



Физически факултет
Катедра "Метеорология и Геофизика"

Автореферат

на дисертация в изпълнение на изискванията за
придобиване на образователна и научна степен „ДОКТОР“

на Ирина Максимова Ганчева

на тема

Идентифициране на аномални структури в
Черно море по спътникови изображения

научна специалност: Метеорология

професионално направление: 4.1 Физически науки

Научен ръководител: доц. д-р Елисавета Пенева

София, 2022 г.

Съдържание

Благодарности	iv
Въведение и мотивация	1
Обхват и изследователски въпрос на дисертацията	2
Обем и структура на дисертацията	3
1 Дистанционни наблюдения на океана и на Черно море	4
2 Методология и източници на данни	7
2.1 Източници на спътникови изображения	7
2.2 Софтуер за обработка на данни	7
2.3 Числено моделиране на разпространението на нефтени разливи с Лагранжеви модели	8
2.3.1 Моделиране на нефтени разливи	8
2.3.2 Модел с пасивни лагранжеви частици	9
2.3.3 OpenDrift за моделиране на нефтени разливи	9
2.4 Статистика на X_u за количествена оценка на числените симулации	9
3 Използване на хиперспектрални спътникови данни за Черно море за характеризиране на типа вода по спектъра на отражение	11
3.1 Област на изследване и използвани данни	11
3.2 Характерни спектри на отражението	14
3.3 Профил на спектрите на отражение	15
4 Използване на мултиспектрални спътникови данни за Черно море за детектиране на речни води и зауствания на отпадни води в българския крайбрежен район	18
4.1 Оптични характеристики на отпадни води	18
4.2 Зона на изследването	19
4.3 Извличане на присъщите оптични свойства (IOPs) и променливи, използвани в анализа	22
4.4 Анализ на фракциите на IOPs	22
4.4.1 Времеви редове от дневните стойности на IOPs през 2017-2019 г.	23

4.4.2	Тернарни диаграми на средногодишните стойности	24
4.5	Обобщение и схема на автоматизирана процедура за класификация на типовете води	27
5	Използване на радарни спътникови данни SAR за Черно море за откриване на нефтени замърсявания в западните крайбрежни райони	28
5.1	Проверка на океанския инструмент SNAP за откриване на нефтени разливи за района на Западното Черноморие	28
5.2	Откриване на нефтени изтичания от потъналия кораб Мопанг с помо- щта на радарни и оптични сателитни данни от 2017 и 2018 г.	30
6	Използване на спътникови изображения за числена симулация на разпростра- нението на нефтени разливи	34
6.1	Моделиране на разпространението на нефтени разливи в открито море	35
6.2	Моделиране на разпространението на нефтени петна от потъналия ко- раб Мопанг	36
6.2.1	Настройка на модела и гранични условия	37
6.2.2	Тестване на чувствителността към първоначалната форма на нефтения разлив и коефициента на дифузия	38
6.2.3	Верификация на модела чрез инварианти на Ху	39
6.2.4	Въздействие на изпускането на нефт върху крайбрежието	41
7	Заклучения и научни приноси на дисертацията	43
7.1	Заклучения	43
7.2	Новост на изследването и научни приноси	47
	Публикации свързани с дисертацията	47
	Участие в конференции и научни форуми	48

Дисертантът е редовен докторант към Катедра Метеорология и Геофизика на Физически Факултет при Софийски Университет "Св. Климент Охридски" в периода Юли 2017 - Август 2019 и Септември 2021 - Юни 2022 г. Обучението е прекъснато за две години от Септември 2019 до Август 2021 г. за специализиран стаж свързан с темата на дисертацията към Европейската Космическа Агенция.

Дисертацията е с обем 167 страници. Състои се от Въведение и 7 глави и списък с цитираната литература. Брой фигури - 48. Брой таблици - 7. Брой цитирани литературни източници - 139, от тях 20 интернет сайта.

Дисертационният труд е обсъден и предложен за защита на разширен катедрен съвет на Катедра Метеорология и Геофизика при Физически Факултет на 21 Юни 2022 г.

Благодарности

На първо място бих искала да благодаря на научната ми ръководителка доц. д-р Елисавета Пенева за предоставената ми възможност да работя с нея по темата на дисертационния труд, както и за ценните напътствия, корекции и насоки по време на съвместната ни работа.

Искам да благодаря на Виолета Слабакова за ползотворните дискусии на тема оптични наблюдения и за общата ни работа в Глава 4.

Данните от Sentinel-2 от Глава 4 бяха обработени с помощта на д-р Бенямино Абис (Progressive Systems/ESRIN) и услугите на G-POD към ЕКА.

SAR данните от Глава 5 бяха обработени с Open SAR Toolkit настроен с помощта на д-р Андреас Фолрат от ESA Ф-Lab.

Специални благодарности на Константин Говедарски за дискусиите на тема качествен анализ на резултатите от Глава 6.

Благодаря на всички колеги от катедра "Метеорология и геофизика" за приятната работна атмосфера.

Благодаря на доц. д-р Максим Ганчев и д-р София Ганчева за коментарите и корекциите по текста.

Особено съм благодарна на невероятния ми баща, който подкрепи морално и финансово образователно/научните ми стремежи, и на прекрасната ми сестра, с която можех да споделям моментите на научен възход и отчаяние.

Благодаря на приятелите ми за цялото търпение.

Въведение и мотивация

Навлизането на новите технологии в дистанционните наблюдения ускори развитието на науките за Земята. През последните години обемът на спътникови данни се увеличи значително, което донесе много нови възможности по отношение на надеждни дългосрочни серии от данни и нови приложения за наблюдения на Земята. Големият напредък в областта на компютърните науки и възходът на изкуствения интелект промениха коренно тази област.

Това обаче води и до много нови предизвикателства. Сред тях са необходимостта от компютърна памет, изчислителни ресурси и многопрофилни учени, способни да подготвят и анализират огромни масиви от данни. Много от проблемите, свързани с прилагането на техниките за откриване на аномални структури или идентифициране на замърсявания в оперативния мониторинг на околната среда, са тясно свързани с горепосочените предизвикателства.

В областта на океанографията спътниковите наблюдения допринесоха значително за изграждането на по-пълна картина на нашите океани и за разбирането на основните процеси и взаимовръзки. По-голямата част от физичните и химичните променливи, необходими за описване на състава и състоянието на океана, могат да бъдат измерени със спътникови сензори. За дни събираме наблюдения, за които преди са били необходими месеци и години.

Въпреки това *in situ* измерванията остават от решаващо значение за верификация на алгоритмите за извличане на данни, особено в крайбрежните зони и вътрешните морета, където трябва да се вземат предвид дребномащабни явления и регионални особености.

Черно море е уникално в това отношение и много интересна тестова зона: оптичните свойства на водата са комплексни поради ниската соленост, големия речен вток и богатото биоразнообразие. За съжаление кампаниите за *in situ* измервания са оскъдни, а наблюдателните круизи не са регулярни през последните три десетилетия. Дистанционните наблюдения допринесоха значително за запълване на пропуските в регулярния мониторинг на Черно море.

Променящият се климат засяга басейна повече в сравнение с други регионални морета или океани. Повишената температура на повърхността и по-топлите зими нарушават цикъла на "подхранване" на студения междинен слой, необходим за поддържане на разделението между долните и горните водни маси на Черно море, което

е уникална характеристика на басейна. На настоящия етап е важно да продължим да наблюдаваме Черно море, за да разберем процесите на промяна и да можем да действаме в отговор на предстоящите предизвикателства.

Черно море е едно от най-замърсените европейски морета. В него се вливат многобройни реки с голям водосборен басейн, които преминават през региони с интензивно селско стопанство. Освен това крайбрежните зони са популярни места за отпочиване за много хора и градовете са диспропорционално населени през летните месеци. Това представлява предизвикателство за често остарялата канализационна система и зле пречистените отпадни води се изхвърлят в морето в непосредствена близост до плажове.

От друга страна, Черно море е важен транспортен възел, който свързва континенти. То е от решаващо значение за преноса на нефт и газ към Европа и за транспорт на стоки, зърно и хуманитарна помощ към Африка. Интензивният трафик на кораби е честа причина за замърсявания с нефт от значително количество в близост до бреговата линия.

В този смисъл трябва да се полагат постоянни усилия за разработване и усъвършенстване на технологиите за оперативен мониторинг. Имайки предвид множеството преимущества на спътниковите данни, услугите за мониторинг на качеството на водата често се разработват на тяхна основа. Това подчертава значението на разработването на нови методи за използване на дистанционни наблюдения и подобряване на съществуващите.

Обхват и изследователски въпрос на дисертацията

Целта на дисертационния труд е да се открият различни структури по повърхността на Черно море чрез анализ на спътникови изображения, да се проучи техният произход и да се разграничи дали са от източник на замърсяване. В това изследване сме анализирали три различни типа спътникови данни – мултиспектрални, хиперспектрални и радарни, приложили сме добре познати и изпитани методологии за обработка на изображения и сме разработили иновативни техники за анализ на данни. Основните цели на дисертацията са следните:

- Отчитане спецификата на водите на Черно море в сравнение с други басейни в контекста на анализ на спътникови изображения.
- Изследване на възможностите за класифициране на типа вода в западната част на Черно море с помощта на хиперспектрални спътникови изображения: анализ на спектрите на отражение от хиперспектрални и мултиспектрални спътникови мисии за района на делтата на река Дунав.

- Разработване на методология за различаване на води с речен произход или отпадни води в морската среда: анализ на мултиспектрални спътникови данни за българското крайбрежие.
- Откриване на нефтени замърсявания в западната част на Черно море с помощта на радарни спътникови данни от радар със синтетична апертура (САР) – проверка на метода и приложение в този район.
- Доказване на ползата от използването на спътникови данни при числени симулации на разпространението на нефтени петна: приложение на Лагранжев числен модел, верификация на модела и оценка на потенциалните опасности за крайбрежните зони.

Обем и структура на дисертацията

Дисертацията е организирана в 7 глави като изложението е 167 страници.

Глава 1 дава теоретичен преглед и всички важни термини в контекста на дистанционните наблюдения на океана. Представен е регионът на изследване - Черно море - и са описани важните му особености от гледна точка на спътниковите наблюдения.

Глава 2: дава информация за наличните източници на спътникови данни, които са използвани в изследването. Представен е софтуерът за обработка на данни, като са обяснени неговите важни функционалности и характеристики.

В следващите четири глави са представени резултатите от проведеното изследване. Глава 3 е посветена на изследването на Дунавската делта в Черно море по изображения от новата хиперспектрална мисия PRISMA, сравнени с мултиспектралната мисия Sentinel-2.

Глава 4 представя анализ на мултиспектрални изображения от мисията Sentinel-2 с цел откриване на речни или отпадни води, които постъпват в морска среда.

Глава 5 е посветена на детектиране на нефтени разливи с данни от САР.

Глава 6 представя приложението на Лагранжеви модели за описване разпространението на детектирани нефтени петна.

Глава 7 обобщава важните приноси на тази дисертация и дава перспектива за възможни бъдещи изследвания.

Глава 1

Дистанционни наблюдения на океана и на Черно море

През последните 50 години мултиспектралните оптични мисии подобриха значително качествата на изображенията по отношение на времевата и пространствената разделителна способност [1,2]. Техните данни допринесоха много за разбирането на процесите в световния океан и вътрешните водни басейни. През последните години данните от мисиите Sentinel се оказаха много важни в това отношение [3].

Огромният потенциал на хиперспектралните данни е признат в научната общност и темите на изследванията обхващат широк спектър – от селско стопанство и картографиране на земната повърхност, до мониторинга на качеството на водите и управлението на крайбрежните зони [4]. Хиперспектралните сензори осигуряват голям брой канали с добра спектрална разделителна способност от 6,5 до 25 nm и широк диапазон на дължината на вълната от късовълновия ултравиолетов и видимия, до късовълновия инфрачервен спектър [4], които покриват много области на приложение [4-6].

В морските наблюдения хиперспектралните изображения допринасят значително за повишаване точността на оценка на важни променливи за качеството на водата, като концентрацията на хлорофил-а и общо суспендирано вещество, в сравнение с мултиспектралните инструменти [6]. Също така хиперспектралните данни се оказват важни за идентифицирането на нови променливи, особено при характеризиране на частици и разтворени вещества: вид, размер на суспендираните частици; видове пигменти; но също така и при идентифицирането на неорганични замърсители; цианобактерии и др., [6]. Има много малко проучвания за Черно море, които анализират хиперспектрални данни. Lavrova et al. [7] публикуват изследване на различни набори от данни, подчертавайки предимствата на хиперспектралните изображения, като разглеждат североизточната част на Черно море и Азовско море. В изследването са разгледани оптичните свойства на умерено мътни и богати на фитопланктон води от крайбрежната зона и прилежащи водни тела на земята, като са сравнени спектрите на отражение. Хиперспектралните данни се оказват от голямо значение

за откриване и разграничаване на различни видове антропогенно и биогенно замърсяване в крайбрежните зони.

