3:

Porównanie dwóch niezależnych metod pomiarowych strumieni aerozolu marygenicznego.

Ostatnie omawiane dzieło składa się z dwóch artykułów. Pierwszy artykuł Nilsson i in. 2021 (ad 4) opisuje pierwszą w historii kampanię pomiarową związaną z pomiarami strumieni aerozolu metodami kowariancji wirów oraz metodą generacji aerozolu w zbiorniku aerosolowym. Drugi opisany już artykuł Zinke i in (2024) stanowi rozwinięcie analizy porównawczej w oparciu o szerszą bazę danych pomiarowych.

Głównym celem badań były bezpośrednie obserwacje emisji AM w warunkach brzegowych oraz porównanie wyników z symulowanymi emisjami AM w zbiorniku laboratoryjnym z wykorzystaniem lokalnie pobranej wody morskiej. W opracowaniu skupiono się na ocenie emisji aerozolu, zarówno soli morskiej, jak i frakcji organicznej, oraz na weryfikacji istniejących modeli parametryzacji źródeł aerozolu w odniesieniu do rzeczywistych pomiarów terenowych.

Badania przeprowadzone zostały na wyspie Garpen położonej w południowym rejonie Cieśniny Kalmarskiej, między wschodnim wybrzeżem Szwecji a wyspą Öland. Pomiary wykonano w 2005 roku przy użyciu dwóch optycznych liczników cząstek (Grimm OPC). Jeden z liczników próbował powietrze które było wygrzewane w temperaturze 300°C, drugi przyrząd mierzył aerozol w warunkach rzeczywistych. Wygrzewanie w wysokiej temperaturze pozwoliło na usunięcie z aerozolu wszelkich związków organicznych, takich jak np. związki siarki.

Wyniki badań wykazały, że prędkość wiatru jest kluczowym czynnikiem wpływającym na emisję AM, co potwierdzono zarówno w pomiarach terenowych, jak i w symulacjach laboratoryjnych. Wskazaliśmy również, że przy długim fetchu (odległość od brzegu, na której działają fale) emisje AM były wyraźnie

wyższe. Jednocześnie wykazaliśmy, że emisje AM składają się głównie z soli morskiej przy większych rozmiarach cząstek ($\geq 1 \mu\text{m}$ średnicy), podczas gdy mniejsze cząstki były zdominowane przez frakcję organiczną co stanowi potwierdzenie dotychczasowych badań.

Badania te mają kluczowe znaczenie dla zrozumienia dynamiki AM w regionach o niskim zasoleniu, takich jak Morze Bałtyckie. Wykazaliśmy, że istniejące modele parametryzacji źródeł AM, takie jak te zaproponowane przez Mårtensson i in. (2003) i Salter i in. (2015), mogą być dostosowane do niskiego zasolenia poprzez skalowanie rozmiarów cząstek aerozolu proporcjonalnie do sześciennego pierwiastka z zasolenia. Ponadto, włączenie do modeli warstwy organicznej (zgodnie z modelem Ellison et al., 1999) pozwoliło na lepsze dopasowanie wyników do obserwowanych strumieni AM.

Analiza zgodności pomiędzy dwiema metodami została poddana testowi powtórnie w eksperymencie w innym rejonie Morza Bałtyckiego (Zinke i in., 2024). Stwierdzono, że wyniki symulacji laboratoryjnych dobrze odzwierciedlają ogólne trendy w emisjach AM, jednak rzeczywiste strumienie AM były zwykle wyższe, co sugeruje, że warunki laboratoryjne mogą nie w pełni oddawać złożoności procesów zachodzących w rzeczywistych warunkach morskich. Na tej podstawie zaproponowaliśmy współczynnik normalizujący, który pozwolił nam na uogólnienie wykonanych pomiarów i rozszerzenie ich o szerszy zakres rozmiarów mierzonych cząstek aerozolu.

Wyniki przedstawione w artykułach Nilsson i in. (2021) oraz Zinke i in. (2024) dostarczają ważnych informacji na temat mechanizmów generowania AM w regionach o niskim zasoleniu, takich jak Morze Bałtyckie. Stwierdzenie, że symulacje laboratoryjne mogą nie w pełni odzwierciedlać rzeczywiste warunki morskie, podkreśla potrzebę dalszych badań nad optymalizacją metod symulacyjnych. Konieczne jest też kontynuowanie tego typu badań w celu lepszego zrozumieniem procesów fizycznych i biologicznych wpływających na emisje AM.

Badania te są istotne nie tylko ze względu na ich wkład w zrozumienie emisji AM, ale również ze względu na ich potencjalne zastosowanie w modelowaniu klimatycznym, szczególnie w kontekście regionów o niskim zasoleniu i silnym wpływie antropogenicznym. Wyniki te mogą przyczynić się do lepszego zrozumienia i parametryzacji procesów związanych z emisją aerozolu morskiego, co jest kluczowe dla dokładnego modelowania cykli aerozolu i ich wpływu na klimat.

