

**Instytut Oceanologii Polskiej Akademii Nauk  
Pracownia Teledetekcji Morza  
Powstańców Warszawy 55, 81-712 Sopot**



**Analiza potencjalnych wpływów i rozptywu zawiesiny i rozpuszczonej materii organicznej  
w Zatoce Gdańskiej dla okresu od maja do sierpnia 2018.  
Ewolucja przestrzennych rozkładów zawiesiny na Motławie w analogicznym okresie**

***(wersja 1.1)***

**Sopot, 3 września 2018**

Opracowanie wykonane w Pracowni Teledetekcji Morza  
Instytutu Oceanologii PAN w Sopocie  
kierowanej przez dr hab. Mirosława Dareckiego prof. IOPAN,

na podstawie zlecenia Gdańskiej Infrastruktury Wodociągowo-Kanalizacyjnej Sp. z o.o.  
z dnia 7 sierpnia 2018 r. (nr zlecenia: 2018/ZLE/353)



INSTYTUT OCEANOLOGII  
POLSKIEJ AKADEMII NAUK  
81-712 SOPÓT  
ul. Powstańców Warszawy 55  
tel. (+48 58) 731 16 00  
fax (+48 58) 551 21 30

*Mirosław Darecki*

## Spis treści

1. Wprowadzenie	4
2. Podstawy teoretyczne	4
3. Metodyka badań	5
3.1 Wprowadzenie do metodyki	5
3.2 Zastosowane metody	9
3.3 Wykaz wykorzystanych danych satelitarnych	11
4. Opis przestrzennej zmienności wybranych parametrów w rejonie badań	12
4.1. Warunki panujące na akwenu przed zrzutem ścieków	12
4.2. Opis sytuacji w trakcie zrzutu ścieków i bezpośrednio po nim	18
4.3. Sytuacja po dwóch tygodniach i w okresie późniejszym od zrzutu ścieków	28
5. Podsumowanie	36
6. Literatura	37

## 1. Wprowadzenie

Niniejsze opracowanie stanowi prezentację i omówienie przestrzennego zróżnicowania i zmian w czasie optycznych charakterystyk wód Martwej Wisły i ujścia do niej Motławy oraz sąsiadującego z nimi obszaru Zatoki Gdańskiej, wykonanych z wykorzystaniem obserwacji satelitarnych w widzialnym zakresie widma elektromagnetycznego. Badaniami objęto okres czasu przed i po awaryjnym zrzucie ścieków z przepompowni na Ołowiance w dniach 15 – 17 maja 2018 r. W tym czasie do badanego akwenu zrzucano około 100 000 m<sup>3</sup> ścieków. Duża ilość substancji zawieszonych oraz rozpuszczonej materii organicznej w takich ściekach, pozwala na śledzenie ich rozprzestrzeniania się w wodach powierzchniowych za pomocą zmian w charakterystyce spektralnej radiacji oddolnej, określanej potocznie 'kolorem morza'. Zmiany te mogą z powodzeniem być określane także za pomocą pomiarów satelitarnych. Specyfika pomiarów satelitarnych pozwala na regularne uzyskiwanie informacji o całym badanym obszarze, praktycznie w tym samym czasie, stanowiąc jednocześnie właściwą bazę do określenia przestrzennego zróżnicowania badanych parametrów oraz ich zmian w czasie, m.in. ich przemieszczana się, względnie zmian w ich stężeniach.

## 2. Podstawy teoretyczne

Substancje rozpuszczone i zawieszane w wodzie morskiej zmieniają natężenie oraz charakterystyki spektralne strumienia światła wychodzącego z toni wodnej, określanego często mianem 'koloru morza'. Naturalne światło słoneczne, pochodzące bezpośrednio od Słońca czy rozproszone w atmosferze w kierunku powierzchni morza, przenika do toni wodnej, gdzie ulega procesom absorpcji i rozpraszania, zarówno przez samą wodę jak i przez optycznie znaczące jej składniki, m.in. zawieszinę organiczną i nieorganiczną, rozpuszczone substancje organiczne. Zjawiska absorpcji jak i rozpraszania są silnie zróżnicowane dla poszczególnych komponentów wody morskiej i to nie tylko pod względem ich intensywności, ale także ze względu na ich spektralne zależności (zróżnicowanie intensywności w zależności od długości fali promieniowania widzialnego, ulegającego absorpcji lub rozpraszaniu). W efekcie, rozproszone do tyłu światło wychodzące z toni wodnej jest istotnie zmienione w stosunku do światła dochodzącego do powierzchni wody, a wielkość tych zmian i ich spektralne charakterystyki, powiązane są bezpośrednio z ilością i jakością optycznie znaczących komponentów wody morskiej.

Ścieki, z uwagi na bardzo dużą zawartość zawiesiny oraz rozpuszczonej w nich materii organicznej, zwykle znacznie przekraczających ilości występujące naturalnie w danym



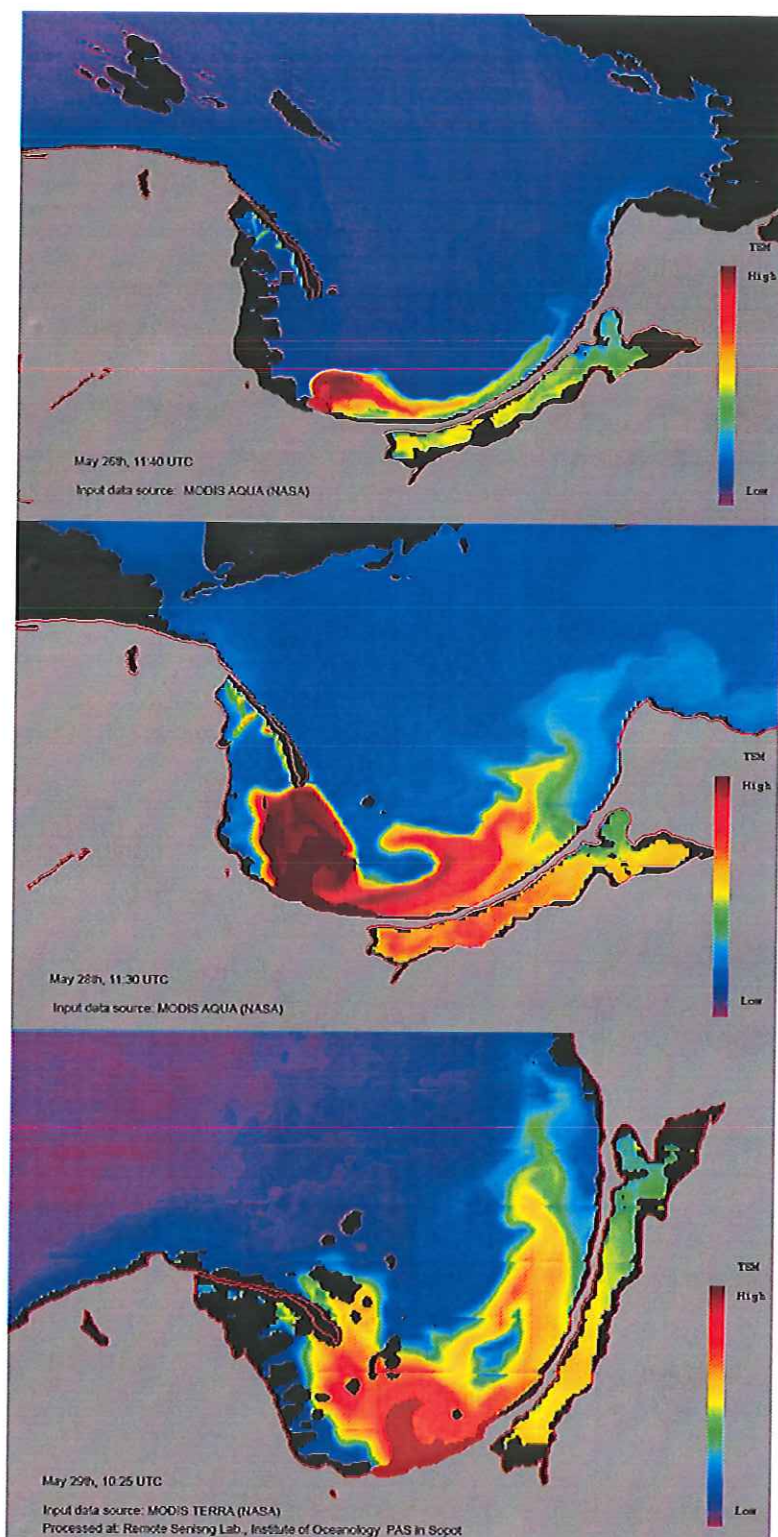
akwenie, posiadają wyraźną sygnaturę optyczną co sprawia, że są dobrze widoczne na odpowiednich zobrazeniach satelitarnych.

### **3. Metodyka badan**

#### **3.1 Wprowadzenie do metodyki.**

Prezentowane w opracowaniu zróżnicowanie przestrzenne i zmiany czasowe charakterystyk światła wychodzącego z toni wodnej dla Martwej Wisły i Motławy oraz sąsiadującego z nimi obszaru Zatoki Gdańskiej, obserwowane były za pomocą satelitów środowiskowych Europejskiej Agencji Kosmicznej – ESA: Sentinel 2a i 2b, w zakresie zobrażeń o wysokiej rozdzielczości przestrzennej, tzn. 10m oraz amerykańskiej Narodowej Agencji Aeronautyki i Przestrzeni Kosmicznej – NASA: MODIS AQUA, w zakresie zobrażeń o średniej rozdzielczości przestrzennej (1km), przetworzonej dla Zatoki Gdańskiej, połączonych z modelami eko -hydrodynamicznymi w systemie SatBałtyk. Te drugie dane wykorzystane zostały do zobrażenia ogólnych warunków panujących na Zatoce Gdańskiej w wybranych momentach analizowanego okresu.

Rozkład przestrzenny wnoszonych do morza substancji zawieszonych, szczególnie w przypadku nadzwyczajnych zdarzeń, takich jak powódzie, awaryjne zrzuty ścieków itp., może być z powodzeniem obserwowany za pomocą pomiarów satelitarnych w widzialnym zakresie widma elektromagnetycznego. Jednym z przykładów takich obserwacji, jest przeprowadzany w czasie powodzi w 2010 roku monitoring zmian przestrzennego rozkładu, wpływającej z wodami Wisły do Zatoki Gdańskiej dużej ilości zawiesiny i rozpuszczanych substancji organicznych (Rys.1).

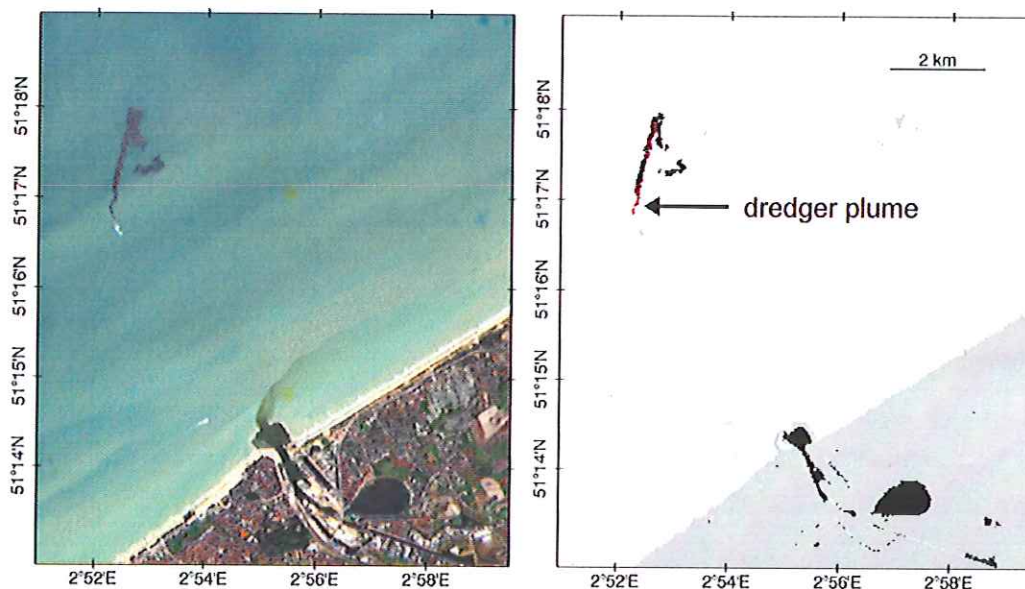


Rysunek 1 Rozkład przestrzenny zawiesiny (TSM) uzyskany z obrazów satelitarnych MODIS Aqua i Terra w dniach 26, 28 i 29 maja 2010 r. Skala kolorów po prawej stronie jest w jednostkach względnych (Zajączkowski et al. 2010)

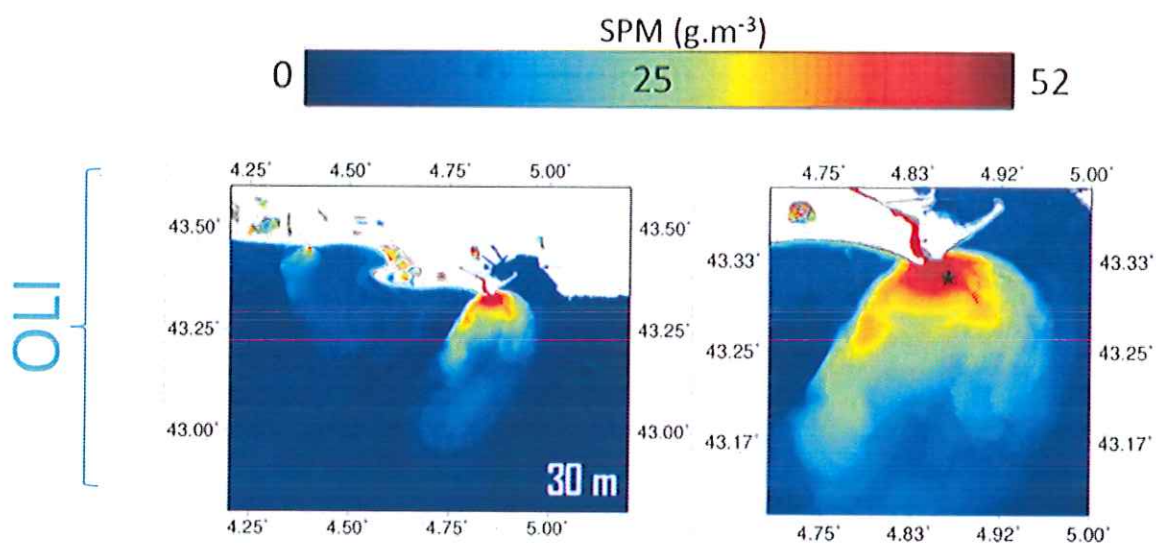


Powyższy przykład wykorzystywał dane satelitarne o średniej rozdzielczości przestrzennej, z pikselami o rozmiarach 1x1km (skaner MODIS na Satelitach Aqua i Terra) stosowanych najczęściej do badania obszarów morskich i oceanicznych. Wykorzystanie takich danych w śledzeniu rozprzestrzenia się rozlewów substancji zawieszonych czy rozpuszczonych w wodach Martwej Wisły byłoby niemożliwe z racji ograniczonych rozmiarów przestrzennych badanego akwenu. Z pomocą dla takiego typu zastosowań przychodzą umieszczone w ostatnich latach na orbitach skanery satelitarne, charakteryzujące się znacznie wyższą rozdzielczością przestrzenną: OLI (satelita Landsat 8) i MSI (satelity Sentinel 2a i 2b). Skaner OLI na satelicie Landsat 8, umieszczony został na orbicie polarnej w 2014 roku. Posiada kanały spektralne w widzialnym zakresie widma o rozdzielczości przestrzennej 30m. Jeszcze lepsze w tym względzie parametry posiadają skanery MSI umieszczone na Satelitach Sentinel 2a w 2015 roku i Sentinel 2b w 2017 roku. Rozdzielczość przestrzenna pikseli w tych skanerach, dla podstawowych kanałów w widzialnym zakresie widma elektromagnetycznego wynosi 10m, co z powodzeniem pozwala wykorzystać je do tego typu aplikacji.