Специфичните оптични характеристики на Черно море са тясно свързани с биологичната активност и процеса на еутрофикация. През последните четири-пет десетилетия екосистемата е претърпяла няколко промени, включително преминаване от относително чисти води през 70-те към деградация на екосистемата до началото на 90-те години на XX в. [8–10]. През 90-те години се съобщава за промени свързани с увеличаване на разпространението, продължителността и честотата на цъфтежа на фитопланктон [11], което води до аноксия/хипоксия и загуба на придънни видове [12]. Тези процеси са особено интензивни в северозападната част на морето, където се оттичат водите на четири големи европейски реки (Дунав, Днестър, Днестър, Буг). Основните екологични проблеми в Черно море се дължат на прекомерния риболов, навлизането на инвазивни видове, еутрофикация и промените в биоразнообразието [13–15].

Водата в Черно море е класифицирана като тип 2, което прави дистанционните наблюдения на цвета на океана сложна задача [16]. Водите от тип 1 са такива с присъщи оптични свойства (Inherent Optical Properties – IOPs), при които преобладава фитопланктонът (напр. повечето води в открития океан), а водите от тип 2 (напр. някои крайбрежни и вътрешни водни басейни) се характеризират с относително висока абсорбция на разтворени органични вещества и концентрации на не пигментни частици, които не са ясно свързани с концентрацията на хлорофил-а. [17–19]. По този начин стандартните биооптични алгоритми, разработени за водите от тип 1, не успяват да опишат оптично Черно море, като дават големи неточности (от порядъка на стотици проценти) на концентрацията на хлорофил-а в крайбрежните зони [20, 21].

Характерни за Черно море са коколитофорните цъфтежи на *Emiliana huxleyi*, [22]. Коколитофорите са сферични едноклетъчни водорасли, покрити с калцирани плочки или единични коколита. Те са от планктонен тип, фотосинтезират и са типични за умерените, субтропичните и тропичните океани [23].

Единичните коколита могат лесно да се отделят от повърхността на коколитофора и разпръскват светлината силно и неселективно, което ги прави лесно откриваеми с оптични сензори. Обратното разсейване b_{bp} е основният параметър за количествена оценка на коколитофорните цъфтежи [24].

Регионално адаптираните алгоритми за цвят на океана се основават на емпирична зависимост между концентрацията на коколитофорите и обратното разсейване на частиците. Тази зависимост обаче може да бъде силно повлияна от обратно разсейване, несвързано с коколитофорите, идващо например от частици, постъпващи с речния вток. То не се отчита в регионалните алгоритми [24]. Това е често срещан проблем при прилагането на биооптични алгоритми, които не са адаптирани за Черно море, за което е характерен високият речен вток. Възможно решение е ди-

ректният анализ на присъщите оптични свойства (IOPs), които са основен резултат от алгоритмите за извличане на данни от оптични изображения и не се основават на емпирични зависимости.

Черно море е ключов транспортен център и обект на интензивен морски трафик, а замърсяването с нефт е актуален въпрос. Освен това басейнът е богат на суров нефт и често биват открити естествени находища [25, 26], което подчертава значението на мониторинга на нефтени замърсявания от малък мащаб в крайбрежните зони.

Имайки предвид уязвимостта на крайбрежната екосистема на Черно море и честотата на детектирани малкомащабни нефтени разливи в близост до брега, моделирането на нефтените разливи е актуална тема. Публикуваните изследвания показват, че синергичното използване на спътникови наблюдения за подобряване на граничните условия на моделирането на разливи показва подобрени прогнози [27]. Има две публикувани изследвания по темата за района на Бургаския залив от Гълъбов et al. [28, 29], които дават оценка на щетата от нефт за Бургаското пристанище. Те разглеждат хипотетични сценарии, а не реални спътникови наблюдения. Ето защо адаптирането на модел за региона, който също може да моделира разливи от реални спътникови наблюдения е от особен интерес.

Глава 2

Методология и източници на данни

2.1 Източници на спътникови изображения

Спътниците от мисията Sentinel са ядрото на космическия сегмент на програмата Copernicus [30], което осигурява актуални спътникови изображения с висока резолюция. Те са разработени специално за научните нужди на програмата, като отговарят на изискванията на потребителите. Спътниците Sentinel са съществена част от системата за мониторинг на крайбрежните райони на Черно море, както и при подготовка за бедствия, картографиране и намаляване на риска от аварии [31].

Изследователската работа на тази дисертация се основава на данни от мисиите Sentinel-1 и -2. Sentinel-1 е оборудван с Радарна антена със Синтетична Апертура (САР) и предоставя информация за океанографски и наземни изследвания. Sentinel-2 е оборудван с мултиспектрален оптичен инструмент, предназначен за наземни услуги, но намира и значително приложение в изследванията на океани и сладководни басейни.

В глава 3 спектрите на отражение на Sentinel-2 са сравнени с хиперспектрални изображения от мисията PRISMA (PRecursores IperSpettrale della Missione Applicativa). PRISMA има два отделни инструмента - спектрометър във видимия и близък инфрачервен диапазон (visible and near infrared – VNIR) (400 nm до 1010 nm) с 66 канала и диапазон на канала под 11 nm и детектор за късовълнова инфрачервена светлина (short wave infrared – SWIR) (920 nm до 2500 nm) със 174 канала и диапазон на канала под 15 nm. Обхватът на едно изображение е 30×30 km, а размерът на пиксела е 30×30 m за каналите VNIR и SWIR и 5 m за PAN-хроматичния канал [32].

2.2 Софтуер за обработка на данни

Данните от мисията PRISMA се обработват с приставката на QGIS за обработка на хиперспектрални изображения EnMAP [33].

Оптичните изображения от Sentinel-2 се обработват със софтуера SNAP (Sentinel Applications Platform), който предоставя различни функционалности. Изследването, представено в глава 4, се основава на анализ на фракциите на IOPs. Те са изчислени с процесора Case 2 Regional Coast Colour (C2RCC), вграден в SNAP за комплексни води от тип 2 [34]. Процесорът C2RCC е биооптичен модел, базиран на алгоритъм на невронна мрежа.

Радарните изображения от SAR сензора на Sentinel-1 също се обработват със SNAP. Обработката на SAR изображения изисква значителни изчислителни ресурси и предварителна обработка, за да се получат данни готови за анализ.

Изследванията, представени в разделите 5.1 и 5.2, използват океанския инструмент на SNAP за детектиране на нефтени разливи, в който е приложен адаптивен прагов алгоритъм [35, 36].

2.3 Числено моделиране на разпространението на нефтени разливи с Лагранжеви модели

2.3.1 Моделиране на нефтени разливи

Моделите за разпространение на нефт най-общо могат да бъдат два вида: Ойлерови и Лагранжеви. Ойлеровите модели могат да се основават или на принципа за запазване на масата и импулса, който се прилага към нефтеното петно, или на решаване на уравнението за конвекция - дифузия. В този случай дифузията описва разпространението на нефтеното петно в морето, а адвективният и конвективен член описват преместването на нефтените частици от морските течения и вятъра, [37].

Лагранжевите модели (модели с лагранжеви частици) дискретизират нефтеното петно като струпване на нефтени капки и описват движението им чрез адвекция на всяка частица с морските течения, вятъра и вълните. В оперативната работа често се използват Лагранжеви модели, тъй като те са по-ефективни по отношение на точност, разходи и изчислителни ресурси, [38, 39].

Има няколко научни статии, които показват резултати от моделиране на реално детектирани нефтени замърсявания от спътници с данни за валидиране [27, 40, 41]. Публикуваните изследвания по темата показват, че наличието на спътникови наблюдения води до подобрени прогнози [27].

Има и няколко статии, посветени на моделирането на нефт за румънското крайбрежие [42] и българската крайбрежна зона, [28, 29].

2.3.2 Модел с пасивни лагранжеви частици

Моделът, използван в глава 6.1, е Лагранжев модел, написан на Fortran за проследяване траекторията на пасивни трасери. Дисперсионното уравнение за компонентите x и y е

$$\begin{aligned}x^{n+1} &= x^n + \frac{u\Delta t}{\frac{\pi R_e \cos y^n}{180}} + \frac{r\sqrt{6D_H\Delta t}}{\frac{\pi R_e \cos y^n}{180}} \\y^{n+1} &= y^n + \frac{v\Delta t}{\frac{\pi R_e}{180}} + \frac{r\sqrt{6D_H\Delta t}}{\frac{\pi R_e}{180}}.\end{aligned}\tag{2.1}$$

В това уравнение x и y са географската дължина и ширина на местоположението на нефтения разлив; u и v са зоновата и меридионалната скорост; R_e е радиусът на Земята; D_H е хоризонталният коефициент на дифузия, а r е случайно число между 0 и 1. Този модел се оказва твърде прост за описване на реалното петно, което мотивира използването на по-сложен модел в следващата глава.

2.3.3 OpenDrift за моделиране на нефтени разливи

Проучването, представено в раздел 6.2, използва модула за симулации на нефт на Лагранжевия модел OpenDrift [43] с цел проследяване на движението на ансамбъл от нефтени частици, освободени от потънал кораб.

OpenDrift изисква информация за метеорологични и морски условия, които са необходими като гранични условия за правилното изчисляване на адвекцията и трансформацията на нефтените частици. За симулациите, представени в настоящото изследване, използваме почасови стойности за повърхностното океанско течение от реанализа на Copernicus Marine Services [44] и скорост на вятъра от атмосферния анализ на Европейския център за средносрочни метеорологични прогнози (ECMWF) – ERA5 [45].

2.4 Статистика на X_u за количествена оценка на числените симулации

За да оценим точността на резултатите от симулацията на разпространение на нефт и да изберем симулационен сценарий, който най-добре описва реалните наблюдения, използваме (математически) моменти за характеризирание на обекти. При обработката на изображения концепцията за "моменти на изображението" се използва за описване на среднопретеглената стойност на интензитета на пикселите на дадено изображение. Те са полезни за характеризирание на обекти след сегментиране, преобразуване на изображения и за анализ на изображения. Тази техника е изведена от общата теория на моментите [46].

Тук изчисляваме инвариантите на момента на Xu [47], за да опишем до каква степен числените симулации на нефтеното изтичане от потъналия край гр. Созопол кораб Мопанг приличат на действителните наблюдения. Моментните инварианти на Xu (също се наричат моменти на Xu) са набор от седем числа, които се използват за описание на трансформации на изображения и модели на обекти. Те се изчисляват от централните моменти на всяко изображение. Първите шест момента са инвариантни за трансляция, мащаб и ротация, а седмият момент променя знака си при отразяване на изображението.

Инвариантите на моментите на Xu се използват често в обработката и сравняването на изображения, давайки обективен и математически изведен набор от стойности, [48]. В разработването на алгоритми за детектиране на нефтени разливи по сателитни изображения, моментите на Xu се използват за подбор и извличане на признаци за охарактеризиране на тъмни обекти, [49, 50].

Има няколко налични метода за автоматично изчисляване на стойностите на моментите на Xu чрез отворени библиотеки. Ние изчисляваме седемте момента на Xu с помощта на библиотеката OpenCV на Python [51].