5. Informacja o wykazywaniu się istotną aktywnością naukową albo artystyczną realizowaną w więcej niż jednej uczelni, instytucji naukowej lub instytucji kultury, w szczególności zagranicznej.

W ramach pozyskanego stypendium im. Bekera ze środków Narodowej Agencji Wymiany Akademickiej odbyłem staż naukowy w ośrodku Stockholm University - Department of Environmental Science (SU), w grupie badawczej ACESI (Luftlab).

Dzięki realizacji wymienionego stypendium opublikowane zostały dotychczas cztery manuskrypty naukowe, które wchodzi w skład mojego dzieła opisanego w autoreferacie (publikacje 1-4).

Podczas stażu w ramach mojej współpracy badawczej z Stockholm University oraz Milan University Bicocca (UNIMIB) wykonaliśmy wspólny rejs badawczy (18-30.10.2019), którego jednym z celów było wykonanie pomiarów koncentracji mikroplastiku w wodzie oraz powietrzu. Podczas wspomnianego rejsu prowadziłem ponadto pomiary strumieni aerozolu. W ramach naszej współpracy, razem z moim opiekunem stażu jesteśmy współautorami manuskryptu naukowego, który opisuje wpływ strumieni aerozolu na transport cząstek mikroplastiku w przywodnej warstwie atmosfery. Manuskrypt został opublikowany w czasopiśmie naukowym pt. "Airborne and marine microplastics above and in the Baltic Sea: an emerging role of sea-air interaction?" Ferrero i in. (2022).

Kolejnym etapem prac było opracowanie dotychczasowych danych pomiarowych z pokładu r/v Oceania. Wielolecie pomiarów strumieni aerozolu metodą gradientową wymaga dokładnej analizy jakości oraz porównania wyników z danymi meteorologicznymi oraz falowymi. Dane przeanalizowane zostały dodatkowo z perspektywy trajektorii mas powietrza uzyskanych z systemu HYSPLIT (The Air Resources Laboratorys HYbrid Single-Particle Lagrangian Integrated Trajectory, Stein i in. 2015)). Ponadto uwzględniono nowe parametry meteorologiczne oraz oceanograficzne (takie jak: historia wiatru, wiek fali, stromość fali, wysokość fali znacznej, temperatura wody i powietrza, gradient temperatury, parametr stabilności Monina-Obuhova), które pozwolą wzbogacić parametryzację strumieni aerozolu. Wyniki prac opublikowane zostały w publikacji Markuszewski i in. (2024).

Obok analizy bazy danych za którą odpowiadałem, otrzymałem dostęp do dziesięciolecia danych pomiarowych ze stacji badawczej Östergarnsholm, która znajduje się pod nadzorem mojego opiekuna naukowego. Na podstawie wysokorozdzielczych danych turbulencji zmierzonych metodą kowariancji wirów obliczyłem strumienie aerozolu, ciepła, CO₂ i wilgoci dla całego okresu danych (2011-2021). W kolejnym kroku opracowywana została przez nas metodologia korekcji błędów. Metoda kowariancji wirów charakteryzuje się stosunkowo prostą techniką pomiarową, jednak kluczem sukcesu jest późniejsza odpowiednia metodologia w opracowaniu danych. Ścieżka kolejnych korekcji jest stosunkowo skomplikowana i wymaga czasu i uwagi. Lista opracowanych poprawek obejmowała: systematic error of eddy covariance, fluctuation attenuation due to air transport in the tubes of closed path systems, particle losses, instrument limited response time, Webb correction, Kowalski correction, random error, discrete counting error, motion correction. Opracowana metodologia poprawek do strumieni aerozolu mierzonych metodą kowariancji wirów została częściowo opisana przez nas w artykule Zinke i in., 2024 (artykuł 2 z listy dzieł).

Podczas trwania stażu na Uniwersytecie Sztokholmskim zorganizowałem i wziąłem udział w 3 rejsach badawczych oraz przygotowałem system pomiarowy, który posłużył w pomiarach podczas 3 miesięcznego rejsu arktycznego. Dwa rejsy (podczas jednego byłem kierownikiem naukowym) na pokładzie r/v Oceania skupiały się na badaniach emisji aerozolu oraz analizie własności mikrowarstwy powierzchniowej morza. Prowadzone również były jednoczesne badania koncentracji mikroplastiku w wodzie i powietrzu. Rejsy realizowane były we współpracy z SU oraz UNIMIB, obok organizacji rejsów aktywnie pośredniczyłem w koordynacji naukowo-technicznej pomiędzy uczelniami oraz moją jednostką macierzystą czyli Instytutem Oceanologii PAN.