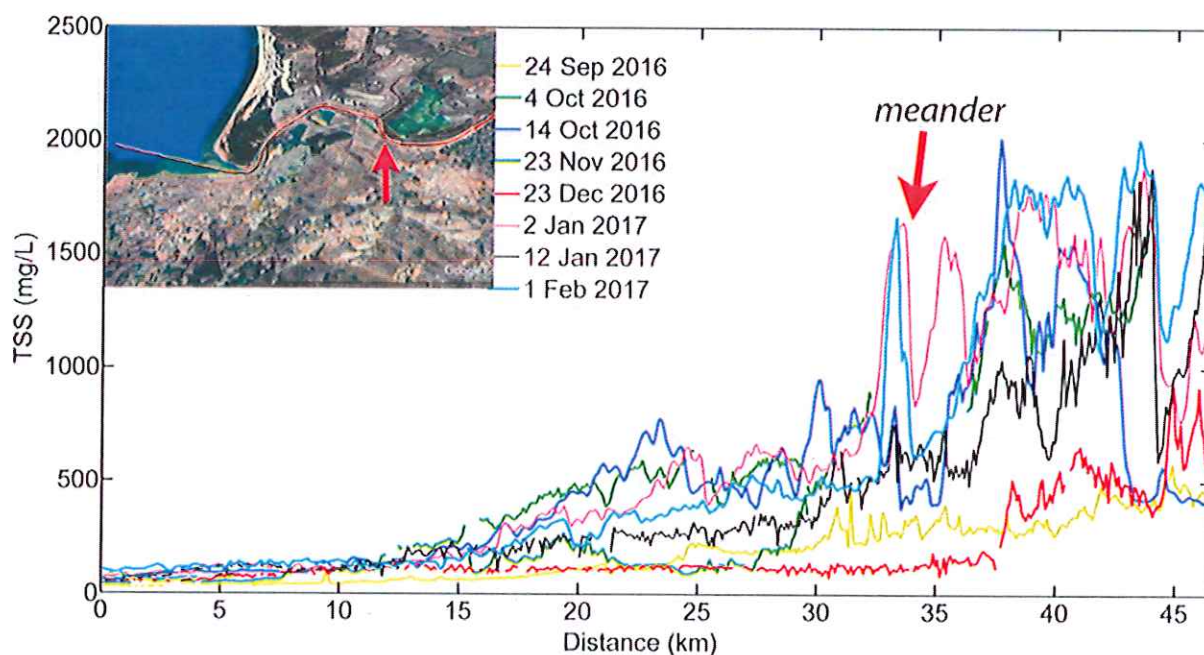
To, że zdarzenia, takie jak awaryjne zrzuty lub naturalne wpływy rzeczne zanieczyszczeń do morza mogą być widoczne na tego typu danych satelitarnych pokazane zostały już w szeregu publikacjach, m.in. w publikacji Vanhellemona i Ruddicka [2015], Ody i innych [2015] (Rys2- 4).



Rysunek 2. Zobrazowana za pomocą danych satelitarnych skanera OLI (Landsat 8) plamy zawiesiny powstałej w wyniku zatopienia urobku oraz zawiesiny wnoszonej nurtem rzeki. Lewa kolumna: obraz RGB po korekcji Rayleigha (kanały 4, 3, 2), pokazujący przestrzenny rozkład urobku. Prawa kolumna: wymaskowany obraz przedstawiający próg zmętnienia powyżej 5 [Vanhellemon i Ruddick, 2015].



Rysunek 3. Wlew substancji zawieszonych do morza zobrazony za pomocą danych satelitarnych skanera OLI (Landsat8) Ody et al., 2015)



Rysunek 4. Przestrzenna zmienność stężeń całkowitej zawiesiny (TSS) w rzece Guadalquivir wyliczona na podstawie danych satelity Sentinel 2a dla okresu 24 wrzesień 2016 – 1 luty 2017. (Caballero i inni, 2018)



### 3.2 Zastosowane metody

Przytoczone powyżej przykładowe zastosowania tego typu danych satelitarnych, pokazały, że oprócz przestrzennego zróżnicowanie wybranych optycznie znaczących składników wody morskiej, mogą one obrazować także ich stężenia. Do tego wymagana jest jednak nie tylko właściwa korekcja atmosferyczna danych satelitarnych, ale też, w większości przypadków, dostosowane do lokalnej specyfiki tzw. algorytmy satelitarne, opisujące dokładne zależności pomiędzy mierzonymi satelitarne charakterystykami spektralnymi radiacji oddolnej a stężeniami wybranych składników wody morskiej, mogące potocznie być pojmowane jako lokalna kalibracja tych danych.

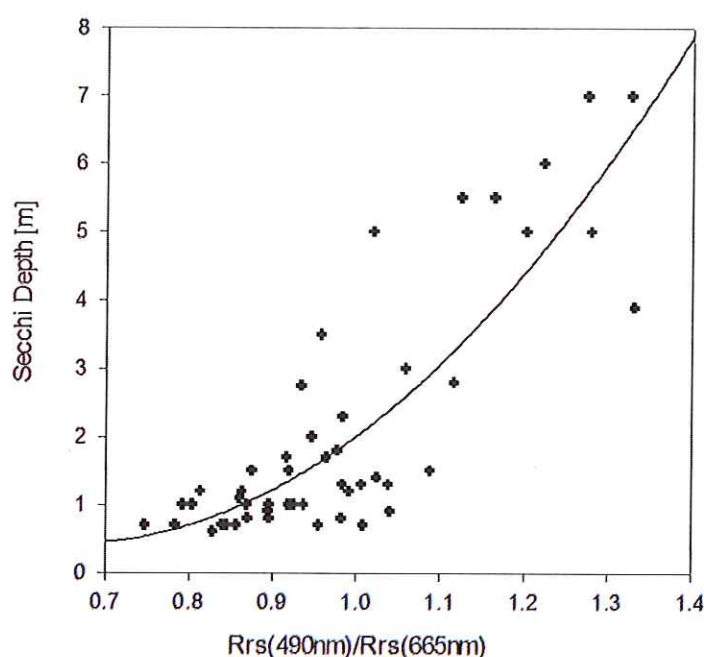
Do wykorzystanych w tym opracowaniu danych satelitarnych ze skanerów MSI umieszczonych na satelitach Sentinel 2a i 2b, zastosowano procedury korekcji atmosferycznej opisanej w pracach Richter i inni, (2011), Louis i inni (2010) i Kaufman i Sendra (1988), wykorzystywane obecnie standardowo dla tego typu danych, co pozwoliło na wyznaczenie wartości radiacji oddolnej nad powierzchnią wody we wszystkich wykorzystywanych w niniejszym opracowaniu kanałach spektralnych skanera MSI. Na potrzeby niniejszego opracowania przetestowano też inne metody korekcji atmosferycznej danych satelitarnych nad badan akwenem, m.in. C2RCC procesor (Brockmann i inni, 2016), ale dostępne dane nie pokazały ich przewagi nad zastosowaną metodą, a wyliczone na jej podstawie zobrazowania charakteryzowały się większym zaszumieniem w porównaniu do wspomnianej powyżej metody.

O ile można było wykorzystać w miarę standardowe procedury korekcji atmosferycznej o tyle dla wyliczenia wartości pozostałych parametrów, mogących dokumentować przestrzenną ewolucję wlewu zanieczyszczeń, konieczne było opracowanie nowego algorytmu, dostosowanego do lokalnej specyfiki badanego akwenu. Z uwagi na dostępność danych *in situ* z badanego rejonu, zbliżonych czasowo do analizowanego okresu, wybrano zasięg widzialności dysku Secchi (SD) jako taki parametr. Jest on bezpośrednio powiązany z przezroczystością wody w powierzchniowej warstwie, która w wypadku wlewu była silnie ograniczona przez duże stężenia zawiesiny i rozpuszczonej materii organicznej. Zasięg Dysku Secchi mierzony była w czasie pomiarów wykonywanych przez Instytut Morski w dniach 30 maja, 6 i 15 czerwca 2018 roku, dokładnie w rejonie badań. Do opracowania algorytmu wykorzystane zostały też pomiary ze statku Oceania w dniach 13, 16 i 21 maja 2018 wykonywane w rejonie ujścia Martwej Wisły do Zatoki i obszarach sąsiadujących. Na potrzeby niniejszego opracowania, w dniach 19 i 30 lipca 2018, zorganizowano też dwa jednodniowe rejsy na jednostce pływającej Sonda 2, w czasie których mierzono m.in. zasięg dysku Secchi w rejonie ujścia Martwej Wisły do Zatoki i obszarach sąsiadujących.



Wszystkie te dane wykorzystane zostały do opracowania lokalnego algorytmu na zasięg dysku Secchi. Algorytm oparty został na regresji pomiędzy ilorazem, wyznaczonej na podstawie danych satelitarnych zdalnych reflektancji w kanałach spektralnych 490 i 665nm, a mierzonym *in situ* zasięgiem dysku Secchi. Spośród wszystkich przetestowanych postaci funkcyjnych pomiędzy kanałami spektralnymi o najwyższej rozdzielczości przestrzennej, tylko kombinacja wykorzystana poniżej, dawała zadawalające rezultaty ( $R^2=0.74$ ). Opracowana funkcja (Rys.5) ma postać:

$$SD [m] = 6.20 - 17.65 * x + 13.46 * x^2 \text{ gdzie } x = -Rrs(490) / Rrs(665)$$



Rysunek 5. Regresja wykorzystana w algorytmie wyliczającym zasięg widzenia dysku Secchi na podstawie danych skanera MSI (Sentinel 2a i 2b).

W niniejszym opracowaniu zobrazowano też przestrzenne rozkłady wyznaczonej satelitarnie reflektancji dla 665nm, która w tym wypadku może być bezpośrednio związana z ilością zawiesiny w przy powierzchniowej warstwie wody. Z uwagi na brak danych *in situ* dla tego parametru, z tego rejonu i w zbliżonym okresie czasu, nie opracowano szczegółowego algorytmu na określenie stężeń zawiesiny. Jednakże liczne dane literaturowe i bogate własne doświadczenia, pozwalają na stwierdzenie, że wartości reflektancji w tym kanale dla takich wód są proporcjonalne do stężenia całkowitej zawiesiny i analiza przestrzennych zmian reflektancji w tym kanale spektralnym może być bezpośrednio odniesiona do analogicznych zmian w stężeniach całkowitej zawiesiny w przy powierzchniowej warstwie wody.

### 3.3 Wykaz wykorzystanych danych satelitarnych.

Na potrzeby niniejszego opracowania, wykorzystano wszystkie bezchmurne sceny satelitarne skanera MSI z satelitów Sentinel 2a i 2b dostępne dla analizowanego rejonu. Szczegółowy wykaz pozyskanych i przetworzonych danych satelitarnych znajduje się w Tabeli 1.

Tabela 1. Lista scen satelitarnych z satelitów Sentinel 2a i 2 b z zasobów Europejskiej Agencji Kosmicznej (program Copernicus) przetworzonych i zobrazowanych w Pracowni Teledetekcji Satelitarne IOPAN na potrzeby niniejszego opracowania

1.	S2A_MSIL1C_20180506T100031_N0206_R122_T34UCF_20180506T105839
2.	S2A_MSIL1C_20180513T095031_N0206_R079_T34UCF_20180513T115612
3.	S2A_MSIL1C_20180516T100031_N0206_R122_T34UCF_20180516T111147
4.	S2A_MSIL1C_20180523T095031_N0206_R079_T34UCF_20180523T151748
5.	S2A_MSIL1C_20180526T100031_N0206_R122_T34UCF_20180526T134414
6.	S2A_MSIL1C_20180602T095031_N0206_R079_T34UCF_20180602T115526
7.	S2A_MSIL1C_20180605T100031_N0206_R122_T34UCF_20180605T102944
8.	S2A_MSIL1C_20180804T100031_N0206_R122_T34UCF_20180804T121518
9.	S2A_MSIL2A_20180506T100031_N0207_R122_T34UCF_20180506T105839
10.	S2A_MSIL2A_20180513T095031_N0207_R079_T34UCF_20180513T115612
11.	S2A_MSIL2A_20180516T100031_N0207_R122_T34UCF_20180516T111147
12.	S2A_MSIL2A_20180523T095031_N0208_R079_T34UCF_20180524T183727
13.	S2A_MSIL2A_20180526T100031_N0208_R122_T34UCF_20180526T141622
14.	S2A_MSIL2A_20180602T095031_N0208_R079_T34UCF_20180602T122610
15.	S2A_MSIL2A_20180605T100031_N0208_R122_T34UCF_20180605T111732
16.	S2A_MSIL2A_20180715T100031_N0208_R122_T34UCF_20180715T124344
17.	S2A_MSIL2A_20180725T100031_N0208_R122_T34UCF_20180725T130600
18.	S2A_MSIL2A_20180804T100031_N0208_R122_T34UCF_20180804T125722
19.	S2B_MSIL1C_20180511T100029_N0206_R122_T34UCF_20180511T120901
20.	S2B_MSIL1C_20180521T100029_N0206_R122_T34UCF_20180521T120149
21.	S2B_MSIL1C_20180531T100029_N0206_R122_T34UCF_20180531T120906
22.	S2B_MSIL1C_20180607T095029_N0206_R079_T34UCF_20180607T123154
23.	S2B_MSIL1C_20180727T095029_N0206_R079_T34UCF_20180727T115454
24.	S2B_MSIL1C_20180809T100019_N0206_R122_T34UCF_20180809T140850
25.	S2B_MSIL2A_20180508T095029_N0207_R079_T34UCF_20180508T133204
26.	S2B_MSIL2A_20180511T100029_N0207_R122_T34UCF_20180511T120901
27.	S2B_MSIL2A_20180521T100029_N0207_R122_T34UCF_20180521T120149
28.	S2B_MSIL2A_20180531T100029_N0208_R122_T34UCF_20180531T125926
29.	S2B_MSIL2A_20180607T095029_N0208_R079_T34UCF_20180607T130225
30.	S2B_MSIL2A_20180610T100029_N0208_R122_T34UCF_20180610T123312
31.	S2B_MSIL2A_20180617T095029_N0208_R079_T34UCF_20180617T124450
32.	S2B_MSIL2A_20180620T100029_N0208_R122_T34UCF_20180620T154356
33.	S2B_MSIL2A_20180627T095029_N0208_R079_T34UCF_20180627T122754
34.	S2B_MSIL2A_20180720T100029_N0208_R122_T34UCF_20180720T142656

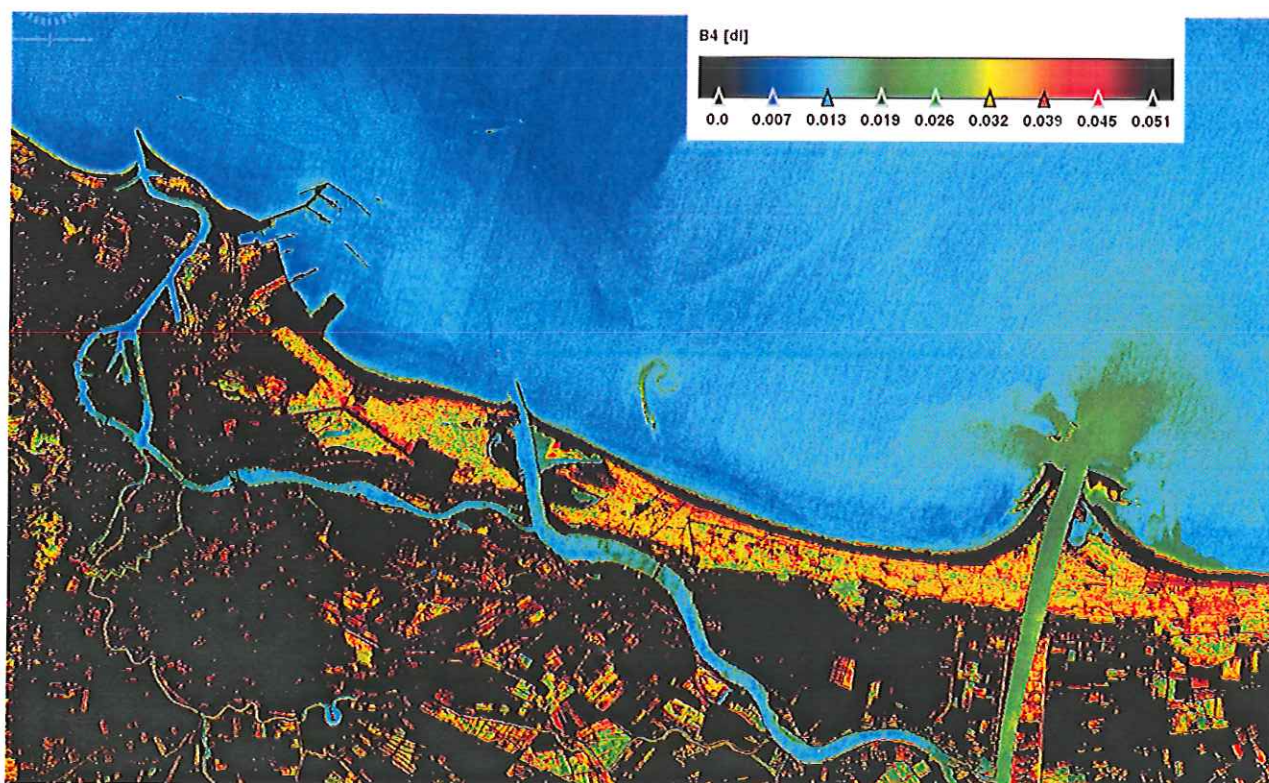


35.	S2B_MSIL2A_20180727T095029_N0208_R079_T34UCF_20180727T122650
36.	S2B_MSIL2A_20180809T100019_N0208_R122_T34UCF_20180809T152559