Глава 3

Използване на хиперспектрални спътникови данни за Черно море за характеризиране на типа вода по спектъра на отражение

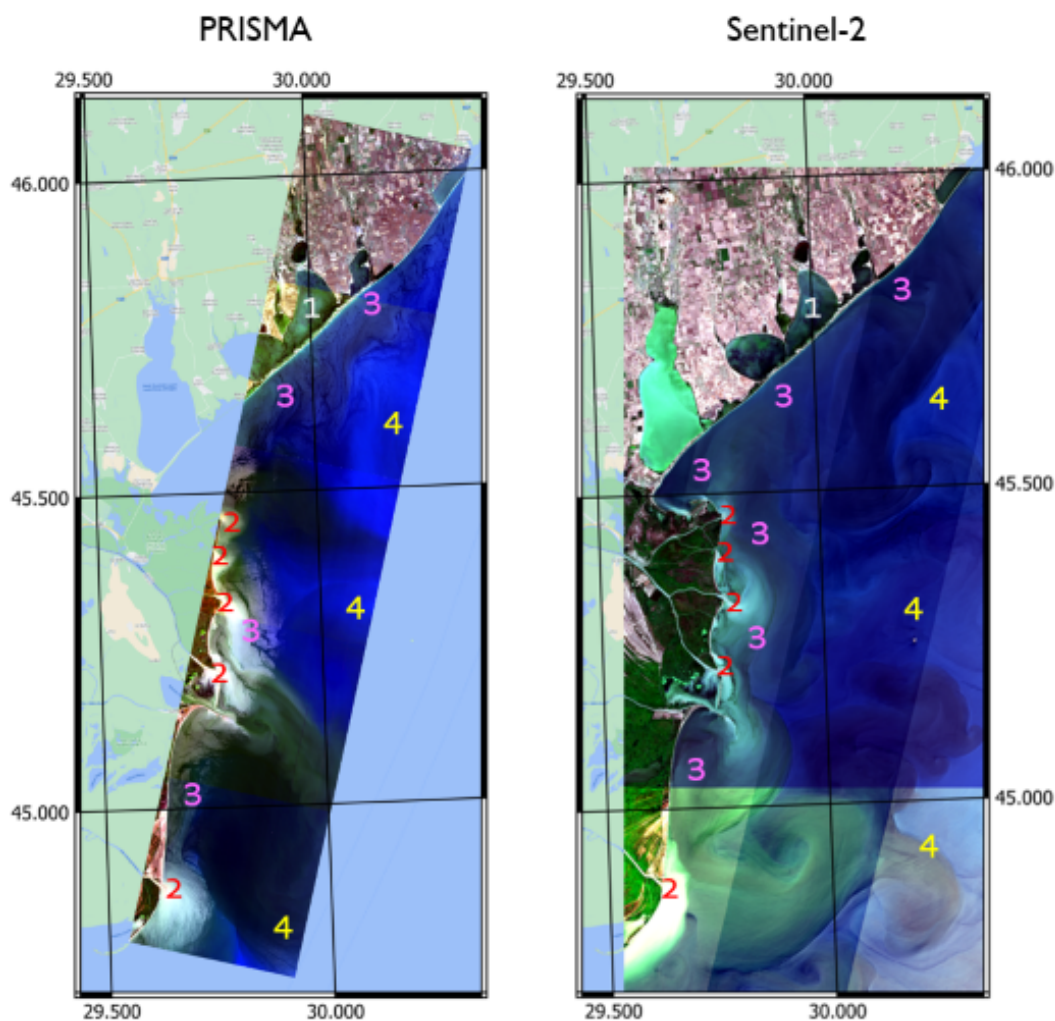
Хиперспектралните спътникови изображения са много информативни, но са предизвикателство за обработка и анализ. Размерът на едно хиперспектрално изображение, което покрива площ от 30x30 km, е над 2 GB, което изисква значителни изчислителни ресурси.

Използвайки хиперспектрални данни от PRISMA и мултиспектрални данни от Sentinel-2, изследваме възможността да различим типове вода в делтата на река Дунав и близката крайбрежна зона на Черно море въз основа на спектрите на отражение.

Изследването на Giardino et al. [52] показва, че синергичното използване на PRISMA и Sentinel-2 за приложения за морски и сладководни райони е от полза. Niroumand-Jadidi et al. [53] правят анализ на отразеното от водната повърхност лъчение, както и извлечените параметри за качество на водата (концентрация на общо суспендирано вещество, хлорофил-а и цветно разтворено органично вещество (Colored Dissolved Organic Matter - CDOM)), като показват добро съответствие между получените от Sentinel-2 и PRISMA параметри на водата.

3.1 Област на изследване и използвани данни

В това изследване анализираме спектрите на отражение от мултиспектралния инструмент на Sentinel-2 и хиперспектрални изображения от PRISMA в диапазон от 400 до 2500 nm. Областта на изследването обхваща северозападната част на крайбрежната зона на Черно море, включително делтата на река Дунав. Поради ограничената наличност на изображения от мисията PRISMA е трудно да се намерят

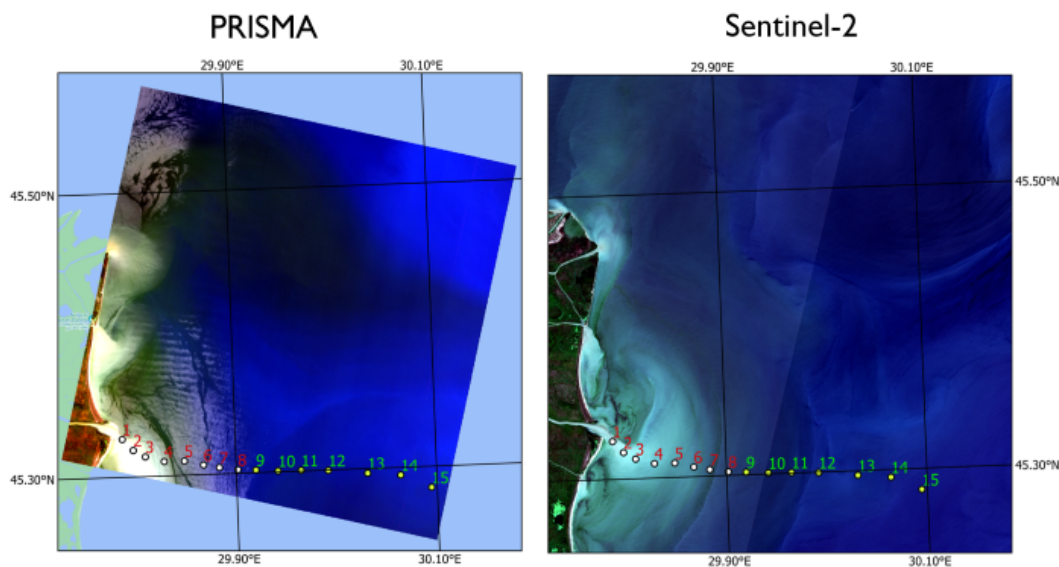


Фигура 3.1: RGB композити от PRISMA (ляво) и Sentinel-2 (дясно) за цялата област на изследването. Числата показват различни типове вода: 1 – лагуни, 2 – устия на реки и потоци, 3 – мътни крайбрежни води, 4 – оптично чисти морски води.

точно припокриващи се снимки от Sentinel-2 и PRISMA. За целта на нашето изследване използвахме пет безоблачни изображения от PRISMA за региона, заснети на 4 юли 2020 г. Изображенията са заснети последователно в низходяща орбита в 9:06 ч. Най-близките по време изображения на Sentinel-2, които покриват района на изображенията от PRISMA са заснети на 6 юли 2020 г. Получени са последователно във възходяща орбита в 8:56 ч.

За да сравним изображенията на PRISMA и Sentinel-2, конструираме цветни RGB (Red-Green-Blue) композити, показани на фигура 3.1. Каналите на Sentinel-2 за композита са R: 665 nm, G: 560 nm, B: 492 nm, а за композита на PRISMA R: 660,2894 nm, B: 562,759 nm, G: 492,7201 nm. Каналите в двата RGB композита са избрани така, че да са възможно най-близки, като се имат предвид характеристиките на сензора.

И на двете изображения можем да определим визуално четири типа вода: лагуни, устия на реки и потоци, мътни крайбрежни води и оптично чисти морски води на



Фигура 3.2: RGB композити на PRISMA (ляво) и Sentinel-2 (дясно) с 15-те точки за които определяме профили на отражението. Точки 1-8 са речни и мътни крайбрежни води, а точки 9-15 са оптически чисти морски води.

макс. 28 км разстояние от бреговата ивица.

Първият тип са сравнително мътните води в крайбрежните лагуни (отбелязани с бял номер 1 на фигура 3.1). Това са плитки соленоводни басейни със средна дълбочина 1-1,5 м, отделени от Черно море чрез пясъчни ивици.

Вторият тип води са речните: наблюдават се шест реки и устия на потоци (отбелязани с червен номер 2 на фигура 3.1). Вливащите се речни потоци са добре смесени и изглеждат с по-високи концентрации на седименти. По отношение на намалената си соленост те са подобни на лагунния тип вода, но разликата е в движението - лагунната вода е застояла.

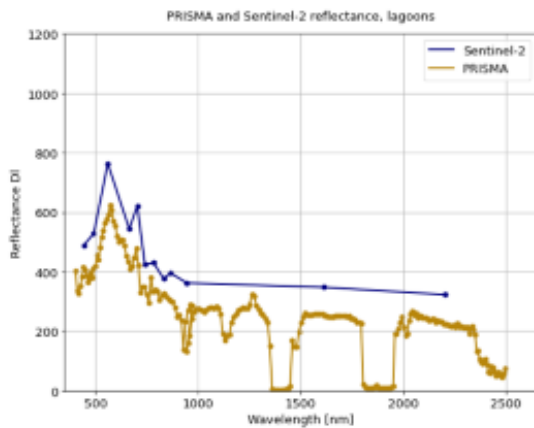
Крайбрежният тип включва оптично комплексна и мътна вода с повишена концентрация на седименти (розов номер 3 на фигура 3.1).

Типът чиста морска вода може да се наблюдава на разстояние от около 8 до 28 км от бреговата линия и се характеризира с ниска мътност и оптично чисти сини води (жълт номер 4 на фигура 3.1).

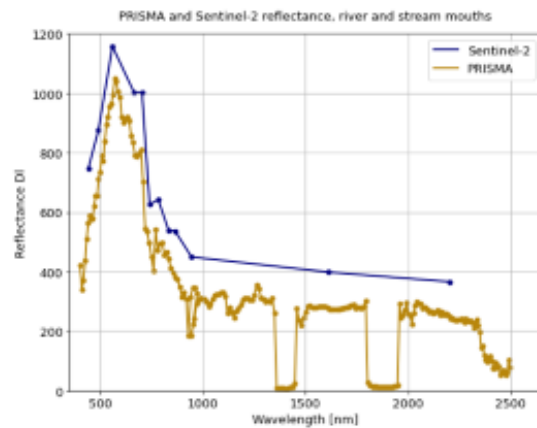
Следващата стъпка е да установим как се променя типът на водата от брега към открито море и докъде се простират водите със земен произход. Сравняваме спектрите на отражение, измерени от Sentinel-2 и PRISMA за 15 точки, разположени на различно разстояние от брега, като се започне от устието на река Новостамбулске и се стигне до оптически чисти води на 25 км от бреговата линия. Това е илюстрирано на фигура 3.2. Всеки представен спектър дава осреднения спектър на 9 пиксела около всяка точка на фигура 3.2. Точките са избрани така, че всичките 9 пиксела да са безоблачни. По време на подбора са направени малки промени в местоположението, за да се гарантира, че избраната област е представителна.

Изследвайки спектрите в тези точки, ние целим да определим по-точно различните

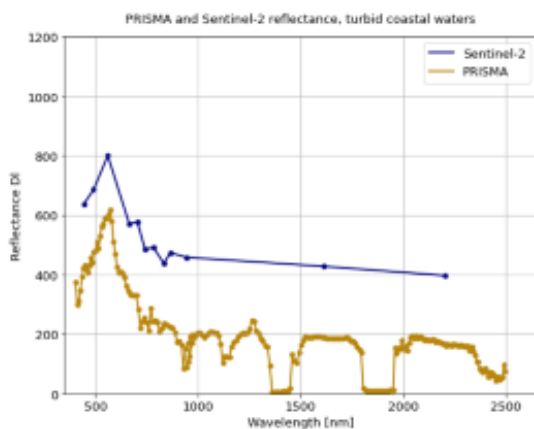
a: Lagoons



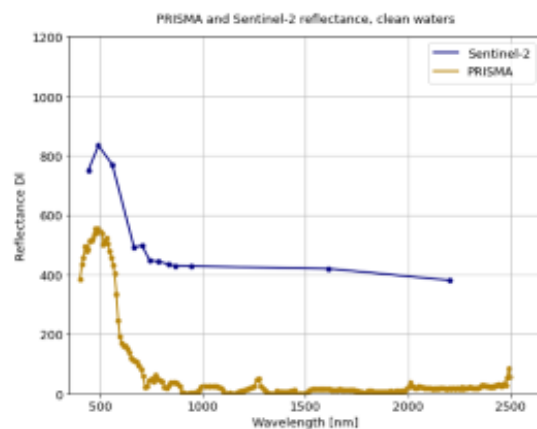
b: River and stream mouths



c: Coastal waters



d: Clean waters



Фигура 3.3: Спектри на отражение от Sentinel-2 (синьо) и PRISMA (жълто) за четирите предварително определени области на интерес - а: лагуни, б: устия на реки, с: крайбрежни мътни води, д: оптично чисти морски води. Фигура от [54].