Podczas rejsu majowego w 2021 roku dodatkowo zdeponowana została boja służąca do pasywnych pomiarów szumów akustycznych falowania. Pomiar miał na celu rozpoczęcie współpracy naukowej pomiędzy IOPAN, SU z Uppsala University (UU). UU jest znaną i prestiżową jednostką, w której prowadzone są badania oceanograficzne oraz meteorologiczne m.in. również w rejonie wyspy Östergarnsholm gdzie znajduje się stacja ICOS. Nasze pomiary miały na celu zestawienie pomiarów pasywnych z aktywnymi pomiarami akustycznymi (prądomierz akustyczny ADCP Nortek), za które odpowiadał UU. Kampania nastawiona była na długoterminowe wspólne pomiary, które trwały 4 miesiące. Jesienią 2021 oba przyrządy zostały podjęte z wody. Obecnie trwają prace na przetwarzaniem danych. Moją rolą w zadaniu badawczym będzie zbadanie wpływu własności parametrów falowania wiatrowego mierzonych metodami pasywnymi (podwodne szumy akustyczne) jak i aktywnymi (turbulencja falowania) na strumienie zarówno aerozolu jak i ciepła, wilgoci oraz CO₂. Dzięki stypendium możliwe było nawiązanie mojej współpracy z naukowcami z UU oraz koordynacja działań pomiędzy SU, UU i IOPAN.

W ramach realizacji stypendium zostałem również zapoznany z zasadami działania stacji pomiarowej na wyspie Östergarnsholm na wschodnim wybrzeżu Gotlandii. Odbyłem łącznie cztery wizyty mające

na celu wykonanie niezbędnych czynności serwisowych oraz kalibracji urządzeń. Podczas wizyt zdobyłem bezcenne doświadczenie w pracy terenowej.

6. Informacja o osiągnięciach dydaktycznych, organizacyjnych oraz popularyzujących naukę lub sztukę.

Podczas stażu na Uniwersytecie Sztokholmskim prowadziłem również aktywność dydaktyczną. Przygotowałem i poprowadziłem zajęcia (wykład, laboratorium/ćwiczenia oraz zajęcia terenowe w stacji pomiarowej ICOS, Norunda) dla studentów 3 roku studiów licencjackich. Nazwa przedmiotu: environmental fieldwork (kod przedmiotu VT22). Przygotowane przeze mnie zajęcia dotyczyły meteorologii stosowanej oraz podstawowych zagadnień fizyki atmosfery i turbulencji. Uczestniczyłem również w roli prowadzącego w jednodniowej wycieczce edukacyjnej na stację badawczą ICOS Norunda. Studenci zapoznani zostali ze środowiskowymi technikami pomiarowymi geofizyki (geologia, atmosfera, wzajemne oddziaływanie lądu i atmosfery). W następnej kolejności studenci odbyli laboratorium komputerowe. Podczas ćwiczeń laboratoryjnych studenci zapoznali się z metodami pracy z danymi zebranymi metodą kowariancji wirów oraz pomiarów aerozolowych. Ponadto wykonana została praca na danych aerozolowych oraz meteorologicznych pochodzących ze stacji ICOS Norunda.

W 2019 roku byłem promotorem dwóch prac licencjackich zrealizowanych na Uniwersytecie Gdańskim (Wydział Oceanografii i Geografii na kierunku geografia):

-Klaudia Tomaszewska (*Własności koncentracji aerozolu w zależności od warunków meteorologicznych w rejonie Zatoki Gdańskiej w porze jesiennej*),

-Chrystian Wojowski (*Własności koncentracji aerozolu w zależności od warunków meteorologicznych w rejonie Bałtyku Właściwego w porze wiosenno-letniej*).

W 2021 roku w trybie zdalnym zrealizowane zostały praktyki studenckie dla studentów 2 roku studiów inżynierskich Politechniki Gdańskiej. Podczas praktyk studenci zapoznali się z zasadami działania podstawowych meteorologicznych oraz aerozolowych urządzeń pomiarowych. Studenci wykonali serie pomiarów za pomocą czujników aerozolowych oraz w dalszej kolejności przeanalizowane i przetworzone zostały serie czasowe. Wiedza oraz efekty praktyk zostały zaprezentowane podczas seminarium mojej macierzystej Pracowni Wzajemnego Oddziaływania Morza i Atmosfery Instytutu Oceanologii PAN (IOPAN).

W latach 2017-2018 (dwa roczniki) prowadziłem zajęcia dla doktorantów będących uczestnikami interdyscyplinarnych studiów polarnych (Polar-KNOW). Tytuł prowadzonych wykładów i ćwiczeń: „Wstęp do meteorologii i badań aerozolowych”.

W 2016 roku jako współorganizator oraz wykładowca brałem udział w Zimowych Warsztatach Badawczych z fizyki atmosfery pt.: „Struktura optyczna smogu i efekty termodynamiczne na warunki w terenie górskim” w ramach realizacji projektu NCN Sonata bis (2012/05/E/ST10/01578). Wydarzenie koordynowane było przez Instytut Geofizyki, Wydziału Fizyki, Uniwersytetu Warszawskiego. Kierownikiem projektu był prof. Krzysztof Markowicz. Szkoła odbyła się w Jaworzynie Krynickiej.