#### 4. Opis przestrzennej zmienności wybranych parametrów a rejonie badań

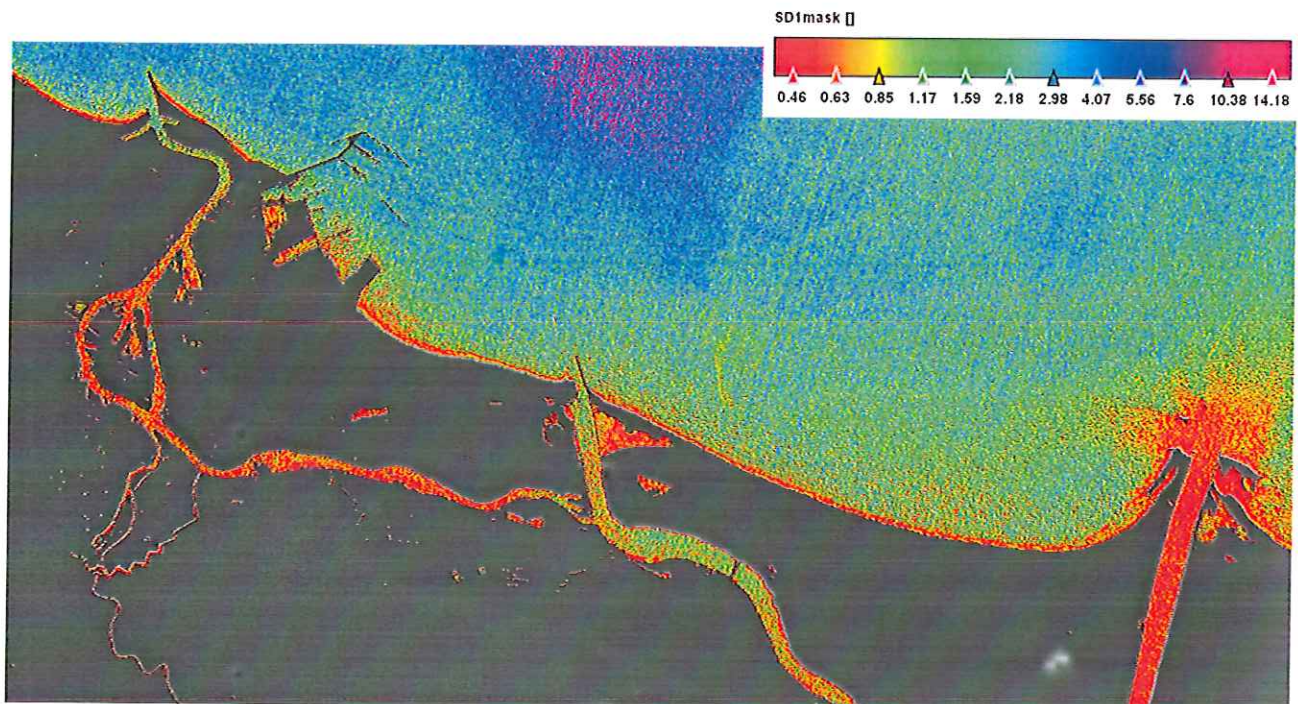
##### 4.1. Warunki panujące na akwenu przed zrzutem ścieków.

W celu przedstawienia warunków panujących w tym akwenu przed zrzutem ścieków, opracowano i przeanalizowano sytuację na wybranych danych satelitarnych sprzed okresu zrzutu ścieków, tj. z dni: 6, 8, 11 i 13 maja 2018. Zobrazowania z 8 i 13 maja uzyskane zostały w warunkach całkowicie bezchmurnego nieba, najbardziej sprzyjających osiągnięciu zobrazowań satelitarnych wysokiej jakości. Na kolejnych rysunkach przedstawione są zobrazowania prezentujące rozkład przestrzenny zawiesiny i widzialności dysku Secchi właśnie w tych dniach (Rys. 6, 7, 8, 9, 10 i 11).

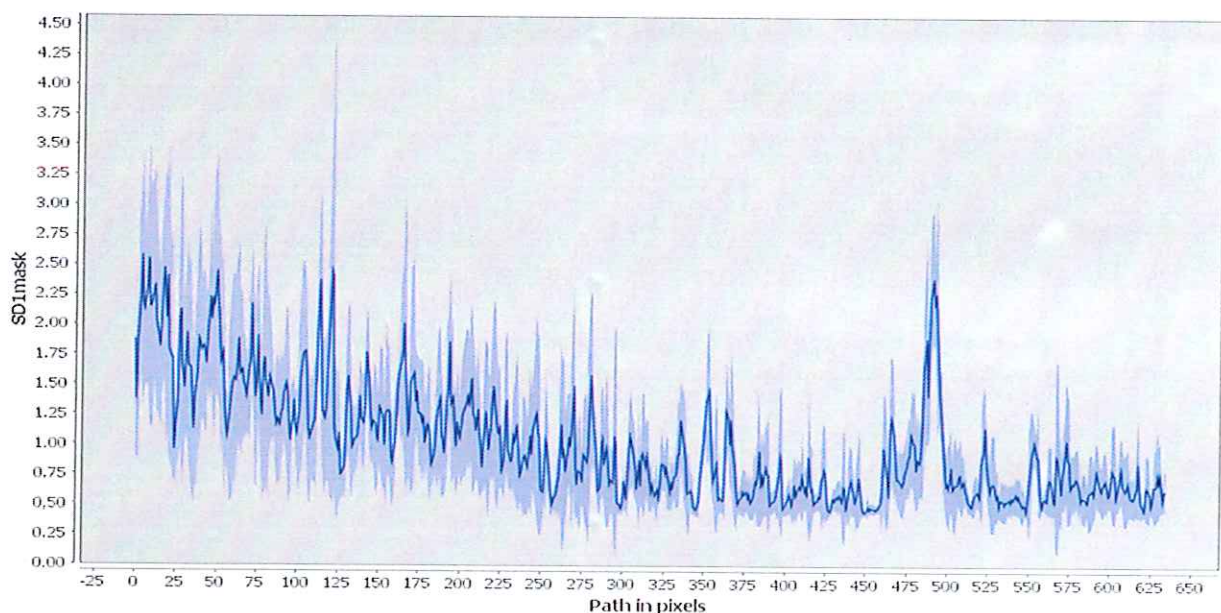


Rysunek 6. Przestrzenny rozkład wyliczonej na podstawie danych satelitarnych refleksyjności zdalnej dla kanału 4 skanera MSI (665nm), proporcjonalnej dla obszarów wodnych do stężenia zawiesiny w przy powierzchniowej warstwie wody, z dnia 8 maja 2018 (niskie stężenia zawiesiny odpowiadają kolorom ciemno i jasno niebieskim, duże stężenia czerwonym i pomarańczowym).



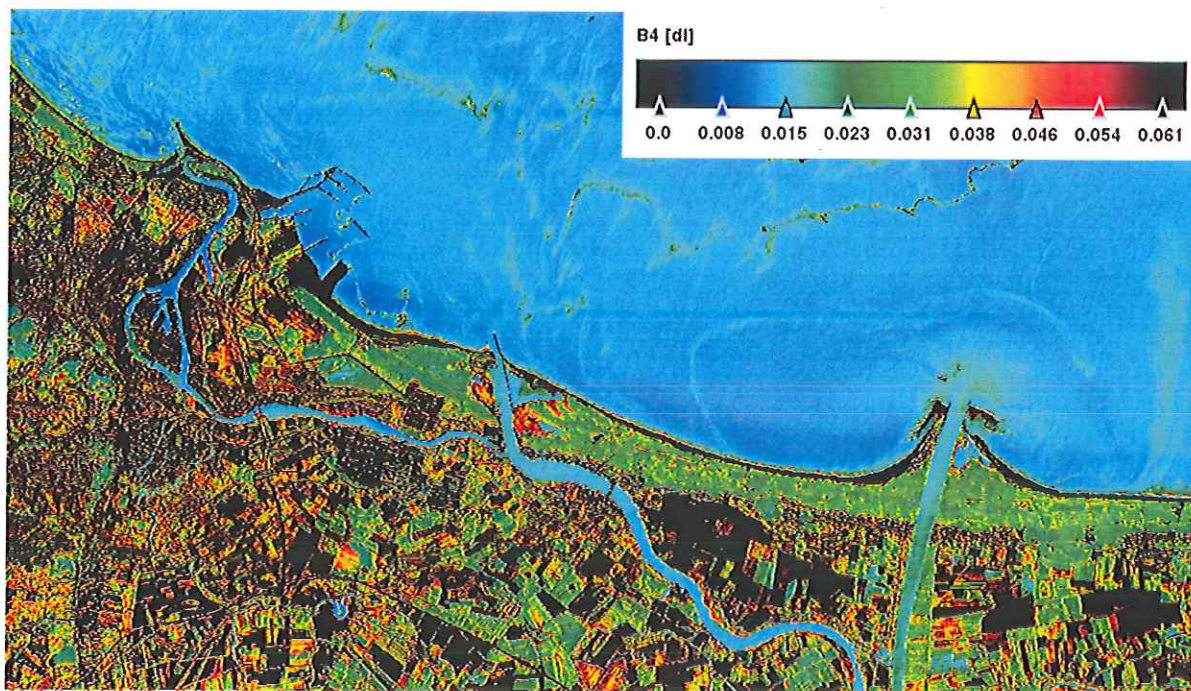


Rysunek 7. Rozkład przestrzenny zasięgu widzialności dysku Secchi, wyliczony na podstawie danych satelitarnych skanera MSi (Sentinel 2) przy pomocy opracowanego algorytmu, dla 8 maja 2018r.

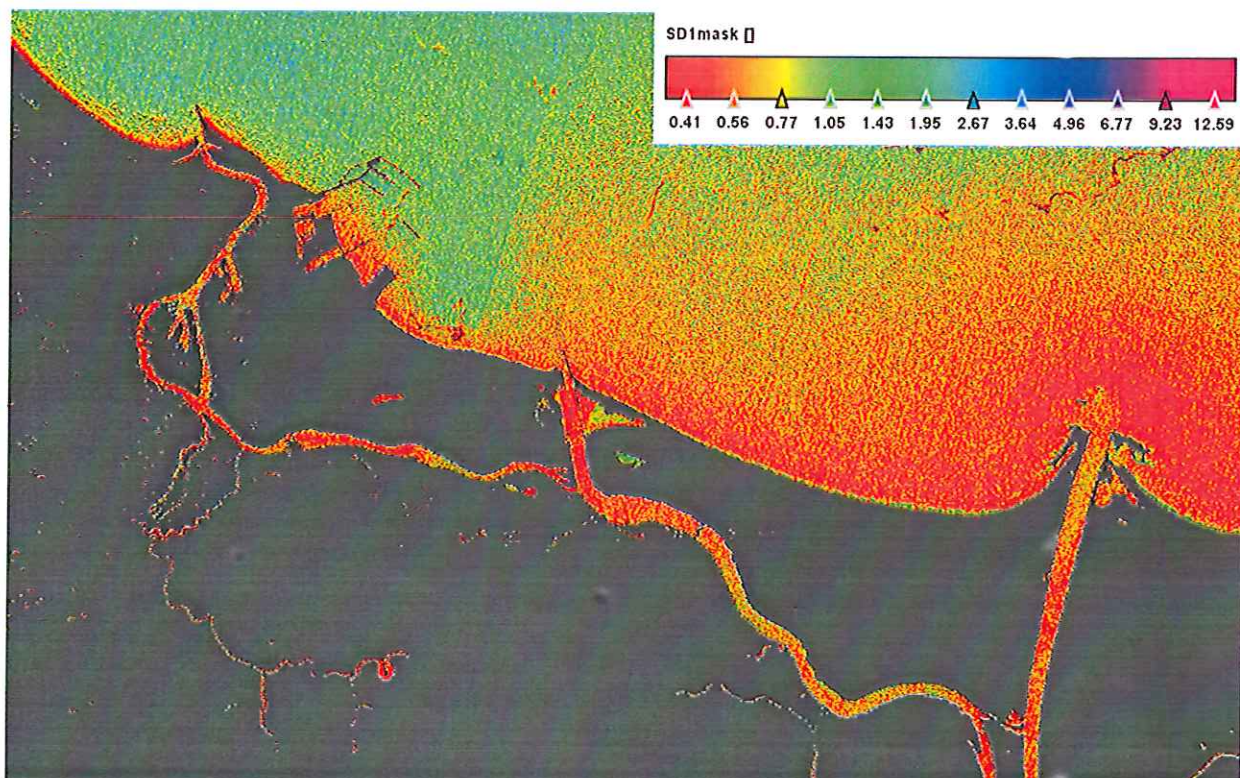


Rysunek 8. Wartości zasięgu widzialności dysku Secchi, dla transektu od ujścia Martwej Wisły do ujścia Motławy (m.in. wzdłuż Kanału Kaszubskiego) dla 8 maja 2018r., wyliczone na podstawie danych satelitarnych skanera MSi (Sentinel 2), przy pomocy opracowanego algorytmu satelitarnego,



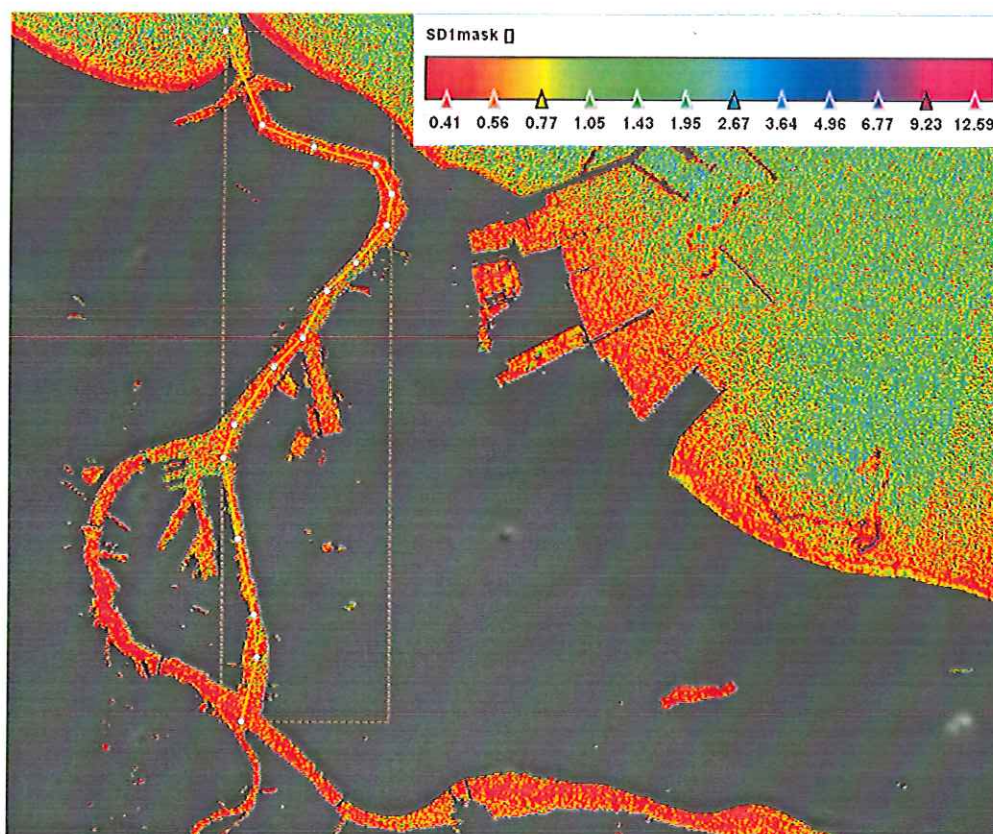


Rysunek 9. Przestrzenny rozkład wyliczonej na podstawie danych satelitarnych refleksyjności zdalnej dla kanału 4 skanera MSI (665nm), proporcjonalnej dla obszarów wodnych do stężenia zawiesiny w przy powierzchniowej warstwie wody, z dnia 13 maja 2018 (niskie stężenia zawiesiny odpowiadają kolorom ciemno i jasno niebieskim, duże stężenia czerwonym i pomarańczowym).