видове вода в региона, като визуално проследим промяната на спетъра на отражение с увеличаващо се разстояние от брега. Освен това демонстрираме, че с малко предварителна обработка на наличните хиперспектрални данни и без изчисляване на вторични параметри за качеството на водата може да се извлече информация за характеристиките на водата в региона от интерес.

3.2 Характерни спектри на отражението

На фигура 3.3 са показани характерните спектри на отражение на Sentinel-2 (синьо) и PRISMA (жълто) за всеки от четирите предварително дефинирани региона: лагуни, устия на реки и потоци, мътни крайбрежни води и оптично чисти морски води. Характерните спектри за тези 4 типа води са определени и за двете мисии - мултиспектралната Sentinel-2 и хиперспектралната PRISMA. Те са получени чрез осредня-

ване на спектрите на значителен брой пиксели във всеки регион. Броят на пикселите за осредняване се избира в зависимост от размера на областта, която трябва да представлява, а пикселите, даващи аномални стойности, се изключват от осредняването. Четирите графики на фигурата 3.3 показват, че за всички типове вода спектрите от Sentinel-2 имат по-високи стойности на отражение в сравнение с тези от PRISMA. Въпреки това и двата спектъра достигат пик в една и съща област на дължината на вълната (~ 600 nm). Отклонението между двата спектъра може да се обясни отчасти с различната атмосферна корекция, приложена върху продуктите.

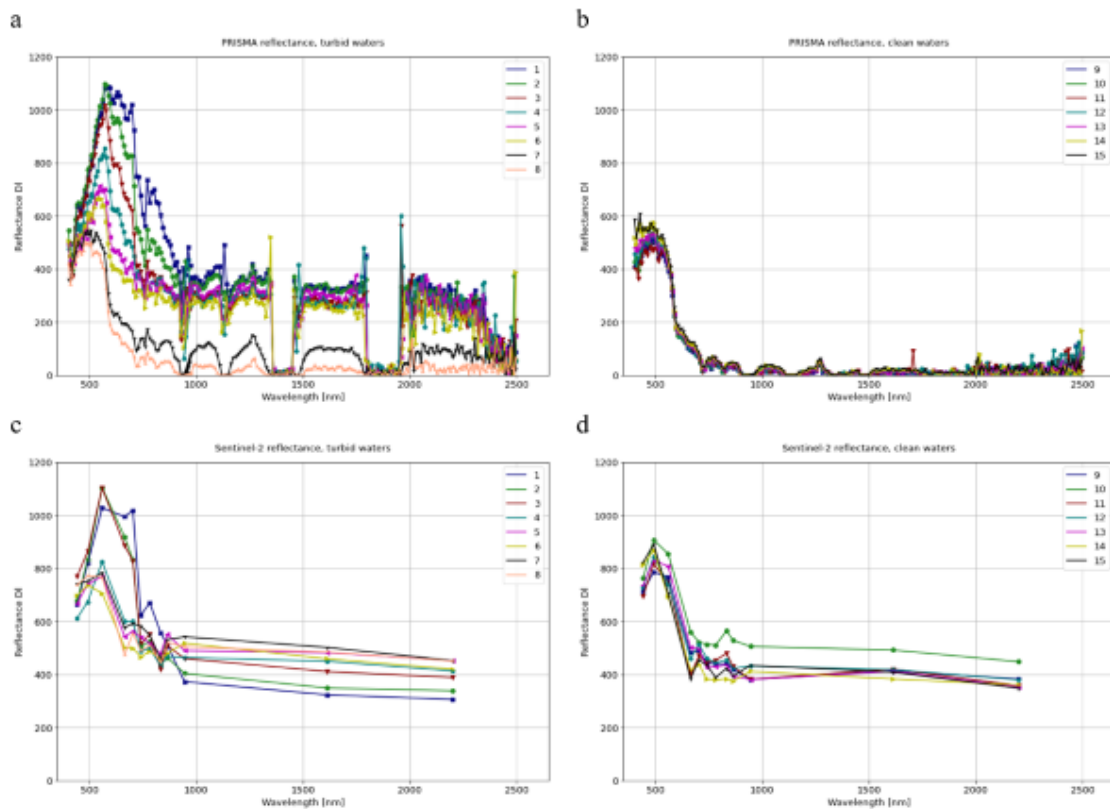
В късовълновия видим диапазон спектрите на отражение от двата сензора са подобни, но в ИЧ спектър, където Sentinel-2 има само два канала, спектърът на PRISMA дава съществена допълнителна информация. Много ясно се виждат абсорбционните канали на водната пара между 1360-1450 nm (абсорбционните канали на перестите облаци) и 1810-1950 nm, където интензитетът на отражение във всички фигури пада до нула. Виждат се и локалните минимума при 930-950 nm и 1120-1150 nm.

Спадането на отражателната способност във VNIR и SWIR за района на оптично чистата вода съответства на предишни измервания на морски и крайбрежни води [55], които показват силно поглъщане на водата в дълговълновия диапазон. За води, характеризирани се с повишена мътност и концентрация на оптично активни компоненти, VNIR и SWIR спектрите са по-информативни за определяне на типа вода. SWIR диапазонът може да се използва за определяне на промени в спектъра при цъфтеж на водорасли и при охарактеризиране на мътни региони.

По отношение на спектрите на Sentinel-2 се вижда, че четирите различни типа вода не показват толкова големи различия помежду си, колкото тези на PRISMA. Спектрите на Sentinel-2 са информативни за особеностите на четирите различни типа, но само във видимия диапазон на дължината на вълната до канал 8A, която дава тесен NIR диапазон. До този канал кривите показват същото общо разпространение, което се вижда и от спектрите на PRISMA. В SWIR те не съвпадат с мащаба на стойностите от PRISMA. Видът на вода и мътността изглежда не оказват влияние върху спектрите на отражение на Sentinel-2 в дългите вълни и по тях не могат бъдат разграничени повърхностни признаци. В този контекст мултиспектралните данни от Sentinel-2 са важни за изчисляването на вторични параметри за качеството на водата като концентрация на хлорофил, мътност и CDOM, но е трудно анализът да се основава единствено на спектрите на отражение.

3.3 Профил на спектрите на отражение

В този параграф изучаваме възможностите за идентифициране на различни типове вода от бреговата линия до открито море и обсъждаме разликите между хипер- и мултиспектралните изображения.



Фигура 3.4: Спектри на отражение за 15-те точки, показани на фигура 3.2а. (а): PRISMA речни и мътни крайбрежни води (точки 1-8); (б): PRISMA чисти морски води (точки 9-15); (с): Sentinel-2 речни и мътни крайбрежни води (точки 1-8); (д): Sentinel-2 чисти морски води (точки 9-15). Фигура от [54].

На фигура 3.4 са показани спектрите на отражение в 15-те точки показани на фигура 3.2 (а) за двата инструмента, като всеки спектър е представен с различен цвят. За по-добра визуализация спектрите са разделени на две фигури: точките от 1 до 8 съответстват на речните и по-мътните крайбрежни води, представени на фигура 3.4 (а) (PRISMA) и 3.4 (с) (Sentinel-2); точките от 9 до 15 съответстват на оптично чисти морски води, показани на фигура 3.4 (б) (PRISMA) и 3.4 (д) (Sentinel-2). Това разделяне прави анализа по-ясен.

Първото нещо, което трябва да се отбележи, е, че спектрите на PRISMA в 15-те точки са доста различни един от друг и ясно се групират в три характерни модела. За разлика от тях спектрите на Sentinel-2 не се различават съществено. Това е категорично доказателство, че хиперспектралното изображение дава повече възможности за категоризиране на типа вода.

Спектрите на отразяване на инструмента PRISMA за речните и мътните крайбрежни райони разкриват много сходно разпределение до точка 6, като отразяването постепенно намалява. Разделянето се вижда най-добре в областта на дължината на вълната от зеления максимум на отражение при 550-570 nm до прозореца на поглъ-

щане от водни пари при 940 nm. За тази област ясно се разпознава максимумът на отражение за точката, разположена в устието на реката, и постепенното намаляване, отдалечавайки се от нея. Последните две точки от фигура 3.4 (а) разкриват спектри на отражение, по-типични за оптично чистите води, като точка 7 е преходна между двата типа води.

Фигура 3.4 (b) показва спектрите на отражение от PRISMA за оптично чисти води (точки 9-15). Може да се заключи, че областите на чиста морска вода имат много сходни спектри и не може да се направи допълнителна спецификация на типа вода, особено за дължините на вълните NIR и SWIR.

Фигура 3.4 (c) и (d) са дадени спектрите на отражение на Sentinel-2 за точките от интерес. Те отново са разделени на две фигури, като спектрите от устието на реката и мътните води са показани на фигура 3.4 (c). Цветовото кодиране е същото като при спектрите от PRISMA. Първите три графика, съответстващи на района на речното устие, са отделени от останалите с повишената си отражателна способност. Останалите точки имат като цяло по-ниски стойности, но не може да се определи последователна зависимост между разстоянието от брега и интензивността на отражение.

Спектрите на точки 9-15 от Sentinel-2, разположени в чисти води, са представени по аналогичен начин. Техният интензитет на отражение е отчасти по-висок от този на точките в мътни речни води и не се забелязва разделение между регионите. Тези резултати са в контраст със спектрите от PRISMA, където може да се види добре различимо разделение между мътни и оптично чисти води.

Повишената отражателна способност в мътните и речните райони може да се отнесе към наличието на оптично активни частици със силна абсорбция в целия диапазон на дължината на вълната от 400 до 2500 nm. С отдалечаване от брега и съответно намаляването на ефекта на речния вток върху морските води се наблюдава намален интензитет на отражение, по което може да се разграничат различните видове води - речни потоци и такива с по-ниска мътност.

Глава 4

Използване на мултиспектрални спътникови данни за Черно море за детектиране на речни води и зауствания на отпадни води в българския крайбрежен район

Тази глава е посветена на разработването на методология за откриване на отпадни води, които се изхвърлят в крайбрежната зона на Черно море, използвайки мултиспектрални изображения. Имайки предвид малкия мащаб на събитията, свързани с изхвърлянето на отпадни води, и значителното влияние на локалните метеорологични условия, е полезно изследването да се разшири към водни струи с подобни характеристики като отпадната вода. Такива са например речните води. Те имат много общи характеристики с пречистените и отпадните води, както ще бъде разгледано по-долу.

Методологията на това изследване е интересна и в контекста на предишната глава 3, където анализирахме спектрите на отражение от хиперспектрални данни, за да разграничим между различни видове води. Тук тази идея е доразвита, изчислявайки коефициентите на поглъщане от мултиспектрални изображения от Sentinel-2.

4.1 Оптични характеристики на отпадни води

Очаква се и двете струи - от речни и непречистени отпадни води - да изглеждат по сходен начин на оптични изображения. Те са с по-висока мътност в сравнение със заобикалящите ги води на морския шелф и са основните източници на хранителни вещества в морето. Речният вток пренася вещества от селскостопански полета и

ферми, емисии от превозни средства и заустени пречистени отпадни води. В същото време характерни за непречистените отпадни води са повишените концентрации на азот и фосфор, идващи от човешки отпадъци, храни и някои видове детергенти. Тези хранителни вещества попаднали в морето могат да причинят появата на органични вещества, нетипични за морската среда. Високата концентрация на седименти и ниската соленост в сравнение с морската вода в двата сухоземни източника е друга обща характеристика. Пречистените отпадни води са пресни в сравнение с околната морска вода и би трябвало да са с ниско съдържание на хранителни вещества и концентрация на седименти.

В предишни изследвания за мониторинг на отпадни води, речни устия и дъждовни води се използват данни за концентрация на хлорофил, мътност, абсорбция на тотално суспендирано вещество и цветно разтворено органично вещество, извлечени от алгоритми за оптични спътникови данни [56–60]. Тези проучвания анализират аномалии в концентрацията и използват допълнителни *in situ* данни за валидиране. Някои автори проследяват нормализираното излъчване над водната повърхност и лъчението излизащо от водната повърхност и детектирано от спътници (normalized water-leaving radiance и remote sensing reflectance), избягвайки да работят с концентрации [61–63]. Дъждовните води и речният вток са пресни в сравнение с морските води и често са с по-ниска температура, така че промените в повърхностната температура и солеността са показателни за такива водни маси [56, 57, 60]. Заглаждането на грапавостта на морската повърхност, наблюдавано на SAR изображения, може да се използва и за визуализиране оттичането на дъждовни води и заустването на отпадни води [56, 58, 64].