W latach 2014-2015 brałem czynny udział w organizacji Bałtyckiego Festiwalu Nauki oraz Sopockich Dni Nauki.

Od 2015 roku na zaproszenie dr hab. Mateusza Zawadzkiego w ramach przedmiotu Fizyka Środowiska dla studentów II roku Fizyki Technicznej regularnie wygłaszam wykłady, w których opisuję badania prowadzone przez naukowców IOPAN na statku badawczym r/v Oceania.

W latach 2017 oraz 2018 wystąpiłem w dwóch materiałach filmowych opublikowanych na platformie YouTube dotyczących popularyzacji badań IOPAN prowadzonych na pokładzie statku badawczego r/v Oceania:

<https://youtu.be/2AySwUkW0Js?si=O3ukTU9OETzdLt06>

<https://youtu.be/s6hd2ZPiZxo?si=BYFGWSJDMYooYAp0>

7. Oprócz kwestii wymienionych w pkt. 1-6, wnioskodawca może podać inne informacje, ważne z jego punktu widzenia, dotyczące jego kariery zawodowej.

Wziąłem udział w łącznie w 26 rejsach badawczych na pokładach statków r/v Oceania oraz r/v Electra. Byłem kierownikiem naukowych sześciu rejsów badawczych:

- Morze Bałtyckie: 22-30.10.2018, 18-30.10.2019, 3-15.02.2020, 10-20.11.2020, 7-16.02.2022;
- rejs AREX2019: 12.06-19.06.2019 (Morze Bałtyckie, Morze Północne, etap Gdańsk – Tromsø).

Udział w szkołach letnich oraz kursach:

- 7th SOLAS Summer School, Cargese, Corsica, France, 23.07 – 4.08.2018,
- Upper Ocean Turbulence - Summer School, szkoła letnia pod opieką dr Darka Boguckiego, Politechnika Gdańska, 25 lipca – 12 sierpnia, 2016.
- Warsztaty poświęcone komunikacji naukowej pod opieką prof. Edwarda Potworowskiego, które odbyły się w Instytucie Geofizyki PAN. 17-21.11.2014
- 9th Summer School on Atmospheric Aerosol Physics, Measurement, and Sampling - Hyytiälä, Finland, 4-10 maja 2013.
- Udział w semestralnym kurse Meteorologia przez internet (1100-MPI-OG, semestr zimowy 2013).

Nagrody

2018	II miejsce w konkursie na najlepszą prezentację popularnonaukową, Kuźnia Młodych Talentów, Akademia Młodych Naukowców, 18-21 września 2018 r. Jabłonna,
2018	III miejsce w konkursie na najlepszą prezentację popularnonaukową przyznane głosowaniem publiczności, Kuźnia Młodych Talentów, Akademia Młodych Naukowców, 18-21 września 2018 r., Jabłonna,
2015-2016	Nagrodzony stypendium Centrum Studiów Polarnych „Polar – KNOW”,
2014-2015	Nagrodzony stypendium Centrum Studiów Polarnych „Polar – KNOW”,

Opis innych badań naukowych w których brałem udział:

Moim głównym nurtem prowadzonych badań jest emisja aerozolu morskiego, jednak moje zainteresowania naukowe wykraczają poza tę stosunkowo wąską dziedzinę badań. Badania strumieni

wymiany pomiędzy morzem i atmosferą wpisują się w szerszą dziedzinę badań zwaną mikrometeorologią (Foken et al., 2018). Dziedzina ta zajmuje się m.in. opisywaniem wszelkich strumieni wymiany oraz własności zachodzących pomiędzy różnymi ośrodkami. Dzięki mojej znajomości technik mikrometeorologicznych (jakimi są metoda gradientowa oraz metoda kowariancji wirów) mogłem włączyć się w badania wykraczające poza badanie emisji kropel z powierzchni morza.

Badania szumów hydroakustycznych

Artykuł Dragan et al., (2024) jest kontynuacją badań nad szumami hydroakustycznymi, które zapoczątkowaliśmy w publikacji Markuszewski et al., (2020). Głównym celem publikacji jest opis techniki pasywnych pomiarów podwodnego szumu akustycznego, które wykorzystane zostały do badań własności pola falowego w rejonie Zatoki Gdańskiej. Badania te będą kontynuowane – nasz zespół jest w posiadaniu dwumiesięcznej serii czasowej jednoczesnych pomiarów szumów hydroakustycznych, pomiarów mikrometeorologicznych (strumienie pędu, aerozol, ciepła, CO₂) oraz turbulencji falowania morskiego (mierzonej za pomocą prądomierza akustycznego). Pomiary wykonane zostały w rejonie Gotlandii (stacja ICOS przy wyspie Osterngarsholm) we współpracy ze Stockholm University, Uppsala University oraz Bonn University.