Rysunek 10. Rozkład przestrzenny zasięgu widzialności dysku Secchi, wyliczony na podstawie danych satelitarnych skanera MSI (Sentinel 2) przy pomocy opracowanego algorytmu, dla 13 maja 2018r.





Rysunek 11. Rozkład przestrzenny zasięgu widzialności dysku Secchi, wyliczony na podstawie danych satelitarnych skanera MSI (Sentinel 2) przy pomocy opracowanego algorytmu, dla 13 maja 2018r. Na rysunku przedstawiony jest dodatkowo zakres transektu zobrazowanego na rysunku 8.

Analogiczne sytuacje zaobserwowana także na częściowo zachmurzonych danych satelitarnych z 6 i 11 maja (ponieważ nie wnoszą one nic nowego do opisu sytuacji przez awaryjnym zrzutem ścieków oraz z uwagi na ich gorszą jakość, nie zaprezentowano ich w tym opracowaniu).

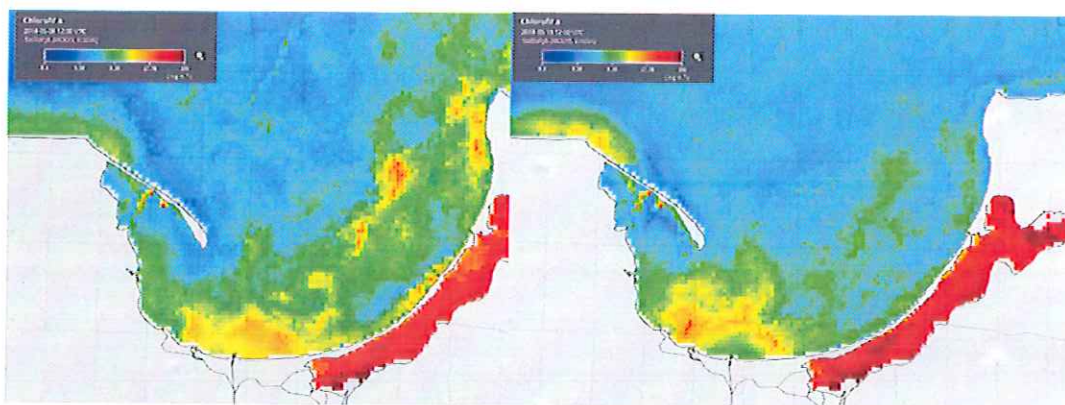
Na obrazowaniach dla 8 maja (Rys. 6 i 7) widzimy, że wody Martwej Wisły zawierają relatywnie mniejsze ilości zawiesiny w porównaniu do ilości zawiesiny wnoszonej przez główny nurt Wisły. Nie widoczne są też wyraźne silne gradienty przestrzennych zmian rozkładu zawiesiny, za wyjątkiem obszaru zlokalizowanego poniżej Kanału Kaszubskiego, co widoczne jest też na danych przedstawiających zasięgu dysku Secchi (Rys. 7). Analiza obrazu RGB dla tego dnia i z tego samego skanera satelitarnego (Rys 12) , pozwala przypuszczać, że w tym czasie pojawiło się niewielkie zadymienie nad omawianym obszarem, zakłócające prawidłowe wyznaczenie omawianych parametrów. To bardzo lokalne zjawisko nie wpłynęło w żadnym stopniu na obrazowania tych parametrów na innych obszarach tej sceny. Transekt wartości zasięgu widzenia dysku Secchi (Rys. 8) pokazuje w miarę równomierne ich



zmniejszanie się od wylotu Martwej Wisły do Zatoki do ujścia Motławy, co wydaje się sytuacją całkowicie normalną z uwagi na dynamikę analizowanego akwenu. Warto zwrócić uwagę, że zaprezentowane na Rys.8 wartości i ich gradient są dosyć podobne do wyników pomiarów głębokości zasięgu widzenia krążka Secchi, wykonanych przez Instytut Morski w Gdańsku, w dniu 16 czerwca i przedstawionych w opracowaniu Opala i inni (2018) na rysunku nr 5 (str. 20 ). Należy zwrócić uwagę, że przedstawiony tu transekt odpowiada pomiarom od punktu nr 1 do punktu nr 12(13) z rysunku 5 tegoż opracowania. Co mogłoby świadczyć o tym, że miesiąc po awaryjnym wylewie, sytuacja w przypowierzchniowych warstwach wody analizowanego akwenu powróciła to sytuacji 'normalnej', istniejącej przed awaryjnym zrzutem ścieków w połowie maja.



Rysunek 12. Zobrazowanie RGB części badanego obszaru w dniu 8 maja 2018.



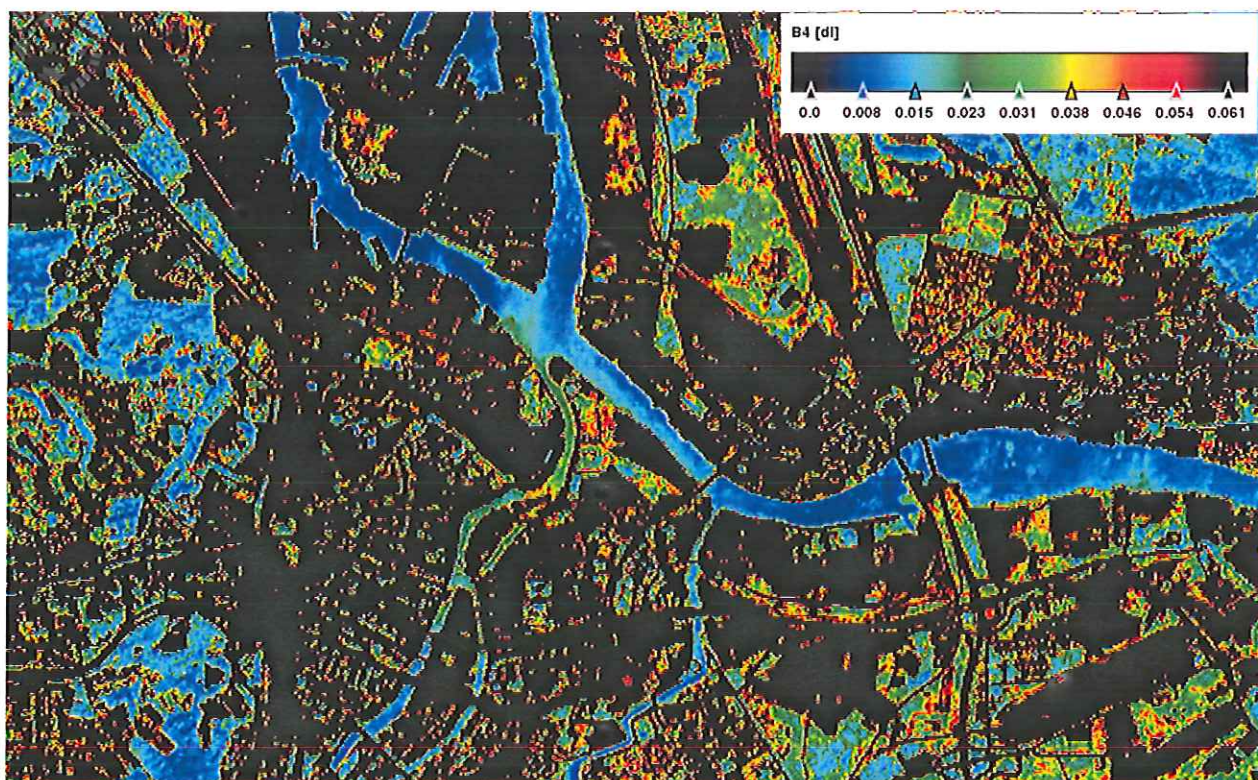
Rysunek 13. Stężenia chlorofilu a w rejonie Zatoki Gdańskiej , na podstawie danych systemu SatBałtyk, dla 8 i 11 maja 2018

W dniu 13 maja zaobserwowano nieznacznie większe ilości zawiesiny, zwłaszcza w rejonie Martwej Wisły przy wyspie Ostrów. Zaobserwowano też relatywnie mniejsze zasięgi dysku Secchi. Może to być spowodowane zaobserwowanym w tamtym czasie opadaniem pyłków sosny i ich kumulacją na powierzchni wody lub rozwijającym się w rejonie Zatoki Gdańskiej zakwittem, widocznym na zobrazeniach skanera MODIS (Rys 13). Analogiczne zjawiska mogły też mieć miejsce na wodach Martwej Wisły, powodując lokalne zwiększenie obserwowanego stężenia zawiesiny i jednoczesnego zmniejszenia zasięgu widzenia krążka Secchi. Sytuacja ta obrazuje, że analizowane w akwenie parametry środowiska wodnego, podlegają też dynamicznym zmianom wynikającym z naturalnych procesów biologicznych w tym rejonie, co niekiedy może powodować 'przysłanianie' lub modyfikowanie ich zmian w wyniku zdarzeń 'nienaturalnych', takich jak omawiany tu awaryjny zrzut ścieków. Analizując jednak wszystkie dostępne informacje, z jednoczesną wiedzą o 'kontekście środowiskowym' obserwowanych zmian, możemy często z bardzo dużym prawdopodobieństwem określić obszar i zakres zmian wywołanych takimi 'nienaturalnymi' incydentami. Przykład takiej sytuacji przedstawiony jest na kolejnym zobrazeniu analizowanego rejonu w dniu 16 maja.



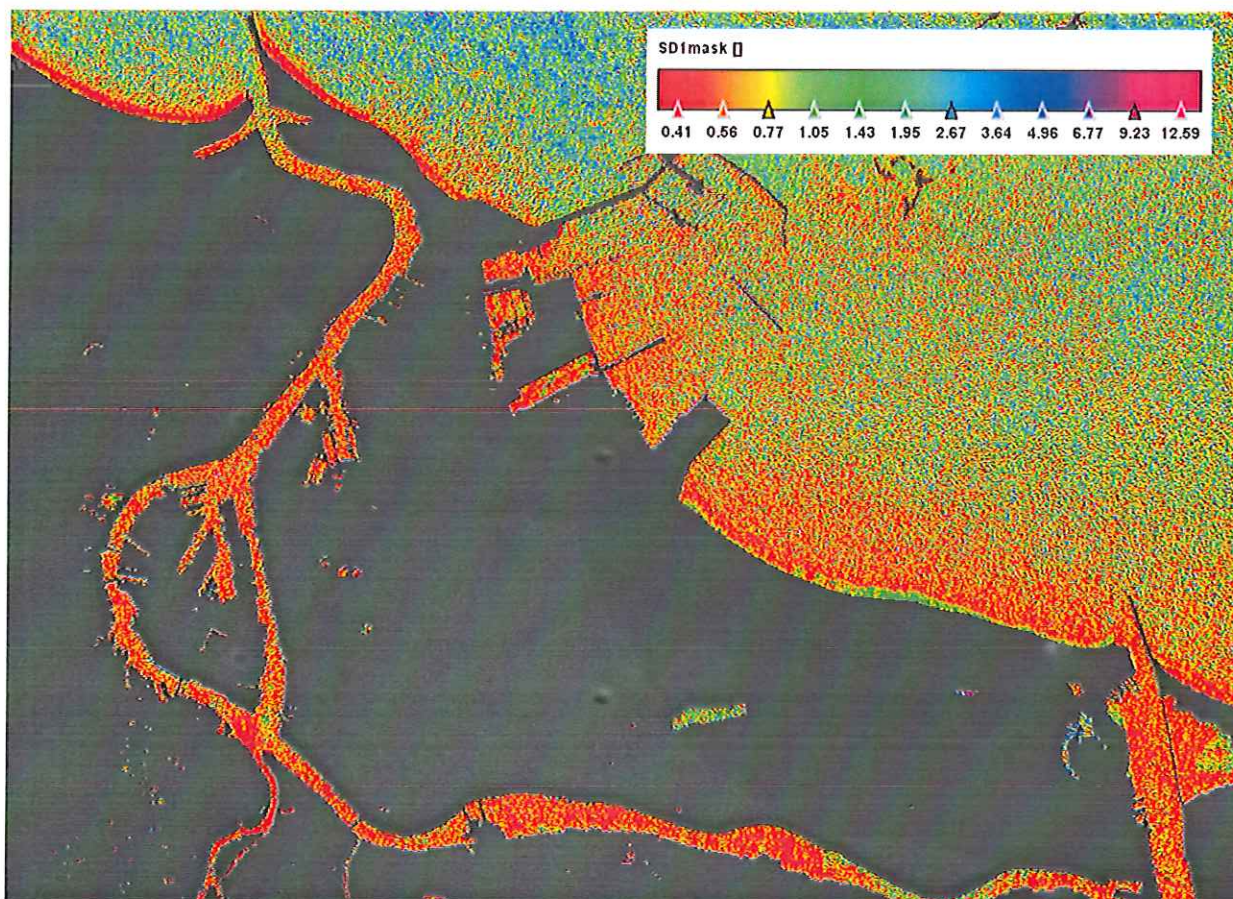
#### 4.2. Opis sytuacji w trakcie zrzutu ścieków i bezpośrednio po nim

Pierwsze zobrazowania satelitarne przedstawiające wylew ścieków do analizowanego akwenu, uzyskano dla 16 maja. Na rysunkach widoczne są szczególnie duże ilości zawiesiny w dolnym rejonie Motławy i odpowiednie, bardzo niskie wartości zasięgu widzenia dysku Secchi. Rejon i skala zmian prezentowanych parametrów pozwalają na stwierdzenie, że są one związane z wylewem ścieków w tym rejonie.



Rysunek 14 Przestrzenny rozkład wyliczonej na podstawie danych satelitarnych refleksyjności dla kanału 4 skanera MSI (665nm), proporcjonalnej dla obszarów wodnych do stężenia zawiesiny w przy powierzchniowej warstwie wody, z dnia 16 maja 2018 (niskie stężenia zawiesiny odpowiadają kolorom ciemno i jasno niebieskim, duże stężenia czerwonym i pomarańczowym). Widoczny jest obszar o szczególnie wysokiej zawartości zawiesiny, odpowiadający miejscu wlewu ścieków do Motławy.