В нашето изследване се концентрираме върху оптичните изображения на Sentinel в опит да разграничим различни видове вода. За тази цел определяме преобладаващия им абсорбент сравнявайки фракциите на техните присъщи оптични свойства (IOPs). Това е нова методология, която е особено интересна при изучаване на регион като Западното Черноморие, където обичайните биооптични алгоритми не дават надежни резултати, а *in situ* данните са оскъдни.

4.2 Зона на изследването

В това проучване анализираме абсорбиционните компоненти на IOPs за 84 точки, които са разположени в зоните на заустване на отпадни води, речни устия и на различни разстояния от бреговата линия, достигайки до откритата морска зона на дълбочина на дъното над 2000 m. За изчисленията на IOPs анализираме всички Sentinel-2 изображения за три години от 2017 до 2019 г. с облачност по-малка от 20 %. Това са общо 881 изображения, които обработваме с процесора Case-2 Regional Coast Colour (C2RCC), внедрен в платформата SNAP (Sentinel Application Platform).

Предвид значителния обем данни използвахме виртуална машина за изчисленията, която беше предоставена от ESA Grid Processing on Demand – ESA G-POD [65].

Анализирането на IOPs е логичен избор, тъй като те са главният резултат от изчисленията на процесора C2RCC и са по-малко податливи на грешки, идващи от неточности в параметрите в изчислителния алгоритъм [34].

За да можем да проследим разликите между двата вида наземни източници и да видим как те се променят с увеличаване разстоянието от бреговата линия и дълбочината на морето, изследваме техните IOPs и ги сравняваме с тези на вътрешните водни точки. Точките във водата са разположени на морската повърхност, далече от бреговата линия, на различна дълбочина. Сравнението на тези зони дава възможност да се разберат характеристиките на всяка една от тях и да се види как те се променят в зависимост от морската дълбочина и наземния им източник.

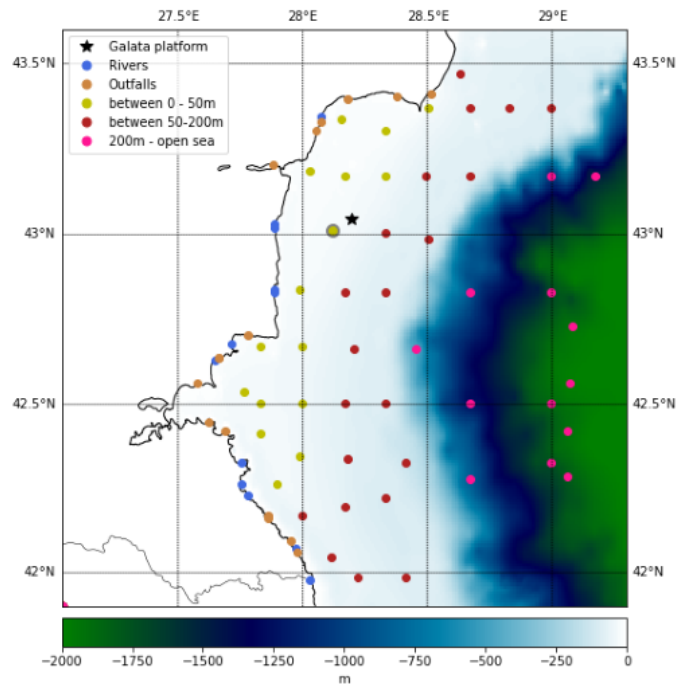
Районът на изследване обхваща българското крайбрежие до открито море. IOPs са изчислени за кръгови полигони, позиционирани в устията на реки, в районите на заустване на отпадни води и на морската повърхност на откритоморски точки, избрани на различни дълбочини и разстояние от брега (фигура 4.1). Повърхността на полигоните, свързани със наземни източници, е приблизително 30 000 m², а повърхността на полигоните във водата е приблизително 170 000 m². Разстоянието между полигоните е от порядъка на 20 km.

Изборът на координати и разпределението на точките за това изследване е направен, както следва: 1) за групата с наземни източници са определени позициите на устията на основните реки, вливащи се в Черно море, както и точното местоположение на пречиствателните станции за отпадни води, разположени на морския бряг; 2) точките, свързани с речни източници, са разположени на около 200 m от бреговата линия, за да се гарантира, че всички анализирани пиксели са водни пиксели; 3) точките, свързани с отпадни води, са разположени на около 100-150 m от бреговата линия, в района, където пречиствателната станция изхвърля пречистените отпадни води.

Точките навътре в морето са разположени на повърхността, далече от бреговата линия, и са групирани според съответната дълбочина на морето. Целта е да се види как батиметрията (напр. промяната в циркулацията на водата), както и разстоянието от брега, влияят върху промяната на IOPs. Трите откритоморски групи са 0-50 m (с изключение на точките, разположени на сушата); 50-200 m и от 200 m до зони в открито море с дълбочина до 2000 m. Местоположението на изследваните точки е показано заедно с батиметрията на региона на фигура 4.1.

Фиксирани са общо 84 полигона, разпределени в равномерна мрежа върху морската повърхност. Полигоните са групирани в пет групи. Първите две групи представляват всички полигони свързани с наземни източници (сини и оранжеви точки на фигура 4.1). Те включват:

- Група 1 – 12 полигона в устията на реките;



Фигура 4.1: Батиметрия на изследвания район с групиране на обектите според вида на наземния източник и дълбочината. Всяка точка представлява площ от 30 000 m² за речните устия и отпадните води и 170 000 m² за откритоморските точки. С черната звезда са отбелязани координатите на платформата Галата AERONET-OC. Фигура от [66]

- Група 2 – 15 полигона в непосредствена близост до известни пречиствателни станции за отпадни води.

Останалите три групи съдържат 57 полигона във водата, разположени на морската повърхност (жълти, червени и розови точки на фигура 4.1). Тези полигони са групирани в зависимост от дълбочината на дъното; по този начин влиянието на крайбрежните води/речния вток отслабва с отдалечаване от брега. Повърхностната циркулация на открито Черно море се характеризира със силно крайбрежно течение [67], следващо тесния континентален склон, което ограничава обмена на вода и материал между крайбрежната зона и откритото Черно море.

Трите вътрешни групи са следните:

- Група 3 – 17 полигона с дълбочина на морето до 50 м; жълти точки на фигура 4.1;
- Група 4 – 24 полигона с дълбочина на морето между 50 и 200 м; червени точки на фигура 4.1;
- Група 5 – 16 полигона с дълбочина на морето между 200 и 2000 m (открито море); розови точки на фигура 4.1.

Данните за батиметрията са взети от Общата батиметрична карта на океаните (GEBCO) [68] с разделителна способност 30 arcsec.

За да се получи представителна дълга времева серия, данните за IOPs са изчислени за всеки пиксел на полигона на изследваните обекти, за всички налични дати. За съжаление, поради локална облачност, не всички области имат еднакъв брой измервания през годините.

4.3 Извличане на присъщите оптични свойства (IOPs) и променливи, използвани в анализа

Променливите, анализирани и представени в настоящото изследване, са получени от трите коефициента на поглъщане на присъщите оптични св-ва на водата (IOPs): абсорбция от фитопланктонен пигмент a_{pig} , абсорбция от детрит a_{det} и абсорбция от цветно разтворено органично вещество a_{CDOM} . Анализът на абсолютните стойности на тези коефициенти не е добър избор, когато се опитваме да охарактеризираме оптичните свойства на водата за даден район. Вместо това е по-подходящо да използваме процентния дял на всяка от трите променливи в общата сума a_{pig}/a_{tot} , a_{det}/a_{tot} , a_{CDOM}/a_{tot} и да анализираме процентния им принос към общата абсорбция $a_{tot} = a_{pig} + a_{det} + a_{CDOM}$. Това позволява да се определи преобладаващият абсорбент за дадена област и неговото изменение във времето.

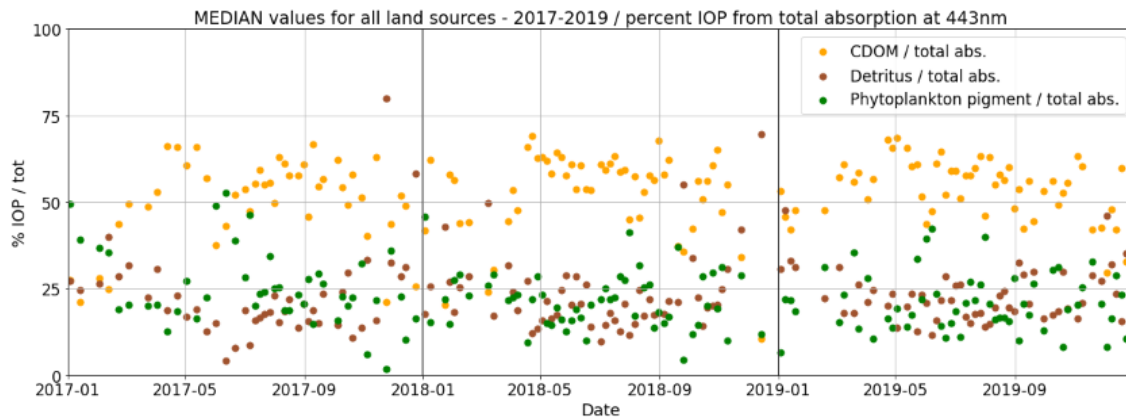
Друга полза от анализа на фракциите на коефициентите на поглъщане на IOPs към общата абсорбция е, че можем да намалим влиянието на неточности в емпиричния алгоритъм. Работата с концентрации, получени от спътникови данни за откриване на замърсяване се нуждае от набор от in situ данни, за да се валидират резултатите и да се подкрепят заключенията.

Тук решаваме този проблем като взимаме главните резултати от изчисленията на алгоритъма и пресмятаме фракцията на всяка стойност към общата абсорбция.

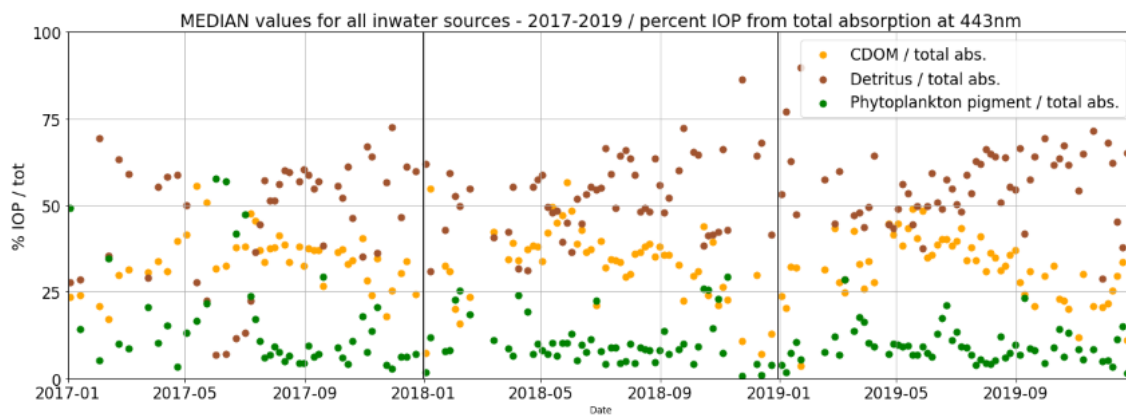
Получените данни са верифицирани спрямо in-situ данни от платформата на AERONET-OS Галата [69], разположена на 23 км от бреговата линия югоизточно от Варна [66], както е показано на фигура 4.1.

4.4 Анализ на фракциите на IOPs

Представен е процентният принос на трите фракции на IOPs към общата абсорбция, като е изчислен за всеки от 84-те полигона за всички безоблачни изображения в периода 2017-2019 г. Пресметнатата е медианната стойност за всеки полигон и резултатите са подредени според петте групи (две групи от наземни източници и три откритоморски групи), описани в раздел 4.2.



(a)



(b)

Фигура 4.2: Времени ред на процентния принос на всяка фракция на IOP към общата абсорбция при 443 nm (CDOM – жълто, детрит – кафяво, фитопланктонен пигмент – зелено); а) медианни стойности на всички речни точки и тези, които са свързани с отпадни води (групи 1 и 2); б) медианната стойност на всички откритоморски точки, за всички морски дълбочини (групи 3, 4 и 5).