Badania emisji pyłów

Kolejnym dokonaniem wykraczającym poza omawiane dzieło rozprawy habilitacyjnej jest aplikacja metody gradientowej do parametryzacji emisji pyłu ze zwałowiska kopalnianego. Publikacja Szymankiewicz i in. (2024) opisuje jedno z pierwszych na świecie bezpośrednich pomiarów emisji z hałdy będącej składowiskiem popiołu z elektrociepłowni. Jedną z naszych hipotez badawczych było stwierdzenie że dotychczas wykorzystywane arbitralne założenie emisji z tego typu hałd było znacząco przesadzone. W tym celu wykonanych zostało szereg pomiarów aerozolowych za pomocą balonu na uwięzi i małych liczników cząstek. Wykorzystana przeze mnie metoda gradientowa posłużyła do wyznaczenia emisji aerozolu co pozwoliło na sparametryzowanie zjawiska i jednocześnie potwierdziło że dotychczas wykorzystywane parametryzacje znacząco przeszacowują skalę emisji zanieczyszczeń. Wyznaczona funkcja źródłowa została zaimplementowana w modelu aerozolowym GEM-AQ i wykorzystana przez Instytut Ochrony Środowiska – PIB.

Badania własności nad własnościami fizycznymi aerozolu

Ponieważ moje zainteresowania naukowe łączą mikrometeorologię z badaniami aerozolu w rejonach morskich, miałem również okazję brać udział w badaniach związanych z własnościami fizycznymi i chemicznymi aerozolu atmosferycznego. Przykładami prac dotyczących tej tematyki, których jestem współautorem to m.in. Ferrero i in. (2024), Losi i in. (2023), Makuch i in. (2021), Ferrero i in. (2019). Badania te skupiają się w głównej mierze na analizie własności radiacyjnych aerozolu absorbującego w rejonie Arktyki Europejskiej oraz Morza Bałtyckiego i ich wpływu na budżet energetyczny atmosfery. Razem z partnerami z Milan University – Bicoca zamierzamy kontynuować pomiary oraz cykl publikacji.

.....
(podpis wnioskodawcy)