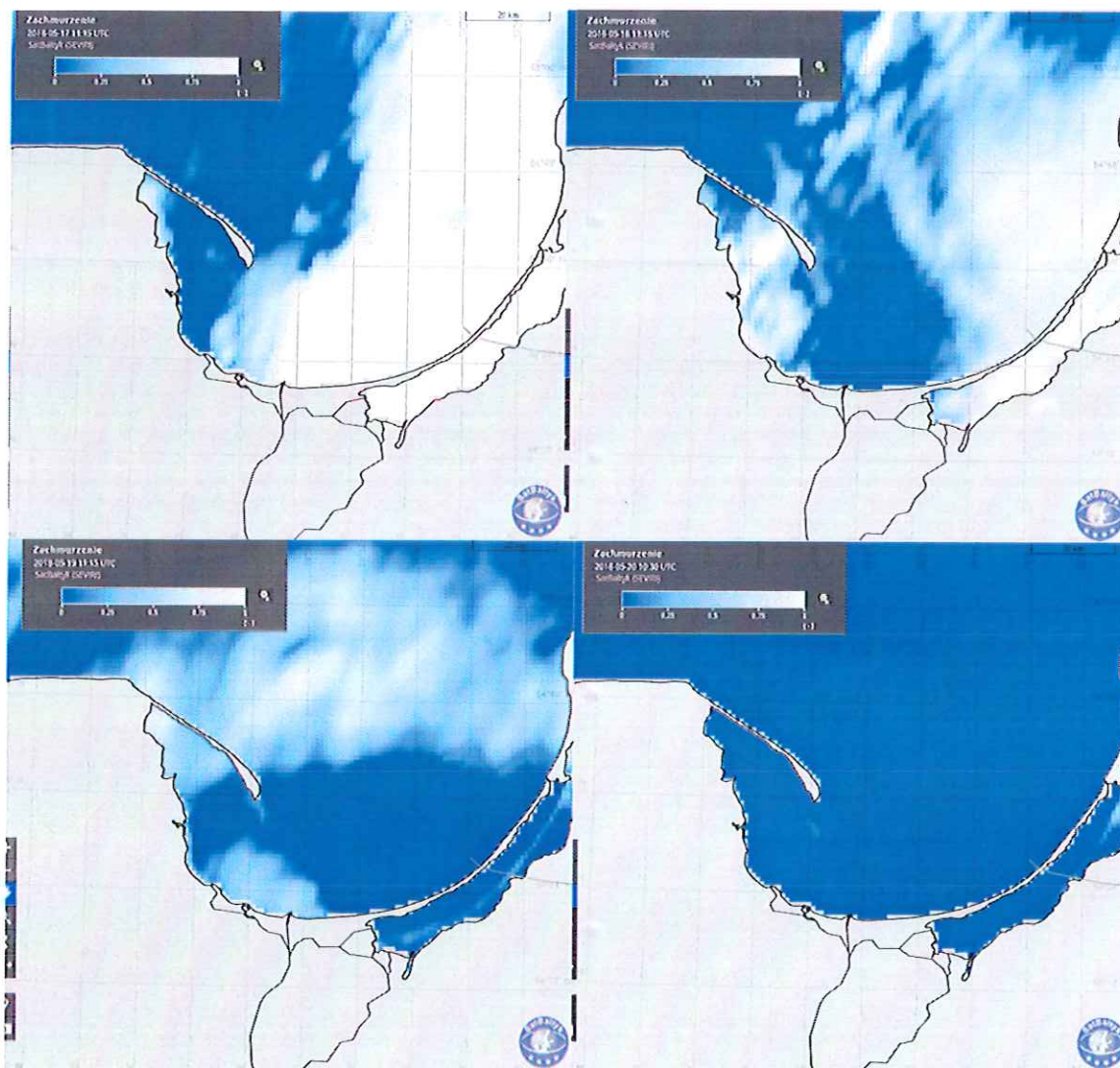




Rysunek 15 Rozkład przestrzenny zasięgu widzialności dysku Secchi, wyliczony na podstawie danych satelitarnych skanera MSi (Sentinel 2) przy pomocy opracowanego algorytmu, dla 16 maja 2018r. Widoczny jest obszar o mniejszych zasięgach widzialności dysku Secchi, odpowiadający miejscu wlewu ścieków do Motławy

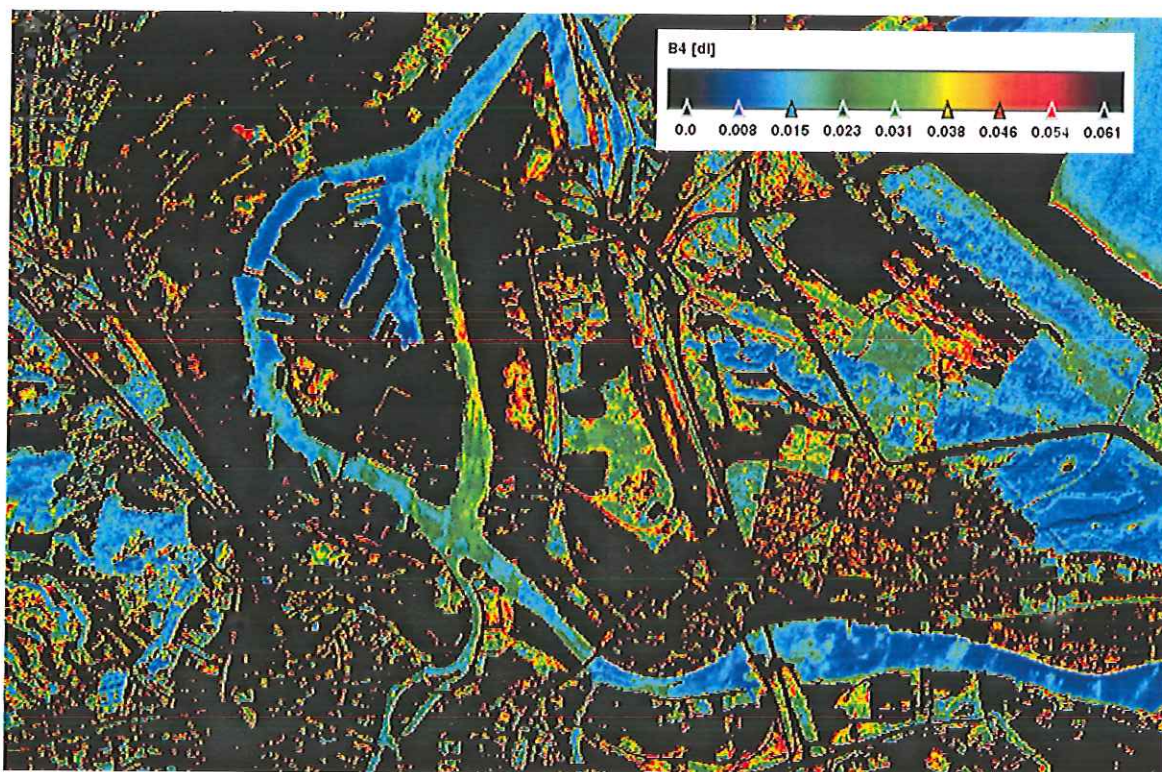
Niestety kolejne zobrazowanie analizowanego rejonu uzyskano dopiero 21 maja. W dniach 17 do 19 maja interesujący nas obszar pokryty był chmurami, co przedstawione jest na mapach zachmurzenia na rysunku 16. W dniu 20 maja badany obszar nie był już pokryty chmurami, ale tego dnia nie było przelotu satelity nad badanym obszarem.





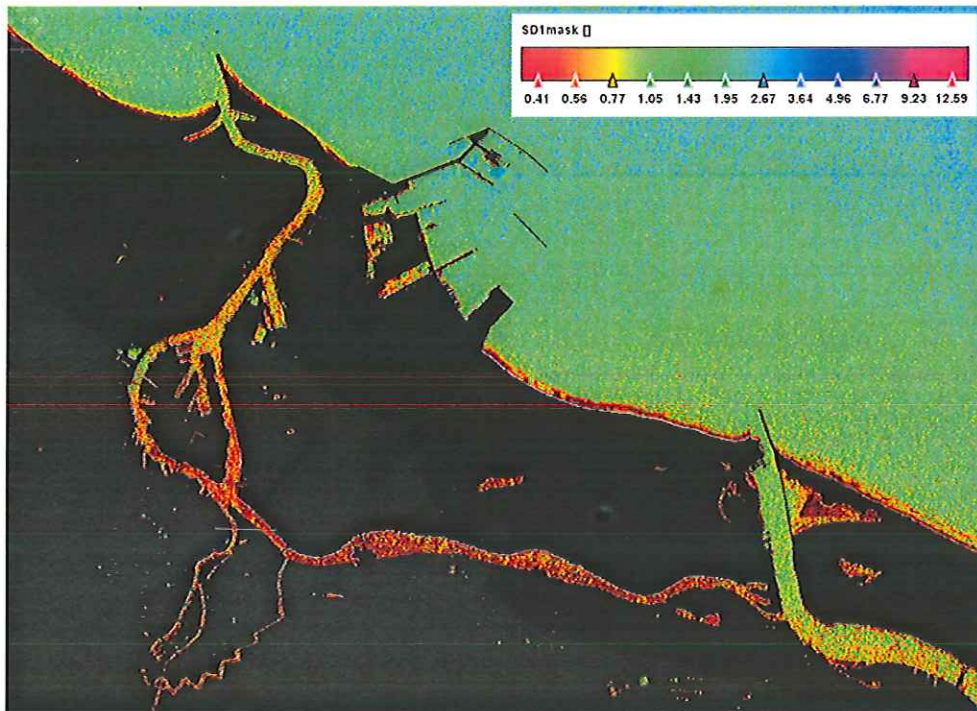
Rysunek 16. Pokrycie chmurami badanego rejonu (kolor biały) w okresie od 17 do 20 maja 2018 roku (zobrazowania satelitarne z Systemu SatBałk)

Na rysunkach 17 i 18 przedstawiono zobrazowania stężenia zawiesiny i zasięgu widzenia dysku Secchi dla 21 maja. Widoczne tam jest, wysoce prawdopodobne, przemieszczenie się 'plamy' zawiesiny w rejon Kanału Kaszubskiego. Akwen poniżej wyspy Ostrów charakteryzuje się relatywnie czystsza wodą, co wskazuje, że w tym dniu wody z wysokim stężeniem zawiesiny w przy powierzchniowej warstwie wody nie przemieściły się dalej w stronę ujścia do Zatoki.



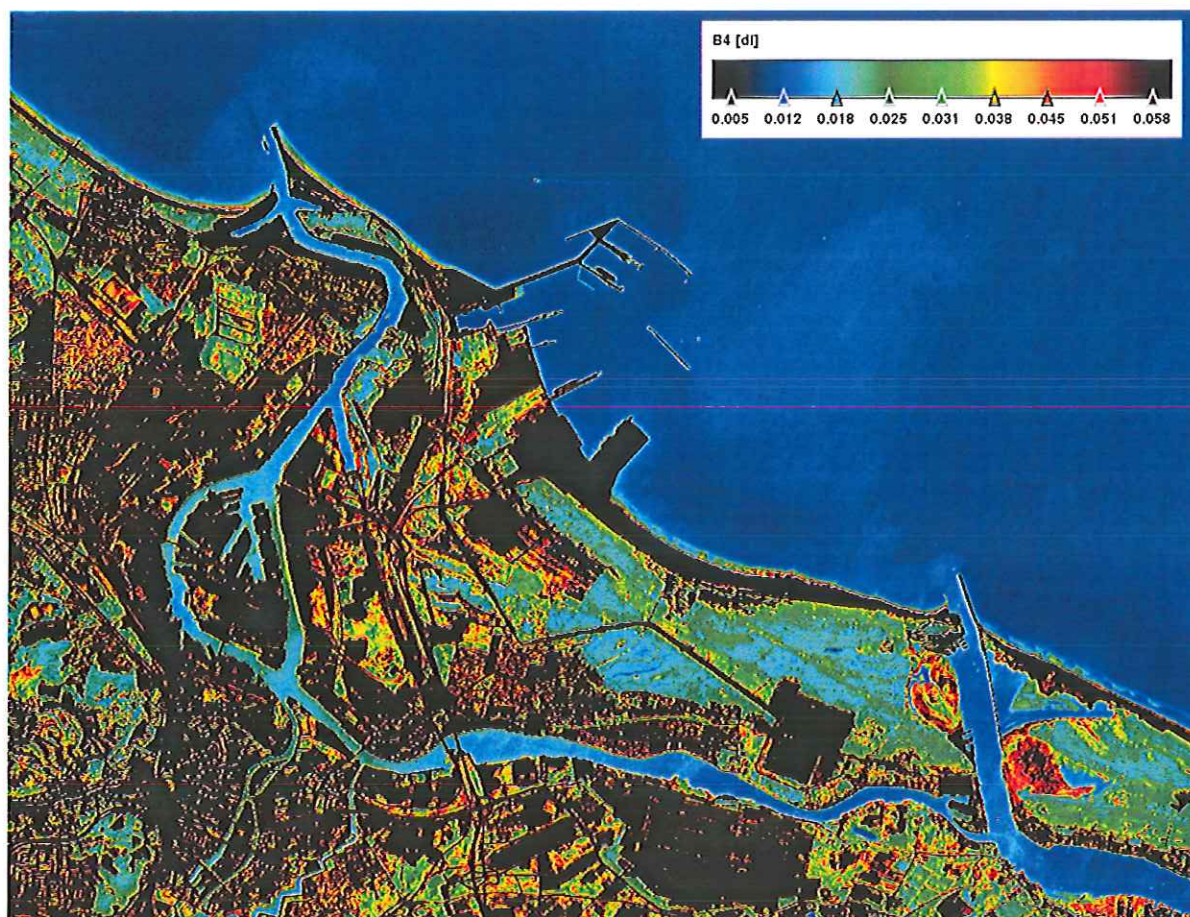
Rysunek 17. Przestrzenny rozkład wyliczonej na podstawie danych satelitarnych refleksyjności zdalnej dla kanału 4 skanera MSI (665nm), proporcjonalnej dla obszarów wodnych do stężenia zawiesiny w przy powierzchniowej warstwie wody, z dnia 21 maja 2018 (niskie stężenia zawiesiny odpowiadają kolorom ciemno i jasno niebieskim, duże stężenia czerwonym i pomarańczowym). Widoczny jest obszar o szczególnie wysokiej zawartości zawiesiny, odpowiadający prawdopodobnie miejscu przemieszczenia się ścieków.





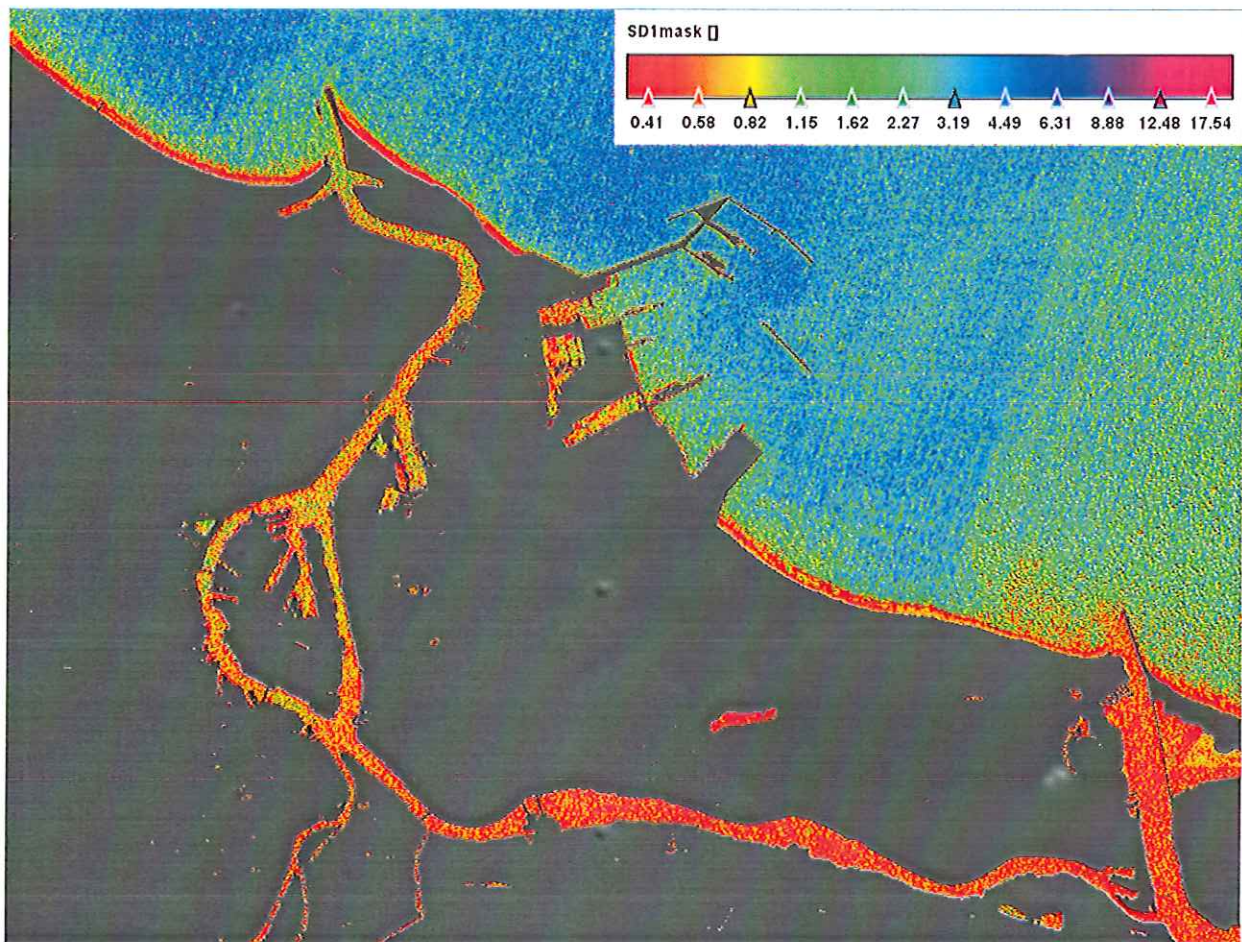
Rysunek 18. Rozkład przestrzenny zasięgu widzialności dysku Secchi, wyliczony na podstawie danych satelitarnych skanera MSI (Sentinel 2) przy pomocy opracowanego algorytmu, dla 21 maja 2018r.

Na kolejnych rysunkach (Rys 19 i 20) przedstawiona jest sytuacja w rejonie badań w dniu 23 maja. Można tam zauważyć 'ustabilizowanie' się obszaru zwiększonego stężenia zawiesiny w rejonie Kanału Kaszubskiego, przy czym możliwe do zidentyfikowania stężenia zawiesiny wydają się mniejsze niż na analogicznym zobrazowaniu sprzed dwóch dni. Co jest istotne, to brak oznak wyraźnego przedostania się plamy zanieczyszczeń w kierunku ujścia Martwej Wisły do Zatoki. Także na zobrazowaniu obszaru zatoki, brak jest oznak przedostania się tam zwiększonej ilości zawiesiny i związanych z nią zanieczyszczeń.