4.4.1 Времени редове от дневните стойности на IOPs през 2017-2019 г.

Графиката 4.2 (а) показва медианни стойности на полигоните с наземните източници – реки (група 1) и оттоци (група 2); (б) показва откритоморските полигоните (групи 3, 4 и 5).

Преобладаващият абсорбент за наземните групи на фигура (а) е CDOM, който допринася за над 50% от общата абсорбция за времето от края на март до средата/края на декември за всички години. Детритите и фитопланктонът споделят подобна част от останалата абсорбция, варираща около 20-30%. Промяната в процентното участие на детрит или фитопланктон се компенсира между тях, а CDOM запазва високите си стойности.

Наблюдаваните времеви колебания са малки. И през трите години зимният период от края на декември до началото на март се характеризира с постепенно намаляване на абсорбцията на CDOM до 25 – 30% и увеличаване на абсорбцията на детрита и фитопланктонния пигмент до над 30%. В началото на летния сезон през 2017 г. е установен интензивен цъфтеж на фитопланктон [70], с рязко повишаване на пигмента на фитопланктон, минимална стойност за детрита и малко намаляване на абсорбцията на CDOM. Подобно събитие, но с по-малка интензивност, може да се наблюдава и през 2019 г. През 2018 г. не се наблюдават ясни индикации за събитие, свързано с цъфтеж.

Времевите редове на откритоморските групи са показани на фигура 4.2 (b). Преобладаващият абсорбент за тях е детритът, който допринася за около 50-60% от общата абсорбция при 443 nm, следван от CDOM с 30-40%. Абсорбцията на фитопланктонния пигмент е най-ниска, с по-малко от 20%.

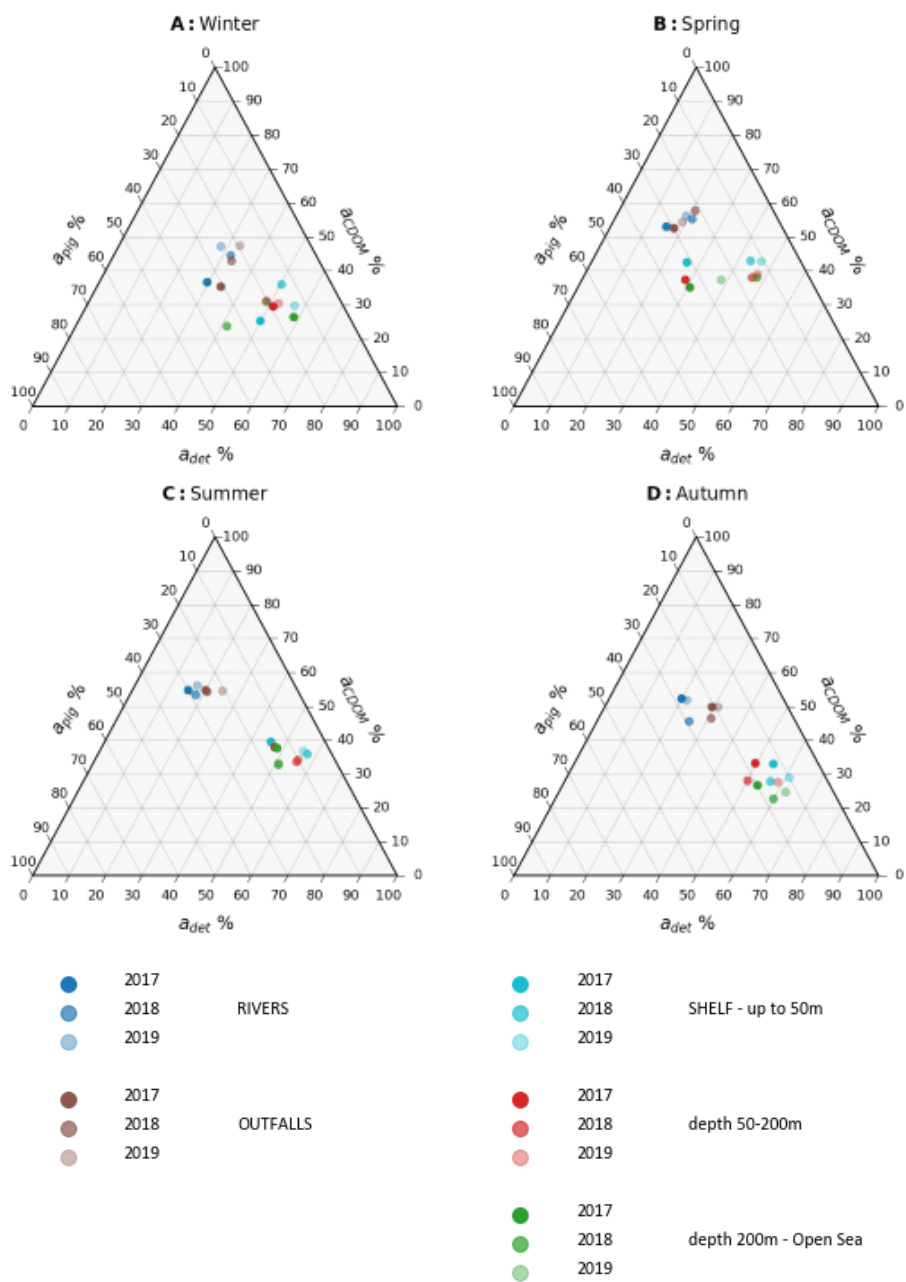
Това поведение се променя през периода на цъфтеж на фитопланктон, както при групите свързани с наземен източник. През ранния летен период се наблюдава пик във фракцията на фитопланктонен пигментнат, който се компенсират основно от намалена фракция на детрит. Фракцията на CDOM показва малко намаление. Цъфтежът е регистриран с най-силен интензитет през 2017 г., а през 2019 г. се наблюдава друг цъфтеж със значително по-нисък интензитет. През пролетта/началото на лятото на 2018 г. се наблюдават колебания във фракцията на абсорбция на фитопланктонен пигмент; те обаче не могат да бъдат ясно отнесени към цъфтеж.

4.4.2 Тернарни диаграми на средногодишните стойности

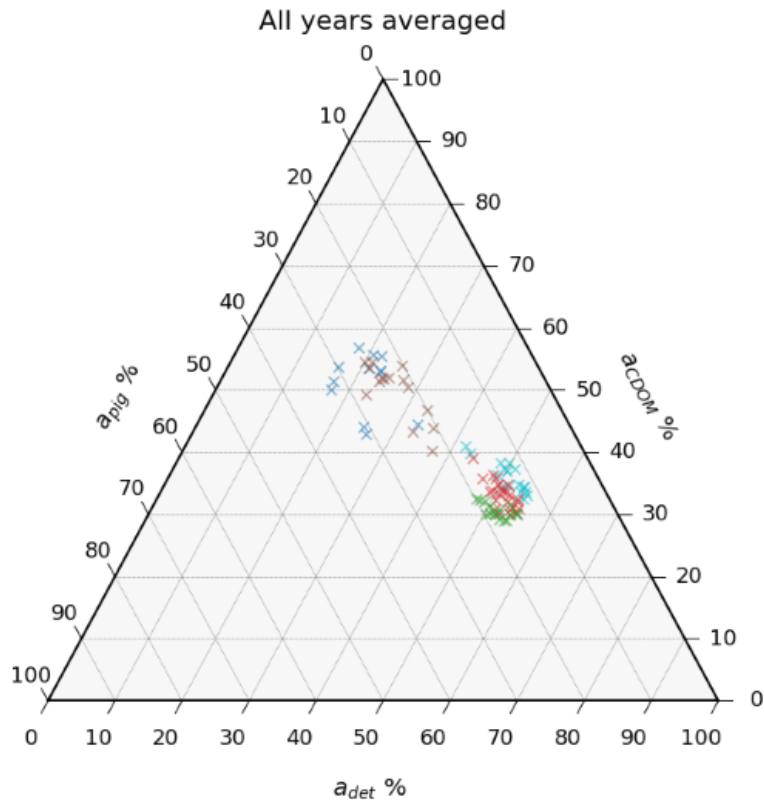
Допълнителни изводи за коефициентите на абсорбция на различните групи могат да се направят, когато резултатите се представят като тройни графики. Тернари графиката показва фракционния принос на CDOM, детрит и фитопланктонен пигмент към общия бюджет на абсорбцията в проценти по три оси. Върху тройните графики не се виждат времевите вариации, но особеностите, свързани с всяка група, стават по-лесно видими.

Фигура 4.3 представя сезонни осреднени стойности от всички дневни стойности. Петте групи са обозначени с цветни кодове, а годините са представени с различен интензитет на цвета. Месеците на осредняване са избрани в съответствие с по-бавното затопляне и охлаждане на водата в сравнение с атмосферата: зима – януари, февруари, март; пролет – април, май, юни; лято – юли, август, септември; есен – октомври, ноември, декември.

На Тернарната диаграма 4.3 точките, свързани с наземни източници, са добре разграничени от откритоморските точки през всички сезони и години. Повишената



Фигура 4.3: Тернарни диаграми на сезонните и годишните средни стойности за всички пет групи. Процентният принос на всеки от трите абсорбера към общата абсорбция при 443 nm е нанесен върху трите оси. Средната стойност на всяка група е нанесена за всяка от годините 2017-2019. В легендата по-долу е даден цветовият код за всяка група и година [66]



Фигура 4.4: Тернарна диаграма на осреднените стойности за трите години за всяка точка от петте изследвани групи. Петте групи са изобразени със същите цветове като на фигура 4.3. Фигура от [66]

абсорбция на CDOM и намаленият принос на детритна фракция ги отличават от морските точки.

През студената част на годината (зимата и пролетта) откритоморските групи показват по-голяма променливост и за трите фракции. Интензивният цъфтеж на фитопланктон през пролетта/лятото на 2017 г. също се разпознава на тази графика. Пикът на цъфтежа е настъпил през юни (фигура 4.3 В: пролет), който се отличава с увеличен пигмент на фитопланктон и намален принос на детрит. За тази година се вижда и постепенното намаляване на CDOM с отдалечаване от брега.

Фигура 4.4 представлява Тернарна диаграма, даваща осреднените стойности на 84-те полигона за трите години. Точките са оцветени в зависимост от тяхната група (същите цветове като на фигура 4.3). Тази фигура ясно илюстрира разликите между петте групи.

Точките от двете групи със сухоземен произход са добре отделени от трите групи във водата според техния увеличен процентен принос на CDOM.

Групи 1 и 2, свързани с реки и пречиствателни станции, дават два разделени кластера, като някои точки в тях се припокриват. Разделителните стойности са главно приносът на CDOM и детрита към общата абсорбция.

На фигура 4.4 ясно се вижда разделението между трите групи във водата - 3, 4

и 5. Те са разделени от приноса на фракцията на фитопланктонен пигмент, който се увеличава с увеличаване на дълбочината на морското дъно. Друга фракция, която зависи от морската дълбочина, е приносът на CDOM. Той намалява с увеличаване на морската дълбочина, макар и с по-бавни темпове в сравнение с пигментната фракция на фитопланктона.

4.5 Обобщение и схема на автоматизирана процедура за класификация на типовете води

Една от основните констатации в нашия анализ е преобладаващият абсорбер CDOM във водите, свързани с наземни източници. Характерно за речните води е повишената им мътност и концентрация на хранителни вещества. Частици, отделени от речното корито и от ерозия на почвата, правят речните води по-мътни и при оттичане в морска среда техната струя се вижда със специфичен кафяв, жълтеникав цвят на изображения. Седиментите съдържат оптически активни абсорбери, които увеличават фракцията на CDOM към общата абсорбция в крайбрежния регион. Този механизъм е възможно обяснение на нашите резултати, показващи повишени стойности на CDOM за всички точки с произход от сушата.

Цъфтежът на фитопланктон, установен в периода от късна пролет до лятото на 2017 г. и пролетта на 2019 г., се характеризира с пик във фракцията на фитопланктонен пигмент и минимум за детрит. Този цъфтеж е детектиран също и от Cazzaniga et al. [70]. Цъфтежът е наблюдаван с подобна интензивност и в откритоморските зони с подобни вариации във фракцията на абсорбция на фитопланктон и детрит. Следователно приносът на CDOM фракцията към общата абсорбция през този период леко намалява в цялата област на изследване.