Bibliografia

- Allen, S., Allen, D., Moss, K., Le Roux, G., Phoenix, V. R., and Sonke, J. E.: Examination of the ocean as a source for atmospheric microplastics, *PLoS ONE*, 15, 1–14, <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0232746>, 2020.
- Andreae, M. L., and Rosenfeld, D.: Aerosol-cloud-precipitation interactions. Part 1. The nature and sources of cloud-active aerosols, *Earth-Sci. Rev.*, 89, 13–44, 2008.
- Andreas, E. L., and Emanuel, K. A.: Effects of sea spray on tropical cyclone intensity, *J. Atmos. Sci.*, 58, 3741–3751, 2001.
- Andreas, E. L., Kilthau, W. P., Bothe, D. W., Radway, J. C., Aller, J. Y., and Knopf, D. A.: The influence of marine microbial activities on aerosol production: A laboratory mesocosm study, *J. Geophys. Res.-Oceans*, 112, C11, <https://doi.org/10.1029/2007JC004184>, 2008.
- Andreas, E. L.: Sea spray and the turbulent air-sea heat fluxes, *J. Geophys. Res.*, 97, 11429–11441, 1992.
- Andreas, E. L.: A review of the sea spray generation function for the open ocean, *Adv. Fluid Mech.*, 33, 1–46, 2002.
- Andreas, E. L.: Spray stress revisited, *J. Phys. Oceanogr.*, 34, 1429–1440, [https://doi.org/10.1175/1520-0485\(2004\)034<1429>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0485(2004)034<1429>2.0.CO;2), 2004.
- Andreas, E. L.: Fallacies of the enthalpy transfer coefficient over the ocean in high winds, *J. Atmos. Sci.*, 68, 1435–1445, 2011.
- Bao et al., 2011 - Bao, J. W., Fairall, C. W., Michelson, S. A., and Bianco, L.: Parameterizations of sea-spray impact on the air-sea momentum and heat fluxes, *Mon. Weather Rev.*, 139, 3781–3797, 2011.
- Bianco, L., Bao, J. W., Fairall, C. W., and Michelson, S. A.: Impact of sea-spray on the atmospheric surface layer, *Bound.-Layer Meteorol.*, 140, 361–381, 2011.
- Boucher, O., Randall, D., Artaxo, P., Bretherton, C., Feingold, G., Forster, P., ... and Zhang, X. Y.: Clouds and aerosols, in: *Climate change 2013: The physical science basis. Contribution of working group I to the fifth assessment report of the intergovernmental panel on climate change*, Cambridge University Press, 571–657, 2013.
- Bowyer, P. A., Woolf, D. K., and Monahan, E. C.: Temperature dependence of the charge and aerosol production associated with a breaking wave in a whitecap simulation tank, *J. Geophys. Res.-Oceans*, 95, 5313–5319, <https://doi.org/10.1029/JC095iC04p05313>, 1990.
- Carslaw, K. S., Boucher, O., Spracklen, D. V., Mann, G. W., Rae, J. G. L., Woodward, S., and Kulmala, M.: A review of natural aerosol interactions and feedbacks within the Earth system, *Atmos. Chem. Phys.*, 10, 1701–1737, <https://doi.org/10.1194/acp-10-1701-2010>, 2010.
- Cavalli, F., Facchini, M. C., Decesari, S., Mircea, M., Emblico, L., Fuzzi, S., ... and Dell'Acqua, A.: Advances in characterization of size-resolved organic matter in marine aerosol over the North Atlantic, *J. Geophys. Res.-Atmos.*, 109, D24, <https://doi.org/10.1029/2004JD005137>, 2004.
- Cochran, R. E., Ryder, O. S., Grassian, V. H., and Prather, K. A.: Sea spray aerosol: The chemical link between the oceans, atmosphere, and climate, *Acc. Chem. Res.*, 50, 599–604, <https://doi.org/10.1021/acs.accounts.6b00603>, 2017.
- Darr, J., Gottuso, S., Alfara, M., Birge, D., Ferris, K., Woods, D., ... and Johnson, A.: The hydropathy scale as a gauge of hygroscopicity in sub-micron sodium chloride-amino acid aerosols, *J. Phys. Chem. A*, 122, 8062–8070, <https://doi.org/10.1021/acs.jpca.8b07119>, 2018.
- De Leeuw, G., Andreas, E. L., Anguelova, M. D., Fairall, C. W., Lewis, E. R., O'Dowd, C., ... & Schwartz, S. E. (2011). Production flux of sea spray aerosol. *Reviews of Geophysics*, 49(2). <https://doi.org/10.1029/2010RG000349>
- Edson, J. B., and Fairall, C. W.: Spray droplet modeling. 1. Lagrangian model simulation of the turbulent transport of evaporating droplets, *J. Geophys. Res.*, 99, 25295–25311, 1994.