Rysunek 19. Przestrzenny rozkład wyliczonej na podstawie danych satelitarnych refleksyjności zdalnej dla kanału 4 skanera MSI (665nm), proporcjonalnej dla obszarów wodnych do stężenia zawiesiny w przy powierzchniowej warstwie wody, z dnia 23 maja 2018 (niskie stężenia zawiesiny odpowiadają kolorom ciemno i jasno niebieskim, duże stężenia czerwonym i pomarańczowym).

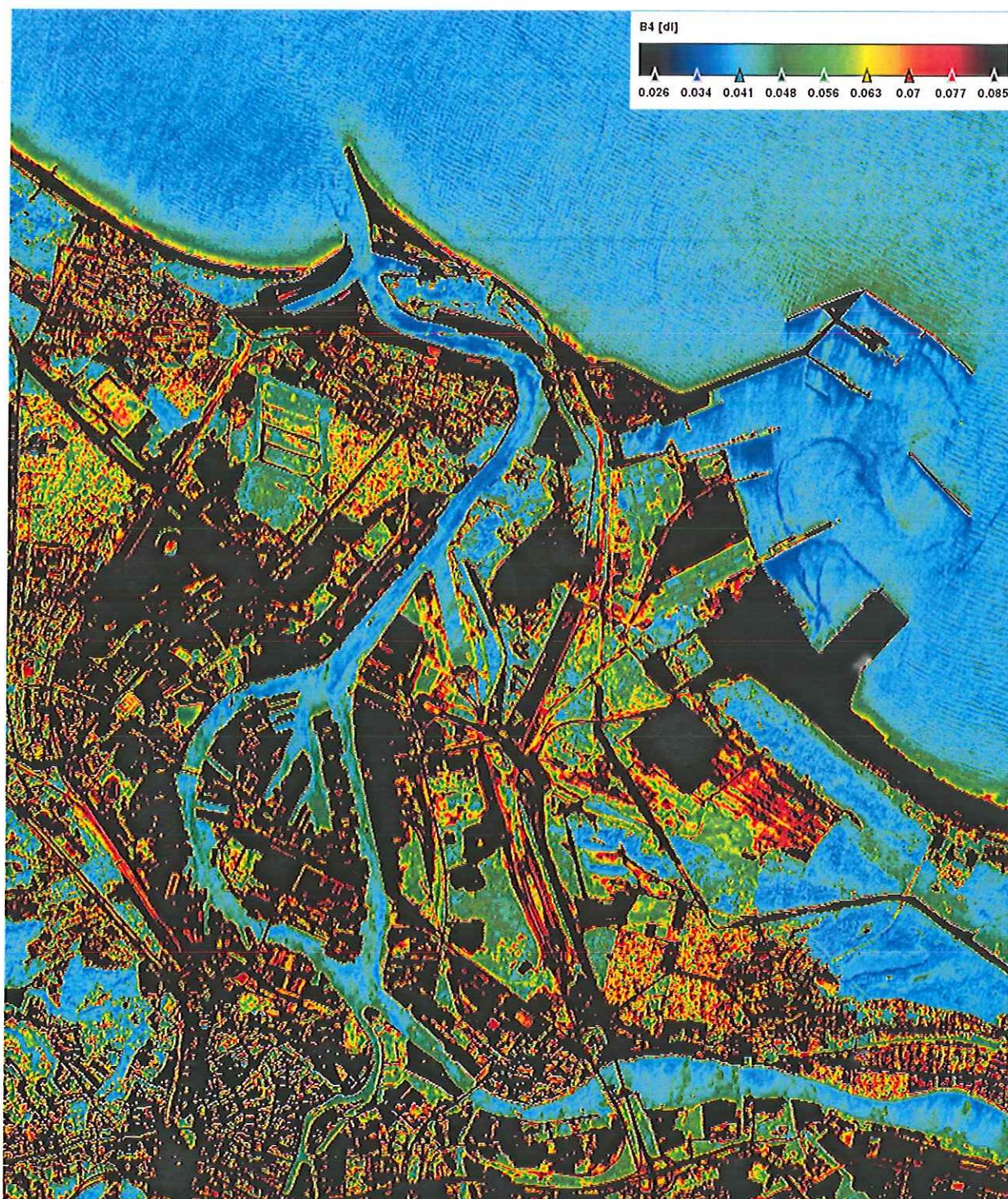




Rysunek 20. Rozkład przestrzenny zasięgu widzialności dysku Secchi, wyliczony na podstawie danych satelitarnych skanera MSi (Sentinel 2) przy pomocy opracowanego algorytmu, dla 23 maja 2018r.

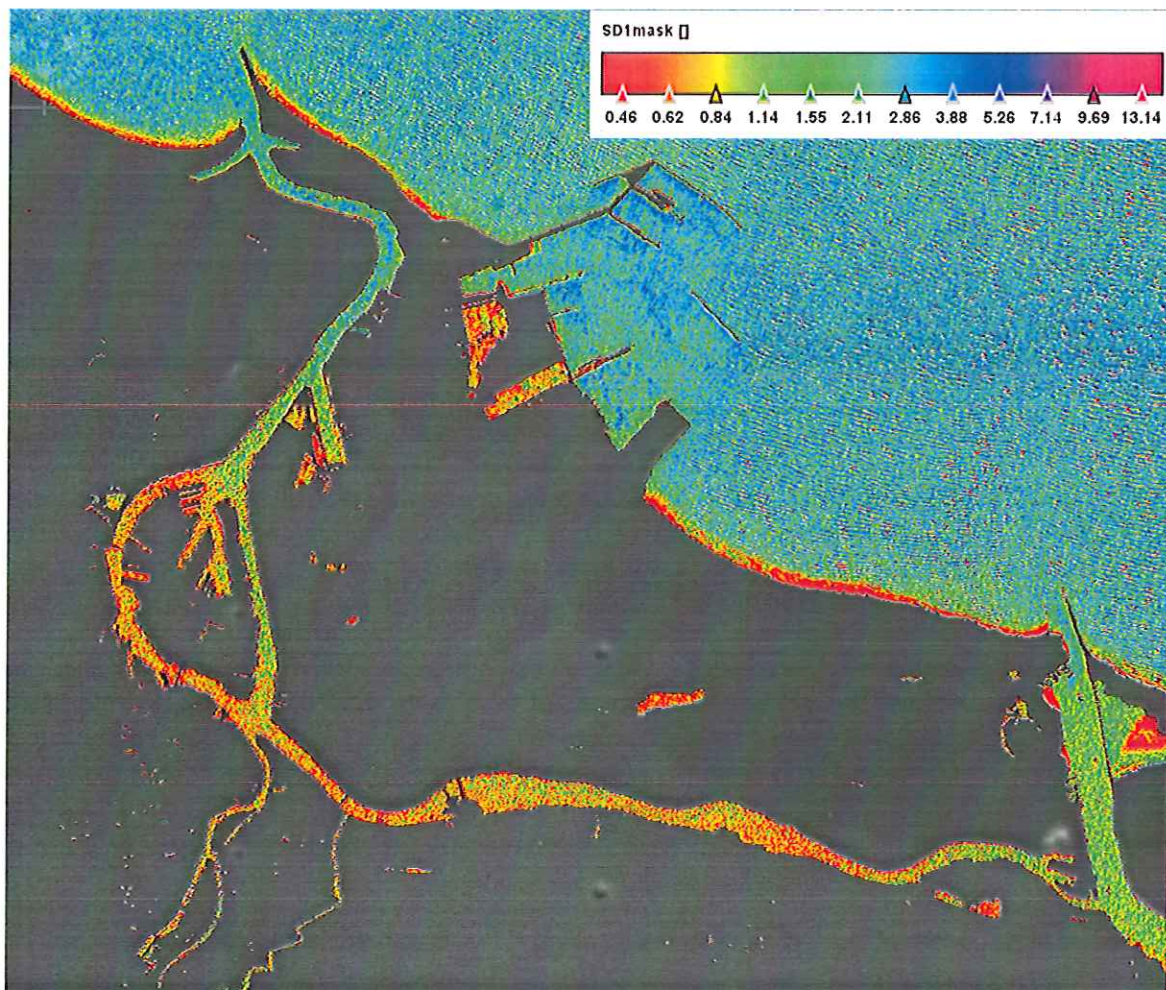
Niestety na kolejnych dostępnych danych satelitarnych, występują zbyt duże obszary zakryte chmurami, co uniemożliwia wiarygodną ocenę sytuacji. Kolejną bezchmurną sceną satelitarną jest zobrazowanie uzyskane dla 31 maja. Przedstawione jest ono na rysunkach 21 i 22



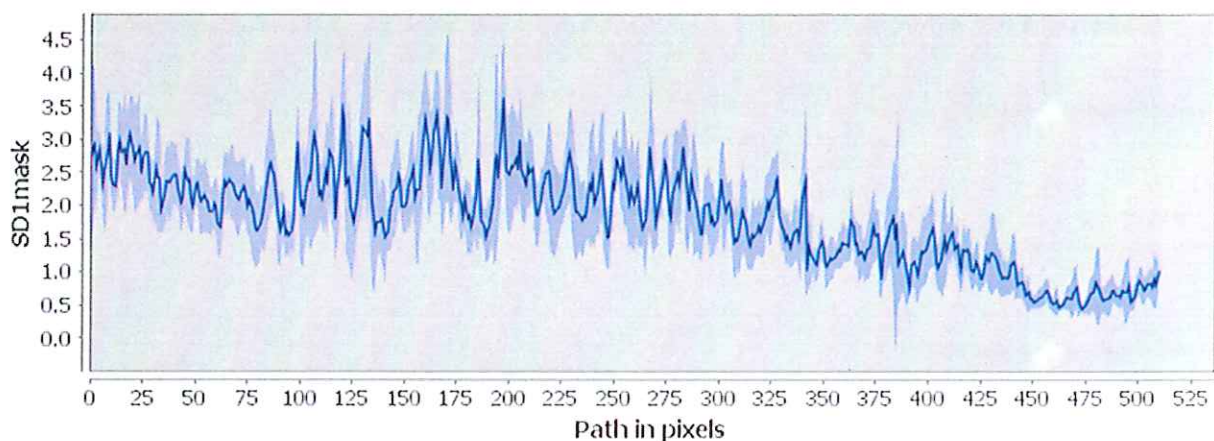


Rysunek 21. Przestrzenny rozkład wyliczonej na podstawie danych satelitarnych refleksyjności dla kanału 4 skanera MSI (665nm), proporcjonalnej dla obszarów wodnych do stężenia zawiesiny w przypowierzchniowej warstwie wody, z dnia 31 maja 2018 (niskie stężenia zawiesiny odpowiadają kolorom ciemno i jasno niebieskim, duże stężenia czerwonym i pomarańczowym).





Rysunek 22. Rozkład przestrzenny zasięgu widzialności dysku Secchi, wyliczony na podstawie danych satelitarnych skanera MSi (Sentinel 2) przy pomocy opracowanego algorytmu, dla 31 maja 2018r.



Rysunek 23. Wartości zasięgu widzialności dysku Secchi, dla transektu od ujścia Martwej Wisły do wyspy Ostrów, wyliczone na podstawie danych satelitarnych skanera MSi (Sentinel 2) przy pomocy opracowanego algorytmu satelitarnego, dla 31 maja 2018r.



Na obrazowaniach dla 31 maja, widoczne jest dalsze osłabianie się plamy zawiesiny w Kanale Kaszubskim. Za to na wodach Martwej Wisły za wyspą Ostrów pojawiły się nowe obszary ze zwiększoną zawiesiną. Jeszcze większą zróżnicowanie dla tego obszaru zaobserwowano w przypadku głębokości dysku Secchi. To drugie może też świadczyć o wtórnym pochodzeniu tego zróżnicowania przestrzennych charakterystyk prezentowanych parametrów (np. zakwit).

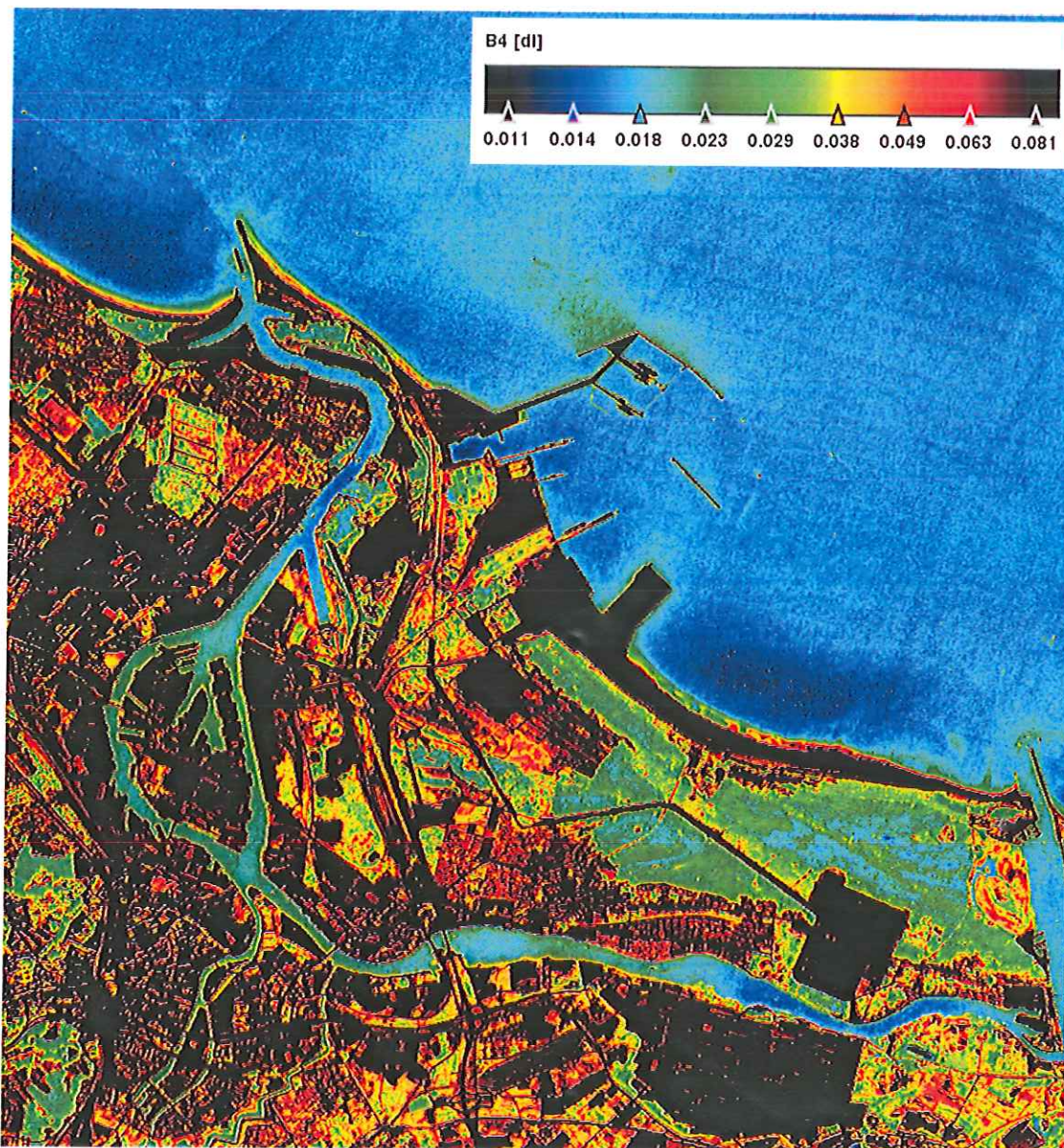
Istotnym wnioskiem z przeprowadzanej analizy jest brak oznak przemieszczenia się wód zawierających duże stężenie zawiesiny w kierunku ujścia Martwej Wisły. Potwierdza to też przedstawiony na rysunku 23 transekt wartości widzialności dysku Secchi (od ujścia do Zatoki do początku wyspy Ostrów), który odpowiada mniej więcej dynamice zmienności tego parametru, zaobserwowanej przed zrzutem ścieków (większe wartości w dolnym odcinku, zmniejszające się w miarę wzrostu odległości od ujścia). Aczkolwiek widoczny na rysunku gradient zmian od ujścia do Zatoki w górę Martwej Wisły nie jest już tak wyraźny jak w okresie przed analizowanym zdarzeniem. Podobną sytuację, możemy zaobserwować w pomiarach głębokości zasięgu widzenia krążka Secchi, wykonanych przez Instytut Morski w Gdańsku, w dniu 30 maja i przedstawionych w opracowaniu Opala i inni (2018) na rysunku nr 5 (str. 20). Zaprezentowane tam wartości są w tym przypadku mniejsze od tych określonych z wykorzystaniem opracowanego tu algorytmu, ale zmniejszenie wielkości gradientu zmian tego parametru na odcinku od ujścia do Zatoki w stronę wyspy Ostrów jest też widoczne w tych danych.