Анализът, описан в глава 4.4, ни позволява да охарактеризираме различни типове вода и на тази основа можем да очертаем схема на автоматизирана процедура за разграничаване на точки, свързани с наземни източници от откритоморските такива. В [66] и в дисертацията е представена диаграмата на работния процес, в която са посочени необходимите стъпки за класификация. Процедурата може да се повтори в няколко итерации, за да се достигне до по-малки пространствени мащаби и да се идентифицира по-добре сигналът на отпадните води.

Глава 5

Използване на радарни спътникови данни SAR за Черно море за откриване на нефтени замърсявания в западните крайбрежни райони

5.1 Проверка на океанския инструмент SNAP за откриване на нефтени разливи за района на Западното Черноморие

В тази глава спътниковите данни от Sentinel-1 се обработват със софтуера SNAP (Sentinel Application Platform) с цел да се тества функционалността на океанския инструмент SNAP за откриване на нефтени разливи. Инструментът е приложен върху спътникови изображения, за да се сравнят случаите на наличен нефтен разлив и чисто море. Наблюдават се различни случаи на структури "двойници" и се анализира функционалността на алгоритъма, приложен в инструмента за откриване на нефтени разливи.

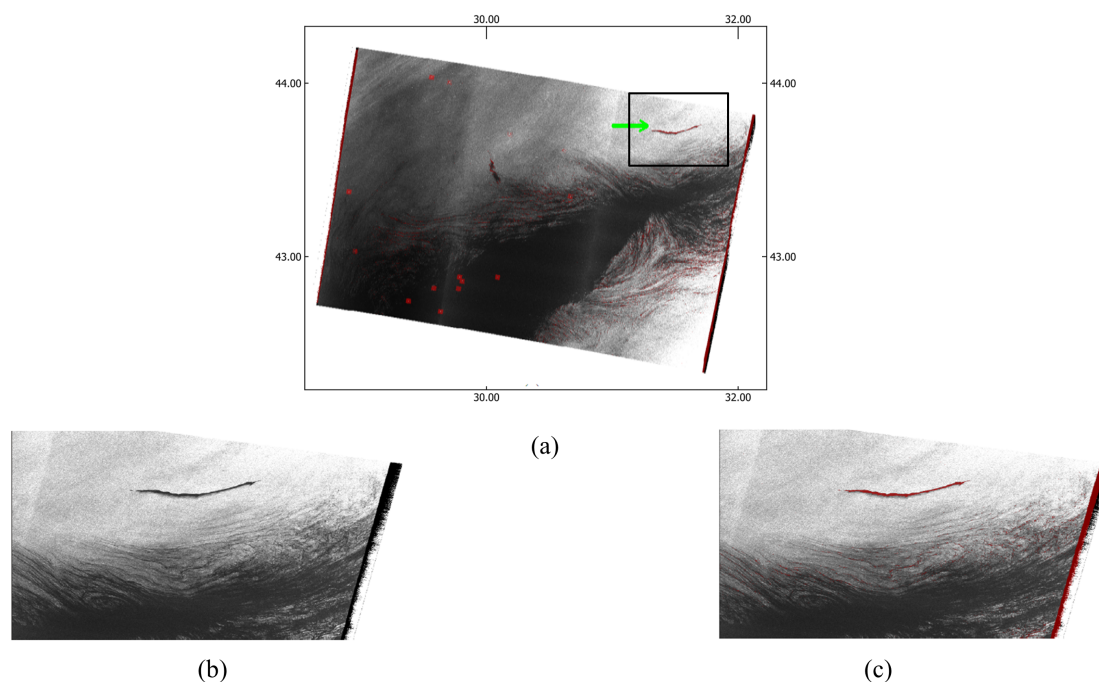
За целите на това проучване 25 SAR изображения на западната част на Черно море са визуално анализирани за наличие на нефтено замърсяване и са обработени с океанския инструмент на SNAP за откриване на нефтени разливи. На 15 от тези изображения са открити тъмни структури, показващи възможни нефтени разливи. За тях е приложен инструментът SNAP и тук е представен един случай с цел онагледяване на метода. За всяко изображение параметрите на алгоритъма за размер на клъстера и праговата стойност са избрани и оптимизирани поотделно.

Резултатът, получен от инструмента за откриване на нефтени разливи SNAP, е маска, която показва всички области, които могат да включват потенциално нефтено замърсяване. Тези области не са били обект на класификация.

На представеното изображение маската за откриване на нефтени разливи (в червено) е наслоена върху оригиналното предварително обработено изображение и областите,

открити от програмата като разливи, се виждат като червени области върху наслоеното изображение.

Ефективността на инструмента за откриване на нефтени разливи SNAP се оценява според припокриването на маската с видимите тъмни структури по повърхността. Колкото по-точно структурата е покрита от маската и колкото по-малко структури двойници в близост до нея са открити, толкова по-добра е производителността на инструмента.



Фигура 5.1: Фигура (a) представлява цялото SAR изображение, фигура (b) е част от изображението без маската за нефтени разливи, а (c) представлява същата част от изображението с маска. Открита е тъмна структура със значителен размер и характерна форма, различна от другите структури в заобикалящата я среда. Маската за откриване на нефтени разливи покрива добре тъмното петно, но други тънки подобни структури "двойници" в близост до по-светлия фон също се детектират. Открити са някои кораби, но всички те са далече от зоната на разлива. Датата на заснемане е 13.6.2017 г., приблизителна дължина 40 km, приблизителна покрита площ 21 km². Графика от [71].

Проучените тестови случаи, представени тук и в [71], показват цялостно добро представяне на адаптивния прагов алгоритъм, внедрен в океанския инструмент SNAP за откриване на нефтени разливи. Някои структури "двойници", са частично открити като нефт, поради което за проверка на резултатите е необходима допълнителна процедура за класификация или визуална проверка от оператор.

Намирането на подходящ размер на клъстера и прагова стойност за малки разливи е трудоемък процес. Освен това детектирането на нефт непосредствено до бреговата линия е свързано с неточности с много погрешно детектирани структури "двойни-

ци".

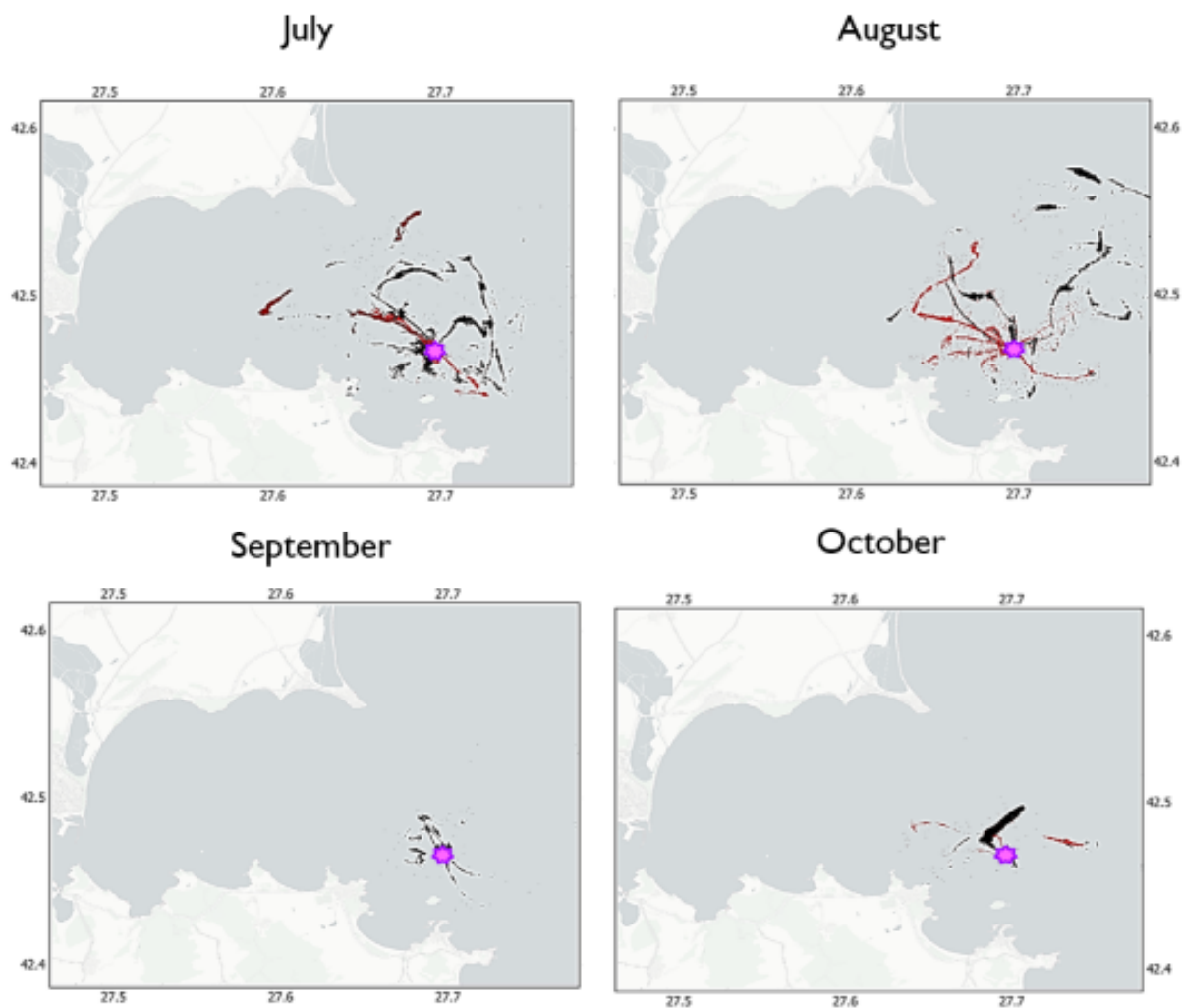
Изследваният алгоритъм на адаптивен праг показва добра ефективност за автоматично детектиране на нефтени разливи при събития със сериозно изтичане на нефт. Малките изпускания се нуждаят от допълнителна класификация от оператор.

5.2 Откриване на нефтени изтичания от потъналия кораб Мопанг с помощта на радарни и оптични сателитни данни от 2017 и 2018 г.

Представеният тук тестови случай е от особен интерес, тъй като се намира в близост до бреговата линия и изпускането на нефт е с малък мащаб. Това прави изпусканията по-трудни за точно откриване.

Показани са нефтени изпускания от кораба Мопанг, потънал през 1921 г. близо до град Созопол на българското крайбрежие. През лятото на 2018 г. част от горивото на двигателя му изтича и достига брега, което привлече значително обществено и медийно внимание. Наличните радарни изображения на Sentinel-1 за засегнатия регион за 2017 и 2018 г. са обработени и анализирани за детектиране на нефт. Анализираме и оптични изображения от Sentinel-2, за да се оцени мащаба на изпускането на нефт. Прилагането на оптични изображения от дистанционни наблюдения за откриване на нефт върху морската повърхност е интересен и нов подход, който осигурява допълнителен източник на данни за откриване на нефт към общоприетия метод, базиран на SAR, [72].

Анализирани са всички налични 496 изображения от Sentinel-1 за 2017 и 2018 г., които покриват района от интерес, за да се разбере обхватът на замърсяването и неговата интензивност. Радарните данни разкриват петна на повечето от изображенията през лятото с различни ориентация и покритие.



Фигура 5.2: Сборни графики на всички детектирани нефтени петна от потъналия кораб Мопанг за месеците юли, август, септември и октомври за 2017 и 2018 г. Детектираните нефтени петна от 2017 г. са нанесени в червено, а от 2018 г. - в черно. Координатите на кораба са обозначени с розова звезда. Графика от [73]

Сборните графики за месеците юли, август, септември и октомври за 2017 и 2018 г. са представени на фигура 5.2. Детектираните нефтени разливи от 2017 г. са нанесени в червено, а тези от 2018 г. - в черно.

От изображенията от останалата част на годината също се детектират структури, които най-вероятно са свързани с Мопанг, но те са видими в ограничен брой дни, разпределени през двете години, без значително натрупване, свързано с определен месец или сезон. Малките оцветени области, които не са групирани с основното петно за откриване, са причинени от фалшиви детекции поради малкия мащаб на изпускането и структури "двойници".