- Facchini, M. C., Rinaldi, M., Decesari, S., Carbone, C., Finessi, E., Mircea, M., ... and O'Dowd, C. D.: Primary submicron marine aerosol dominated by insoluble organic colloids and aggregates, *Geophys. Res. Lett.*, 35, L17, <https://doi.org/10.1029/2008GL034210>, 2008.
- Fairall, C. W., Kepert, J. D., and Holland, G. J.: The effect of sea spray on surface energy transports over the ocean, *Glob. Atmos. Ocean Syst.*, 2, 121–142, 1994.
- Ferrero, L., Scibetta, L., Markuszewski, P., Mazurkiewicz, M., Drozdowska, V., Makuch, P., ... and Bolzacchini, E.: Airborne and marine microplastics from an oceanographic survey at the Baltic Sea: an emerging role of air-sea interaction?, *Sci. Total Environ.*, 824, 153709, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.153709>, 2022.
- Forestieri, S. D., Moore, K. A., Martinez Borrero, R., Wang, A., Stokes, M. D., and Cappa, C. D.: Temperature and composition dependence of sea spray aerosol production, *Geophys. Res. Lett.*, 45, 7218–7225, <https://doi.org/10.1029/2018GL078193>, 2018.
- Garbalewski, Cz.: *Fizyka aerologicznej aktywności morza*, Instytut Oceanologii PAN, Sopot, 1999.
- Hultin, K. A., Krejci, R., Pinhassi, J., Gomez-Consarnau, L., Mårtensson, E. M., Hagström, Å., and Nilsson, E. D.: Aerosol and bacterial emissions from Baltic Seawater, *Atmos. Res.*, 99, 1–14, <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2010.08.018>, 2011.
- Johansson, J., and Curstedt, T.: Synthetic surfactants with SP-B and SP-C analogues to enable worldwide treatment of neonatal respiratory distress syndrome and other lung diseases, *J. Intern. Med.*, 285, 165–186, 2019.
- Keene, W. C., Maring, H., Maben, J. R., Kieber, D. J., Pszenny, A. A., Dahl, E. E., ... and Sander, R.: Chemical and physical characteristics of nascent aerosols produced by bursting bubbles at a model air-sea interface, *J. Geophys. Res.-Atmos.*, 112, D21, <https://doi.org/10.1029/2007JD008464>, 2007.
- Kiger, K. T., and Duncan, J. H.: Air-entrainment mechanisms in plunging jets and breaking waves, *Annu. Rev. Fluid Mech.*, 44, 563–596, 2012.
- Lewis, E. R., and Schwartz, S. E.: *Sea Salt Aerosol Production: Mechanisms, Methods, Measurements, and Models*, Am. Geophys. Union, Washington, DC, 2004.
- Long, M. S., Keene, W. C., Kieber, D. J., Erickson, D. J., and Maring, H.: A sea-state based source function for size-and composition-resolved marine aerosol production, *Atmos. Chem. Phys.*, 11, 1203–1216, <https://doi.org/10.5194/acp-11-1203-2011>, 2011.
- Mårtensson, E. M., Nilsson, E. D., de Leeuw, G., Cohen, L. H., and Hansson, H. C.: Laboratory simulations and parameterization of the primary marine aerosol production, *J. Geophys. Res.-Atmos.*, 108, D9, <https://doi.org/10.1029/2002JD002263>, 2003.
- Marx, S., Lavin, K., Hageman, K., Kamber, B., O'Loingsigh, T., and McTainsh, G.: Trace elements and metal pollution in aerosols at an alpine site, New Zealand: sources, concentrations and implications, *Atmos. Environ.*, 82, 206–217, <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2013.10.019>, 2014.
- Mehta, S., Ortiz-Suslow, D. G., Smith, A. W., and Haus, B. K.: A laboratory investigation of spume generation in high winds for fresh and seawater, *J. Geophys. Res.-Atmos.*, 124, 11297–11312, <https://doi.org/10.1029/2019JD030928>, 2019.
- Monahan, E. C., Davidson, K. L., and Spiel, D. E.: Whitecap aerosol productivity deduced from simulation tank measurements, *J. Geophys. Res.-Oceans*, 87, 8898–8904, <https://doi.org/10.1029/JC087iC11p08898>, 1982.
- Nilsson, E. D., Rannik, Ü., Swietlicki, E., Leck, C., Aalto, P. P., Zhou, J., and Norman, M.: Turbulent aerosol fluxes over the Arctic Ocean: 2. Wind-driven sources from the sea, *J. Geophys. Res.-Atmos.*, 106, 32139–32154, <https://doi.org/10.1029/2000JD900747>, 2001.
- Nilsson et al., 2001 (second appearance) - Nilsson, E. D., Rannik, Ü., Swietlicki, E., Leck, C., Aalto, P. P., Zhou, J., and Norman, M.: Turbulent aerosol fluxes over the Arctic Ocean: 2. Wind-driven sources from the sea, *J. Geophys. Res.-Atmos.*, 106, 32139–32154, <https://doi.org/10.1029/2000JD900747>, 2001.