Zmniejszenie gradientu zmian zasięgu widzenia dysku Secchi może świadczyć o tym, że niewielkie ilości zawiesiny przemieszczały się jednak w stronę ujścia i zmieniały rozkład przestrzenny tego parametru, ale równie dobrze, za tę sytuację mogą być odpowiedzialne naturalne czynniki np. wpływ wód Zatoki do Martwej Wisły (o czym mogą świadczyć względnie wysokie wartości określone algorytmem satelitarnym, podobne do tych w wodach Zatoki). Wpływ na zmiany tego gradientu może też mieć zróżnicowana aktywność biologiczna tego akwenu.



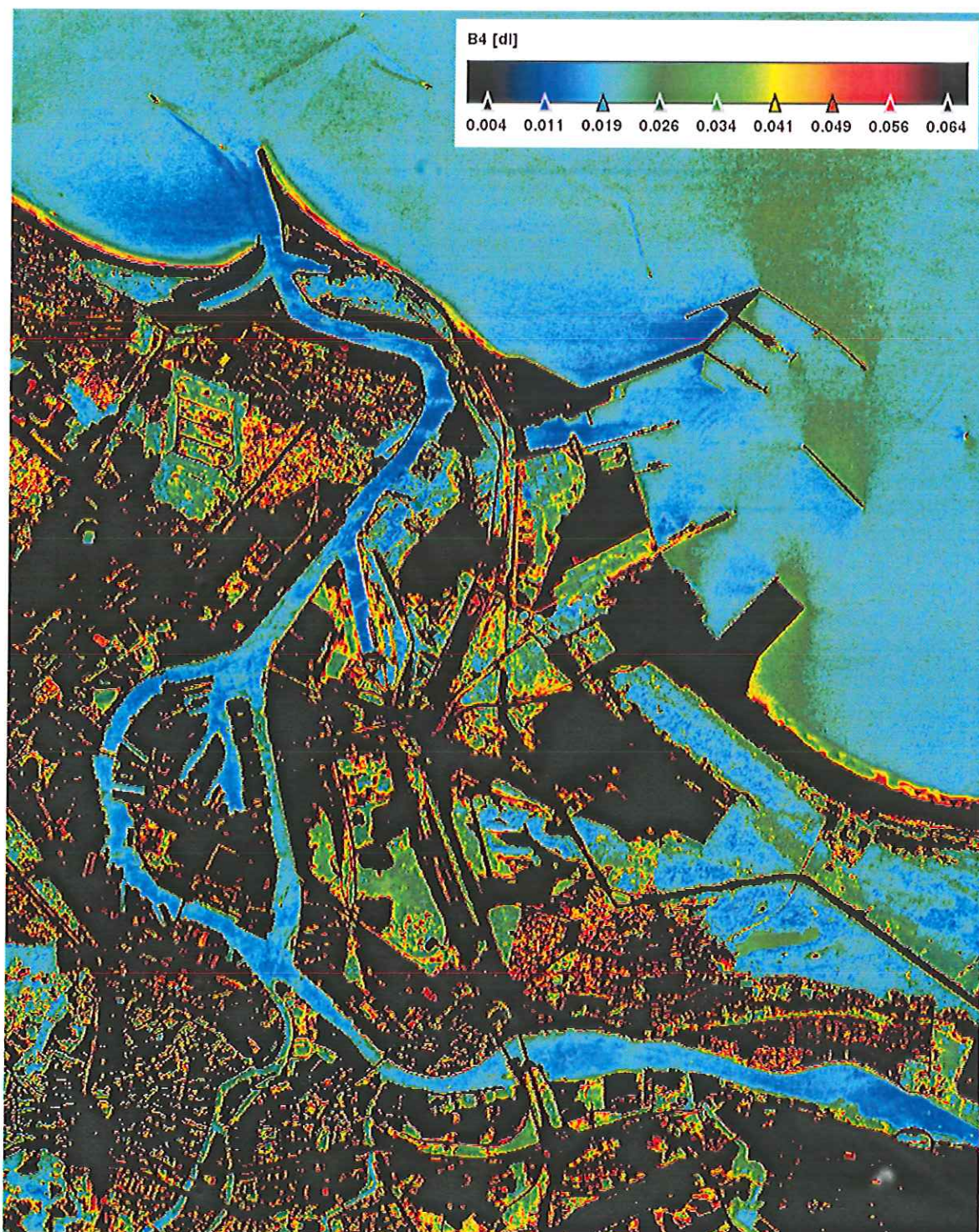
### 4.3. Sytuacja po dwóch tygodniach i w okresie późniejszym od zrzutu ścieków

Na kolejnych rysunkach (Rys. 24- 33) przedstawione są charakterystyki przestrzenne wybranych parametrów dla okresu od początku czerwca do połowy sierpnia.



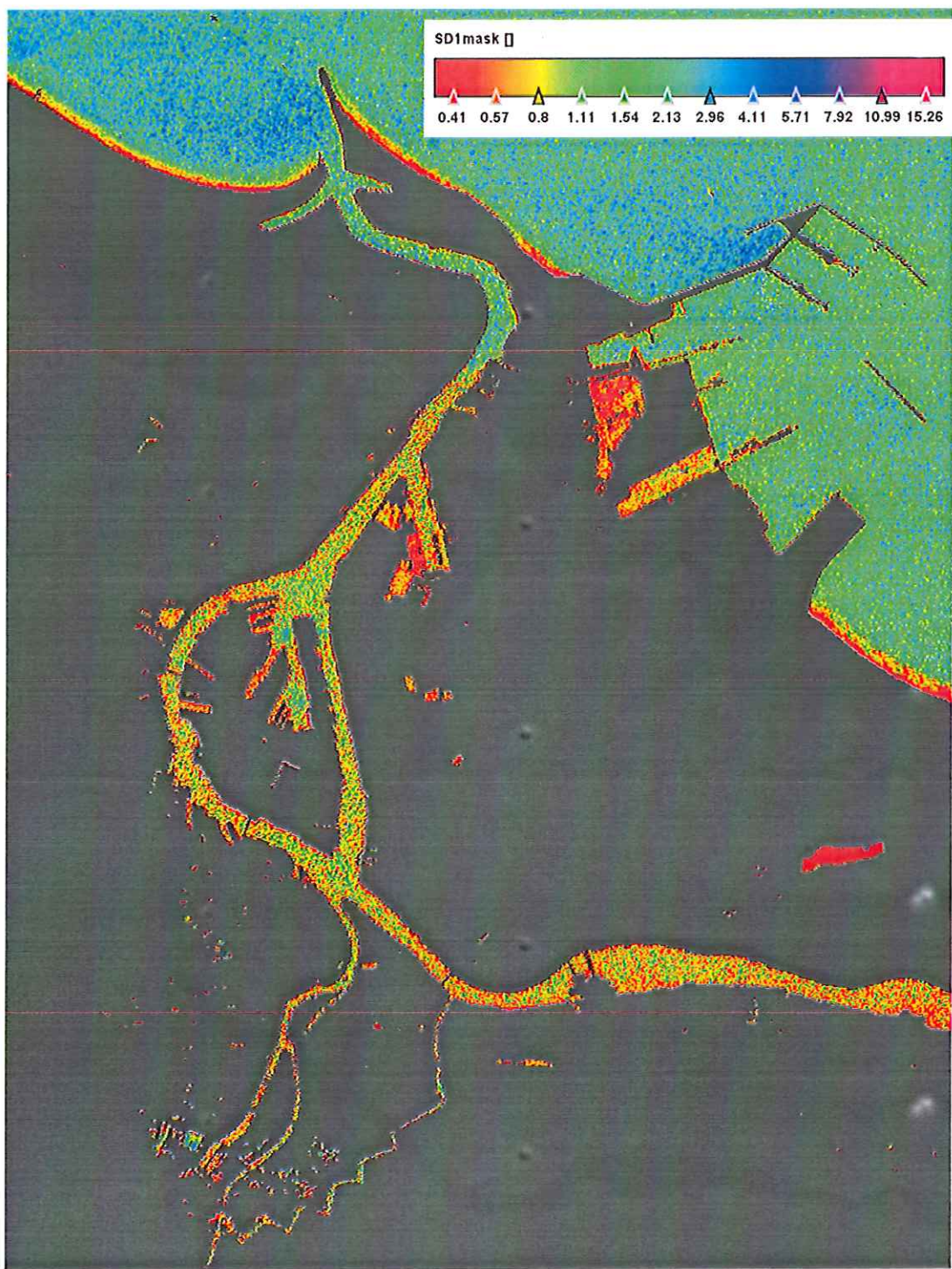
Rysunek 24. Przestrzenny rozkład wyliczonej na podstawie danych satelitarnych refleksyjności zdalnej dla kanału 4 skanera MSI (665nm), proporcjonalnej dla obszarów wodnych do stężenia zawiesiny w przy powierzchniowej warstwie wody, z dnia 2 czerwca 2018 (niskie stężenia zawiesiny odpowiadają kolorom ciemno i jasno niebieskim, duże stężenia czerwonym i pomarańczowym).





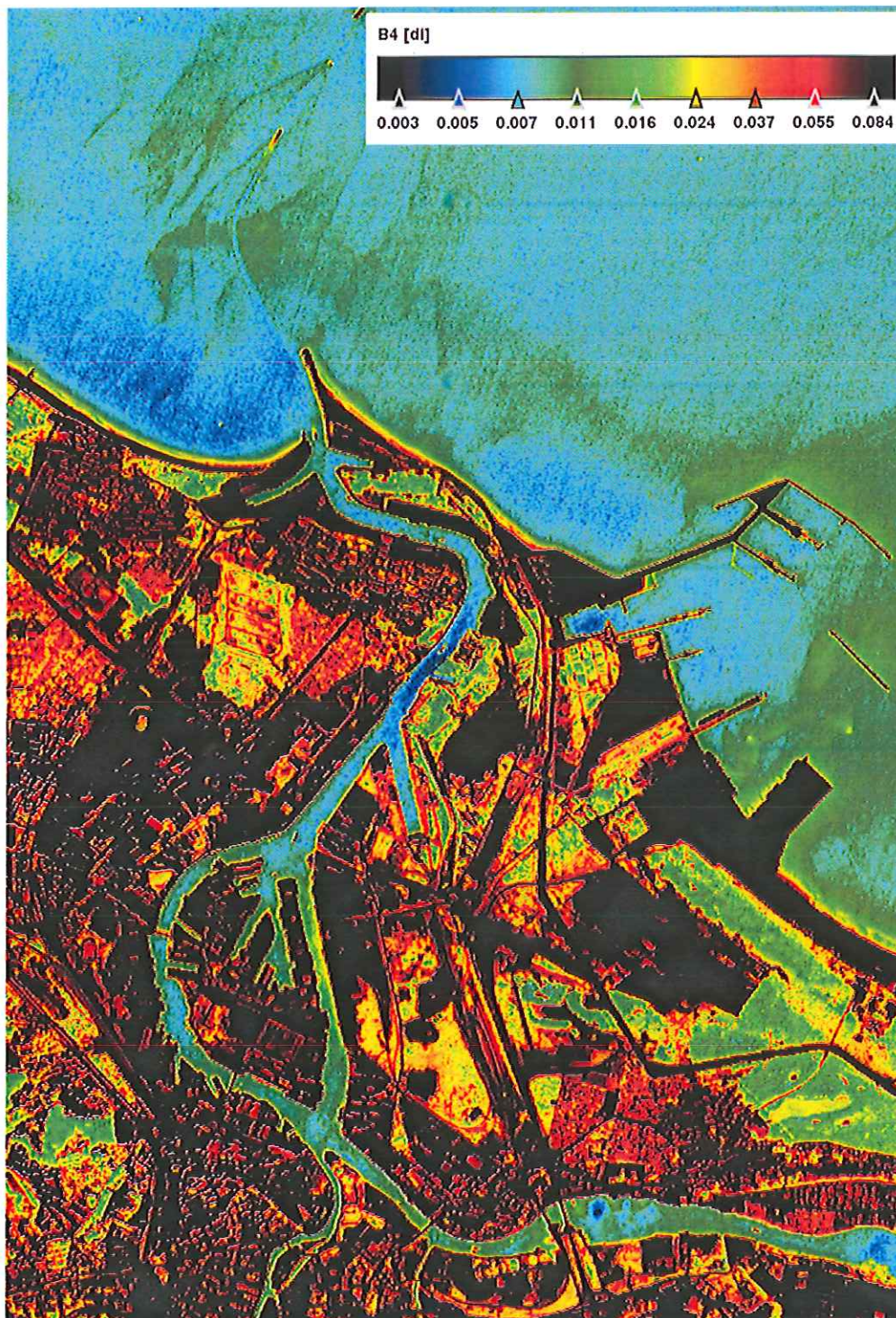
Rysunek 25. Przestrzenny rozkład wyliczonej na podstawie danych satelitarnych refleksyjności zdalnej dla kanału 4 skanera MSI (665nm), proporcjonalnej dla obszarów wodnych do stężenia zawiesiny w przy powierzchniowej warstwie wody, z dnia 10 czerwca 2018 (niskie stężenia zawiesiny odpowiadają kolorom ciemno i jasno niebieskim, duże stężenia czerwonym i pomarańczowym).





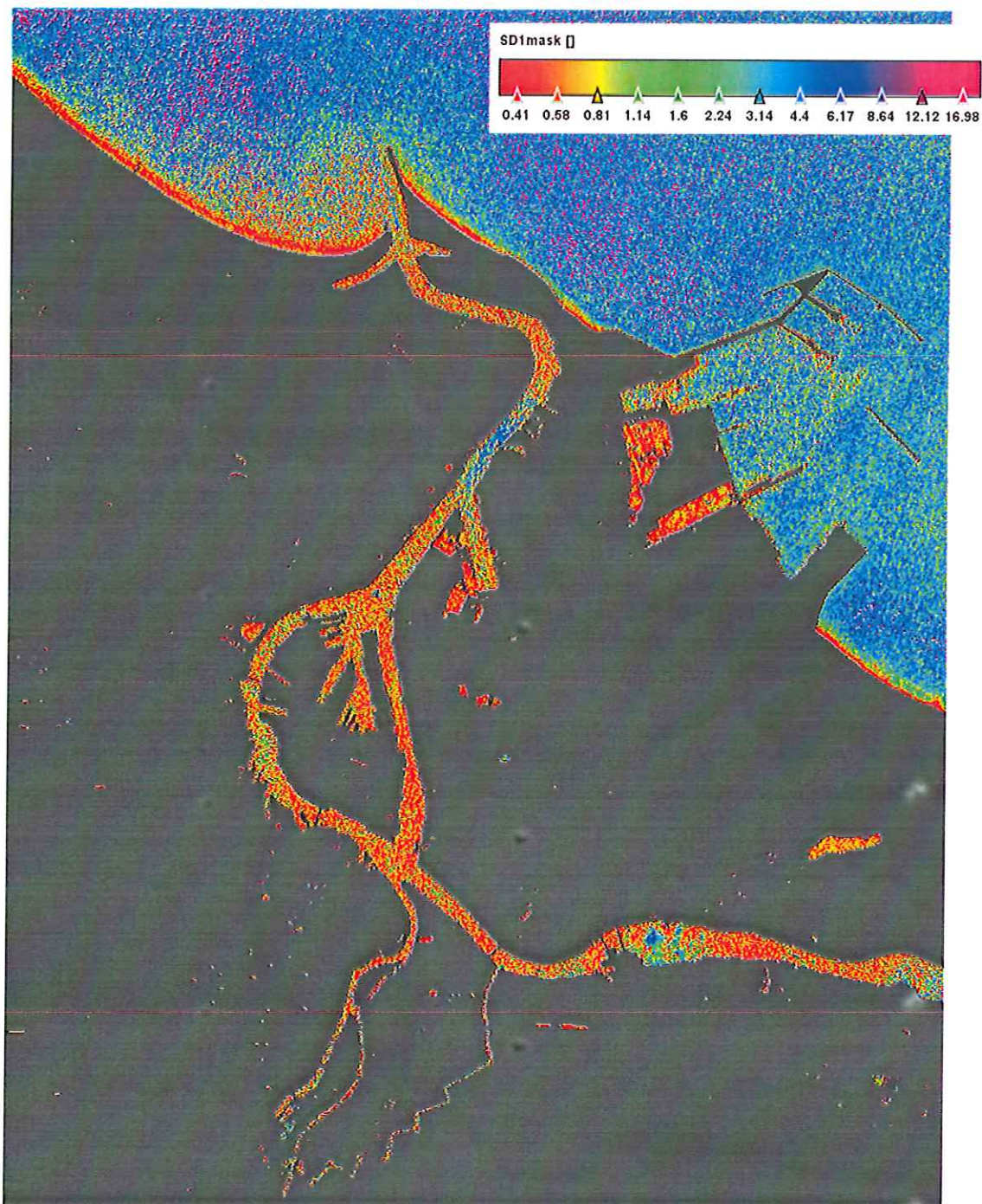
Rysunek 26. Rozkład przestrzenny zasięgu widzialności dysku Secchi, wyliczony na podstawie danych satelitarnych skanera MSi (Sentinel 2) przy pomocy opracowanego algorytmu, dla 10 czerwca 2018r