- Nilsson, E. D., Hultin, K. A., Mårtensson, E. M., Markuszewski, P., Rosman, K., and Krejci, R.: Baltic sea spray emissions: In situ eddy covariance fluxes vs. simulated tank sea spray, *Atmosphere*, 12, 274, <https://doi.org/10.3390/atmos12020274>, 2021.
- Oppo, C., Bellandi, S., Degli Innocenti, N., Stortini, A. M., Loglio, G., Schiavuta, E., and Cini, R.: Surfactant components of marine organic matter as agents for biogeochemical fractionation and pollutant transport via marine aerosols, *Mar. Chem.*, 63, 235–253, 1999.
- Parent, P., Laffon, C., Trillaud, V., Grauby, O., Ferry, D., Limoges, A., ... and Piazzola, J.: Physicochemical characterization of aerosols in the coastal zone: evidence of persistent carbon soot in the marine atmospheric boundary layer (MABL) background, *Atmosphere*, 14, 291, <https://doi.org/10.3390/atmos14020291>, 2023.
- Petelski, T., and Piskozub, J.: Vertical coarse aerosol fluxes in the atmospheric surface layer over the North Polar Waters of the Atlantic, *J. Geophys. Res.-Oceans*, 111, C6, <https://doi.org/10.1029/2005JC003295>, 2006.
- Petelski, T., Markuszewski, P., Makuch, P., Jankowski, A., and Rozwadowska, A.: Studies of vertical coarse aerosol fluxes in the boundary layer over the Baltic Sea, *Oceanologia*, 56, 697–710, <https://doi.org/10.5697/oc.56-4.697>, 2014.
- Petelski, T.: Marine aerosol fluxes over open sea calculated from vertical concentration gradients, *J. Aerosol Sci.*, 34, 359–371, [https://doi.org/10.1016/S0021-8502\(02\)00189-1](https://doi.org/10.1016/S0021-8502(02)00189-1), 2003.
- Ribeiro, C. P., and Mewes, D.: On the effect of liquid temperature upon bubble coalescence, *Chem. Eng. Sci.*, 61, 5704–5716, <https://doi.org/10.1016/j.ces.2006.04.043>, 2006.
- Salter, M. E., Nilsson, E. D., Butcher, A., and Bilde, M.: On the seawater temperature dependence of the sea spray aerosol generated by a continuous plunging jet, *J. Geophys. Res.-Atmos.*, 119, 9052–9072, <https://doi.org/10.1002/2013JD021376>, 2014.
- Salter, M. E., Zieger, P., Acosta Navarro, J. C., Grythe, H., Kirkevåg, A., Rosati, B., ... and Nilsson, E. D.: An empirically derived inorganic sea spray source function incorporating sea surface temperature, *Atmos. Chem. Phys.*, 15, 11047–11066, <https://doi.org/10.5194/acp-15-11047-2015>, 2015.
- Savelyev, I. B., Anguelova, M. D., Frick, G. M., Dowgiallo, D. J., Hwang, P. A., Caffrey, P. F., and Bobak, J. P.: On direct passive microwave remote sensing of sea spray aerosol production, *Atmos. Chem. Phys.*, 14, 11611–11631, <https://doi.org/10.5194/acp-14-11611-2014>, 2014.
- Seinfeld, J. H., and Pandis, S. N.: *Atmospheric Chemistry and Physics: From Air Pollution to Climate*, Wiley, New York, 1998.
- Sha, B., Johansson, J. H., Benskin, J. P., Cousins, I. T., and Salter, M. E.: Influence of water concentrations of perfluoroalkyl acids (PFAAs) on their size-resolved enrichment in nascent sea spray aerosols, *Environ. Sci. Technol.*, 55, 9489–9497, <https://doi.org/10.1021/acs.est.0c03804>, 2020.
- Sha, B., Johansson, J. H., Tunved, P., Bohlin-Nizzetto, P., Cousins, I. T., and Salter, M. E.: Sea spray aerosol (SSA) as a source of perfluoroalkyl acids (PFAAs) to the atmosphere: field evidence from long-term air monitoring, *Environ. Sci. Technol.*, 56, 228–238, <https://doi.org/10.1021/acs.est.1c04277>, 2021.
- Spiel, D. E.: On the births of film drops from bubbles bursting on seawater surfaces, *J. Geophys. Res.-Oceans*, 103, 24907–24918, <https://doi.org/10.1029/98JC02233>, 1998.
- Stein, A.F., Draxler, R.R., Rolph, G.D., Stunder, B.J.B., Cohen, M.D., and Ngan, F., (2015). NOAA's HYSPLIT atmospheric transport and dispersion modeling system, *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 96, 2059-2077, <http://dx.doi.org/10.1175/BAMS-D-14-00110.1>
- Textor, C., Schulz, M., Guibert, S., Kinne, S., Balkanski, Y., Bauer, S., ... and Liousse, C.: Analysis and quantification of the diversities of aerosol life cycles within AeroCom, *Atmos. Chem. Phys.*, 6, 1777–1813, 2006.
- Tyree, C. A., Hellion, V. M., Alexandrova, O. A., and Allen, J. O.: Foam droplets generated from natural and artificial seawaters, *J. Geophys. Res.-Atmos.*, 112, D12, <https://doi.org/10.1029/2006JD007729>, 2007.
- Vagle, S., Large, W. G., & Farmer, D. M. (1990). An evaluation of the WOTAN technique of inferring oceanic winds from underwater ambient sound. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 7(5), 576–595. [https://doi.org/10.1175/1520-0426\(1990\)007<0576:AEOTWT>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0426(1990)007<0576:AEOTWT>2.0.CO;2)
- Woolf, D. K., Bowyer, P. A., and Monahan, E. C.: Discriminating between the film drops and jet drops produced by a simulated whitecap, *J. Geophys. Res.-Oceans*, 92, 5142–5150, <https://doi.org/10.1029/JC092iC05p05142>, 1987.
- Xu, W., Ovadnevaite, J., Fossum, K. N., Lin, C., Huang, R. J., Ceburnis, D., and O'Dowd, C.: Sea spray as an obscured source for marine cloud nuclei, *Nat. Geosci.*, 15, 282–286, <https://doi.org/10.1038/s41561-022-0101-1>, 2022.
- Yang, X., Frey, M. M., Rhodes, R. H., Norris, S. J., Brooks, I. M., Anderson, P. S., ... and Wolff, E. W.: Sea salt aerosol production via sublimating wind-blown saline snow particles over sea ice: parameterizations and relevant microphysical mechanisms, *Atmos. Chem. Phys.*, 19, 8407–8424, <https://doi.org/10.5194/acp-19-8407-2019>, 2019.
- Zábori, J., Matisāns, M., Krejci, R., Nilsson, E. D., and Ström, J.: Artificial primary marine aerosol production: a laboratory study with varying water temperature, salinity, and succinic acid concentration, *Atmos. Chem. Phys.*, 12, 10709–10724, <https://doi.org/10.5194/acp-12-10709-2012>, 2012.
- Zinke, J., Nilsson, E. D., Zieger, P., and Salter, M. E.: The effect of seawater salinity and seawater temperature on sea salt aerosol production, *J. Geophys. Res.-Atmos.*, 127, e2021JD036005, <https://doi.org/10.1029/2021JD036005>, 2022.
- Zinke, J., Nilsson, E. D., Markuszewski, P., Zieger, P., Mårtensson, E. M., Rutgersson, A., ... and Salter, M. E.: Sea spray emissions from the Baltic Sea: comparison of aerosol eddy covariance fluxes and chamber-simulated sea spray emissions, *Atmos. Chem. Phys.*, 24, 1895–1918, <https://doi.org/10.5194/acp-24-1895-2024>, 2024.