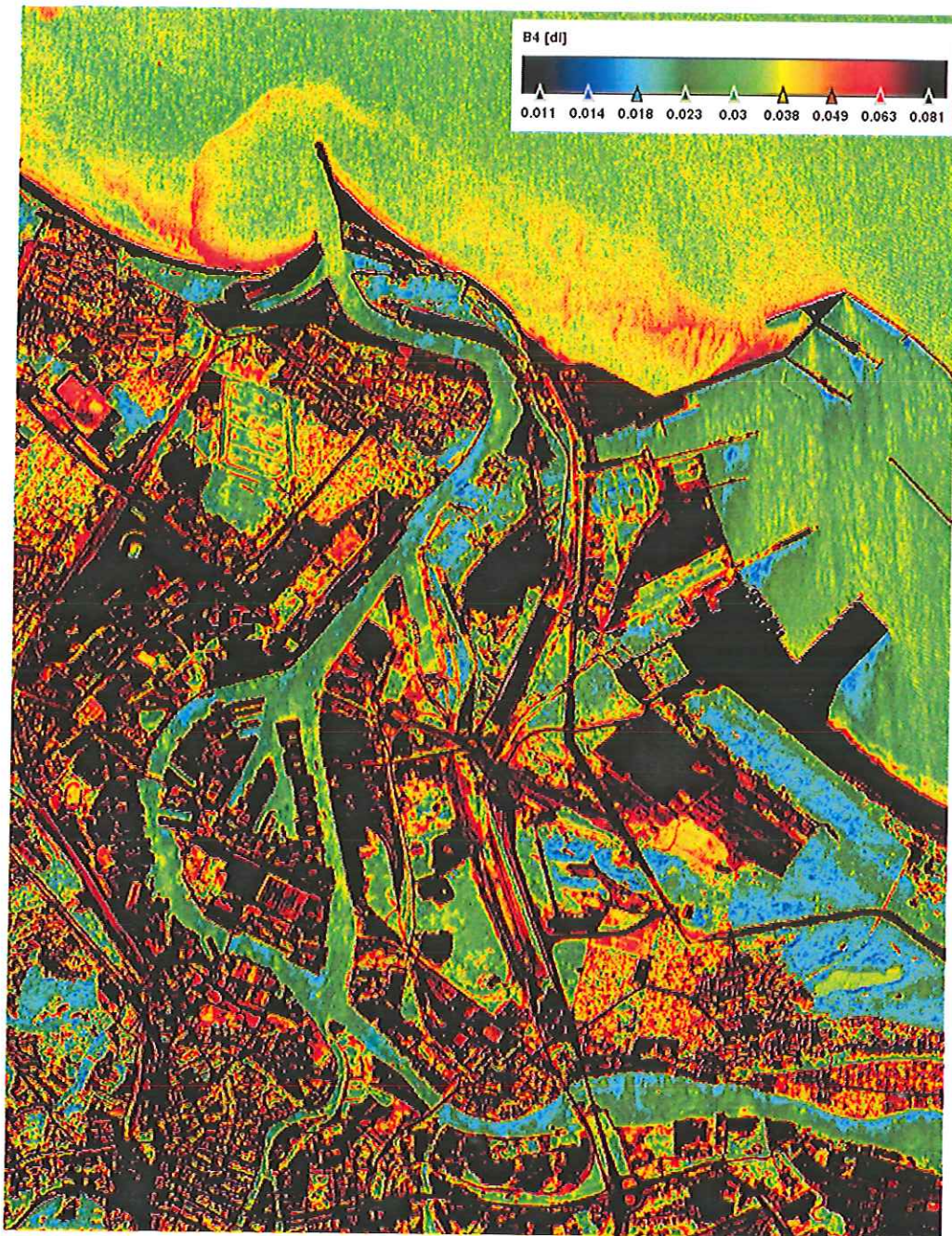
Rysunek 27. Przestrzenny rozkład wyliczonej na podstawie danych satelitarnych refleksyjności zdalnej dla kanału 4 skanera MSI (665nm), proporcjonalnej dla obszarów wodnych do stężenia zawiesiny w przy powierzchniowej warstwie wody, z dnia 27 czerwca 2018 (niskie stężenia zawiesiny odpowiadają kolorom ciemno i jasno niebieskim, duże stężenia czerwonym i pomarańczowym).





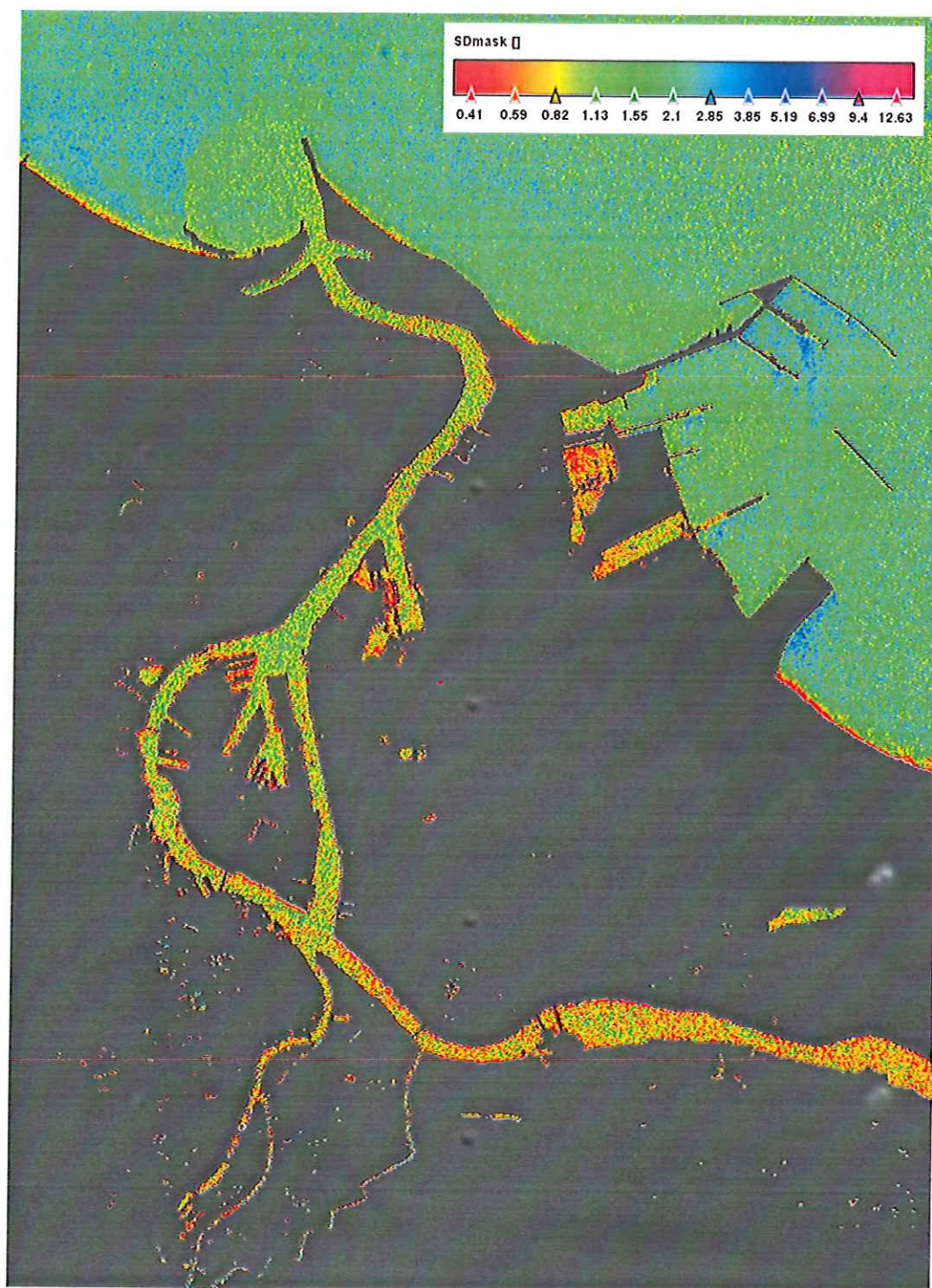
Rysunek 28. Rozkład przestrzenny zasięgu widzialności dysku Secchi, wyliczony na podstawie danych satelitarnych skanera MSi (Sentinel 2) przy pomocy opracowanego algorytmu, dla 27 czerwca 2018r.





Rysunek 29 Przemiany przestrzenne wyliczonej na podstawie danych satelitarnych refleksyjności zdalnej dla kanału 4 skanera MSI (665nm), proporcjonalnej dla obszarów wodnych do stężenia zawiesiny w przy powierzchniowej warstwie wody, z dnia 15 lipca 2018 (niskie stężenia zawiesiny odpowiadają kolorom ciemno i jasno niebieskim, duże stężenia czerwonym i pomarańczowym).





Rysunek 30. Rozkład przestrzenny zasięgu widzialności dysku Secchi, wyliczony na podstawie danych satelitarnych skanera MSI (Sentinel 2) przy pomocy opracowanego algorytmu, dla 15 lipca 2018r.



Powyższe zobrazowania satelitarne, a także wiele innych dla tego okresu, przeanalizowanych na potrzeby niniejszego opracowania, ale nie zaprezentowanych w nim, pokazują ustabilizowanie się lokalizacji mas wodnych z dużą ilością zawiesiny i prawdopodobnie powolne jej osiadanie na dnie, co widoczne było w coraz mniejszej ilości zawiesiny w wodach powierzchniowych obrazowanych na zdjęciach satelitarnych w tym rejonie. Na zobrazowaniach z dnia 15 lipca, rejon Kanału Bydgoskiego charakteryzuje się tylko nieznacznie większą ilością zawiesiny co koreluje też z większym zasięgiem widzenia dysku Secchi. Widoczna na tym zobrazowaniu zwiększona ilość zawiesiny w rejonie ujścia Martwej Wisły, związana jest prawdopodobnie z intensywną aktywnością biologiczną w rejonie zatoki, co obrazuje też rysunek 31.



Rysunek 31 Obraz RGB po korekcji Rayleigha (kanały 4 -3-2) dla Zatoki Gdańskiej zarejestrowany w dniu 15 lipca. Widoczne intensywne zakwity, także poza obszarem Zatoki.



## 5. Podsumowanie.

Opisane w literaturze dotychczasowe wyniki badań przepływów wód Martwej Wisły, określają te wody jako nieczynne ramie Wisły (Majewski, 1972). Akwen ten traktowany może być bardziej jako odnoga Zatoki Gdańskiej a w mniejszym stopniu jako ujściowy fragment rzeki. Stąd też transport mas wodnych do Zatoki, a także zawartych w nich substancji rozpuszczonych i zawieszonych, jest ograniczony. W większości przypadków dochodzi raczej do zasilania wód Martwej Wisły wodami Zatoki (Jasiński, 2002)

Stwierdzenie to znalazło też poparcie w przedstawionych zobrazowaniach satelitarnych, które pokazały przemieszczenie się zanieczyszczonych wód do Kanału Bałtyckiego a także ich mniej znacznej ilości do górnego odcinka Martwej Wisły, na zachód od wyspy Ostrów, i być może w niewielkim stopniu także w kierunku wschodnim.

Nie stwierdzono dalszego zintensyfikowanego przemieszczania się zawiesiny w stronę ujścia Martwej Wisły do Zatoki. Zalegająca w powyżej zidentyfikowanych obszarach zawiesina, prawdopodobnie w większości opadła na dno a tylko lżejsze jej frakcje mogły ulec powolnemu rozcieńczeniu w pozostałych rejonach Martwej Wisły, łącznie z możliwością ograniczonego odpływu tych frakcji na obszar Zatoki Gdańskiej, co z uwagi na niewielką ale jednak wciąż możliwą wymianę wód pomiędzy tymi akwenami wydaje się prawdopodobne.

Na podstawie przeprowadzonej analizy danych satelitarnych, nie zaobserwowano masowego wpłynięcia zanieczyszczonych wód do Zatoki Gdańskiej, mogącego mieć wpływ na stan ekologiczny tego obszaru ani też nie zaobserwowano śladów zwiększonej ilości substancji biogenicznych (zawartych zwykle w wodach ściekowych) w rejonie ujścia Martwej Wisły, mogącego objawiać się zintensyfikowanym zakwitom glonów morskich w tym rejonie. Obserwowane latem na Bałtyku i Zatoce Gdańskiej intensywne zakwity, miały charakter globalny i nie związane były z tym incydentem.

Powyższe rozważanie dotyczą tylko wniesionych zanieczyszczeń w postaci zawiesiny czy rozpuszczonych substancji organicznych, nie dotyczą zanieczyszczeń bakteryjnych i chemicznych, z założenia nie widocznych wykorzystywanymi tu metodami.

## 6. Literatura.

- Brockmann, Carsten, Doerffer, Roland, Peters, Marco, Stelzer, Kerstin, Embacher, Sabine, Ruescas, Ana, 2016. Evolution of the c2rcc neural network for sentinel 2 and 3 for the retrieval of ocean colour products in normal and extreme optically complex waters. Proc. 'Living Planet Symposium 2016', Prague, Czech Republic, 9–13 May 2016 (ESA SP -740, August 2016)
- Caballero I., Steinmetz F., Navarro G., 2018. Evaluation of the First Year of Operational Sentinel-2A Data for Retrieval of Suspended Solids in Medium- to High-Turbidity Waters. *Remote Sens.* 2018, 10(7), 982; <https://doi.org/10.3390/rs10070982>.
- Jasińska E. 2002. Hydrologia i hydrodynamika Martwej Wisły i Przekopu Wisły. IBW PAN, Gdańsk.
- Louis J., A. Charantonis & B. Berthelot, "Cloud Detection for Sentinel-2", Proceedings of ESA Living Planet Symposium (2010).
- Majewski A. 1972. Charakterystyka hydrologiczna estuariowych wód u polskich wybrzeży. *Prace Państwowego Instytutu Hydrologiczno-Meteorologicznego, Zeszyt 105: 3–40*
- Kaufman, Y., Sendra, C. Algorithm for automatic atmospheric corrections to visible and near-IR satellite imagery, *International Journal of Remote Sensing*, Volume 9, Issue 8, 1357-1381 (1988).
- Ody A., Doxaran D., Vanhellemont Q., Verney R., Pairaud I., Bourrin F., Ruddick K., B. Nechad, G. Many (2015). Assessing the spatial and temporal dynamics of suspended particles in the Rhône River plume based on high resolution ocean colour satellite data. In: Proceedings of International Ocean Color Science (IOCS) conference, 15 - 18 June 2015, San Francisco, USA. [poster]
- Opióła R., M. Kałas, T. Olszewski, 2018. Określenie stanu środowiska akwenu Martwej Wisły i Motławy na podstawie pomiarów hydrologicznych po awaryjnym zrzucie ścieków z przepompowni na Ołowiance w maju 2018 r. Wydawnictwa Wewnętrzne Instytutu Morskiego w Gdańsku Nr 7218
- Richter, R., Wang, X., Bachmann, M., and Schlaepfer, D., "Correction of cirrus effects in Sentinel-2 type of imagery", *Int. J. Remote Sensing*, Vol.32, 2931-2941 (2011).
- Vanhellemont Q. & Ruddick K., 2015. Advantages of high quality SWIR bands for ocean colour processing: Examples from Landsat - 8 (2015). *Remote Sensing of Environment*, Vol. 161 pp. 89–106 [<http://dx.doi.org/10.1016/j.rse.2015.02.007>]
- Zajączkowski M., Darecki M., Szczuciński W., 2010, Report on the development of the Vistula river plume in the coastal waters of the Gulf of Gdańsk during the May 2010 flood, *Oceanologia* 52(2), 311-317