По-голямата част от детекциите, както за 2017 г., така и за 2018 г. са през летните месеци. Това може да се обясни с по-спокойните морски условия, които са благоприятни за това нефтът да остане на повърхността на морето и да не се смеси с

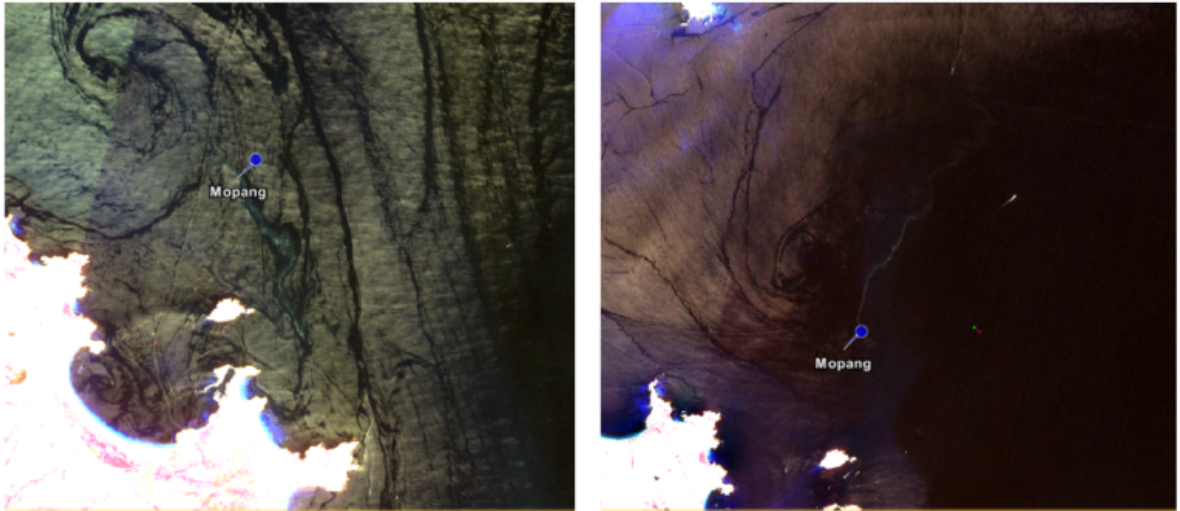
морската вода след излизането си от корабните резервоари. Също така по-топлата морска вода може да е по-благоприятна за изплуването на нефта.

През 2018 г. са регистрирани сходен брой случаи на нефтени изпускания сравнено с 2017 г. В българските медии беше посочено, че част от кораба се е срутила поради възрастта и лошото си състояние в началото на август 2018 г. [74], което е довело до изтичането на нефт, но нашето разследване опровергава това твърдение. Изтичането на нефт е било очевидно през по-голямата част от лятото и през предходната година.

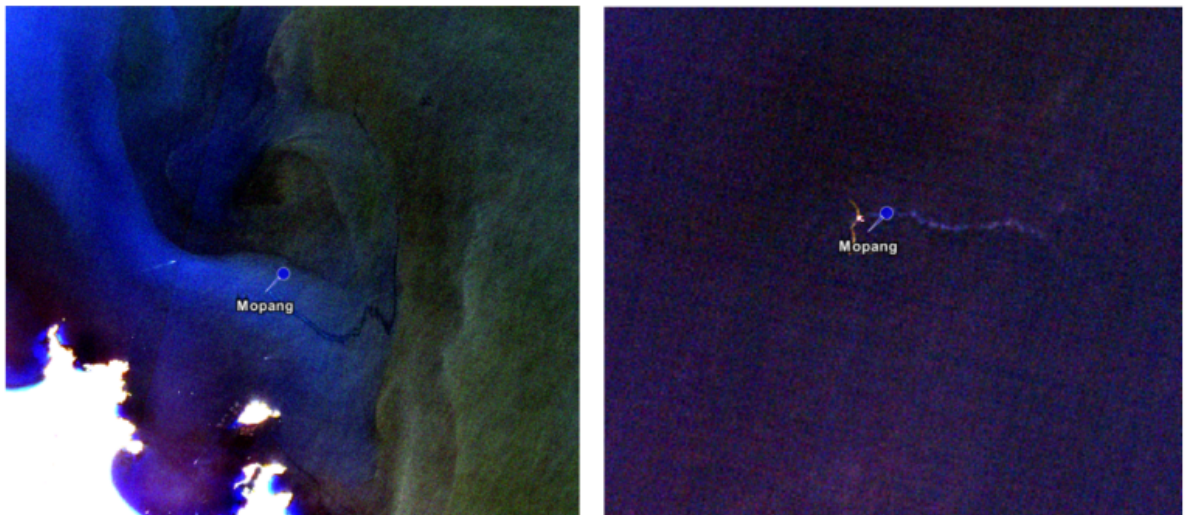
Оптичните данни от Sentinel-2 са представени в композит с канали, Червен: B8 – 785nm-899nm; Зелено: B4 – 650nm-680nm; Син: B3 – 543nm-578nm.

Спътниковите данни във видимия спектър се използват като допълнителен източник с цел по-добро разбиране на мащаба на замърсяването през летните месеци. Преминаването на спътниците Sentinel-1 и 2 е така, че оптичните изображения се заснемат един ден преди или след радарните изображения. Ето защо проверката на наличието на нефт на морската повърхност от два източника на данни, заснети по едно и също време, не е възможна. Освен това много от изображенията за района на потъналия кораб заснети от Sentinel-2 са облачни, което ограничава непрекъснатостта на наблюдението. Въпреки това ограничение видимостта на нефтеното петно през много дни от анализирания период през юни – септември 2018 г. показва значително изпускане на нефт в близост до координатите на Мопанг.

Маслената следа е трудна за идентифициране, дори ако оптичното изображение е без облаци. Поради това данните от Sentinel-2 са единствено допълнителен източник на информация в това проучване. Четири примера са дадени на фигури 5.3 и 5.4: нефтеното петно е видимо и може да бъде определено като нефт, произхождащ от Мопанг, но само ако съществува предварителна информация за наличието на изпускане.



Фигура 5.3: Цветен композит на нефтеното петно, открито на 2. Юли и 6. Август 2018 г. от оптични изображения. Видимостта на петролната следа е подобрена чрез разтягане на хистограмата. Фигура от [73].



Фигура 5.4: Цветен композит на нефтеното петно, открито на 31. Август и 10. Септември 2018 г. от оптични изображения. Видимостта на петролната следа е подобрена чрез разтягане на хистограмата. Графика от [73].

Глава 6

Използване на спътникови изображения за числена симулация на разпространението на нефтени разливи

Предшните глави бяха посветени на методите за идентифициране на води, произхождащи от наземен източник, както и тяхното влияние върху оптичните характеристики от брега към открито море. Целта беше да определим източници на замърсяване, идващи от сушата. Показахме също така, че един друг тип замърсяване, нефтените разливи, се детектират особено добре по спътниковите изображения. В настоящата глава доказваме ползата от използването на спътникови изображения в числените модели за прогноза на разпространението на нефт. Едно от възможните приложения е за подобряване на началното условие: определяне на първоначалната форма на нефтения разлив, която може да бъде снета от изображението. Друг проблем в моделите е параметризирането на дифузията: последователните изображения на нефтеното петно могат да помогнат за калибриране на коефициента на дифузия.

Основен въпрос при симулациите на разпространението на нефтено замърсяване е оценка на въздействието върху крайбрежните зони. Лагранжевите модели дават възможни сценарии и отговарят на този въпрос. Проверката на резултатите обаче е трудна, тъй като не е обичайно да има много изображения на замърсяването в рамките на кратък интервал от време.

В първата част на това изследване използваме опростен Лагранжев модел (с пасивни Лагранжеви частици), за да проследим влиянието на мезомасщабната циркулация върху разпространението на нефтено замърсяване в западната част на Черно море, [75]. Изводите от изследването са полезни, но с ограничено приложение. За по-адекватно описание е необходим по-усъвършенстван модел за симулация на детектирани нефтени изтичания от потъналия кораб Мопанг, [76]. В няколко дни спътниците Sentinel-1 А и Б преминават през района на Мопанг и детектират неф-

тени изпускания сутрин и следобед с интервал 12 часа. Това ни дава чудесната възможност да тестваме моделирането на различни сценарии за нефтени разливи и да проверим резултатите.

6.1 Моделиране на разпространението на нефтени разливи в открито море

За това изследване използваме опростения модел с пасивни Лагранжеви частици, който е описан в глава 2.3. Моделът проследява пасивното разпространение на петролните капки върху морската повърхност и не отчита процесите на потъване и изветряне на нефта.

За тестване на разработения модел използваме случай на детектиран нефт на 13 юни 2017 г., представен на фигура 5.1. Повърхността на замърсяването е приблизително 21 km². Симулираме разсейването на това петно с гранични условия за скоростта и посоката на течението. Методът се основава на разпръскването на случайно разпределени Лагранжеви трасери в рамките на първоначалното петролно петно, които се носят по повърхността, следвайки теченията.

Някои от ограниченията на тази симулация са, че се вземат данни за повърхностните течения, но не и за вятъра и морските вълни, както и че потъването на трасерите не се взема предвид.

Променливата, която оказва най-голямо влияние върху разсейването на замърсяването, е коефициентът на дифузия и в това изследване ние тестваме три различни стойности.

Симулациите са направени с 1500 Лагранжеви трасери, които са изпуснати от началната точка – детектираната тъмна структура, показана на фигура 5.1. Точната позиция на замърсяването – 43.7N, 31.5E, се счита за източник на трасерите. Повърхностните течения са предоставени от числения реанализ на Черно море от Морските услуги на Програма Коперник [44]. Среднодневните стойности на посоката и скоростта на теченията са дискретизирани в хоризонтална мрежа с разделителна способност 1/36° в зонално и 1/27° в меридионално направление.

Резултатите от 10-дневната симулация могат да се видят в [75] и в дисертацията.

Представеният модел разглежда опростено нефтените частици и не отчита потъването им, както и химичните реакции между нефтения продукт и морската вода. В реални морски условия околната среда оказва значително влияние върху изпуснатия нефт и той не може да се разглежда като пасивен трасер. Неговият химичен състав се променя от процеси, като емулгиране, фотоокисление, изпарение, дифузия и седиментация, които след това играят важна роля за крайната форма и площ на разлива.

За да се верифицират представените резултати, са необходими данни за валидиране

от по-късни SAR наблюдения. Проверката на по-късно заснетите изображения на региона не показва следи от нефт или подобни структури на повърхността.

Резултатите от този експеримент са полезни за бърз анализ на прогнозираното разпространение. Използването на по-усъвършенствани Лагранжеви модели, които вземат предвид факторите на околната среда, като вятър, вълни, температура и соленост на водата би довело до по-точни резултати.

6.2 Моделиране на разпространението на нефтени петна от потъналия кораб Мопанг

В тази глава използваме детектираните нефтени изпускания от потъналия кораб Мопанг, които са засечени в един и същи ден – 7 юли 2018 г. в 4 ч. и 16 ч. UTC. Използваме реалните спътникови наблюдения, за да симулираме разпространението на нефт с Лагранжев модел и да верифицираме моделните изчисления. След това оценяваме въздействието върху крайбрежната зона.

Тази работа надгражда предишното ни изследване, в което тествахме модела на Лагранжеви частици OpenDrift за случая Мопанг, [76]. Продължавайки тази работа, използваме нов подобрен числен реанализ на морските течения с по-добра разделителна способност. Друго подобрение е валидирането на резултатите с иновативен метод за сравнение на обекти. След това симулацията е продължена с по-дълъг период, за да оценим замърсяването върху брега.

Моделът OpenDrift позволява прилагането на гранични условия за повърхностните течения и скоростта на вятъра от различни оперативни модели. Освен това той отчита изветрянето на частиците в зависимост от вида на използваното масло.

За първата група симулации тествахме ефекта на различната начална форма на нефтен разлив. Спътниковото изображение помага за определянето ѝ. Подобно на [76] тук избираме една от датите с две детектирани нефтени петна, по време на сутрешното и следобедното прелитане на Sentinel-1, и тествахме три сценария за засяване на трасери: 1) изпускане от форма, като тази от сутрешната детекция; 2) изпускане от точков източник; и 3) непрекъснато изпускане от точков източник за целия период на симулация.

За втората група симулации тествахме чувствителността към параметризацията на дифузията и представяме резултати с три различни коефициенти на дифузия. Моделът се валидира, като се сравнява симулираната форма на облака от трасери и детектирания нефтен разлив; сходството се измерва чрез статистиката на Ху.

След това оставяме всички трасери да се носят по течението, докато не бъдат блокирани, като достигнат морското дъно или бреговата линия. Въз основа на тези резултати можем да преценим коя част от брега е най-силно засегната от замърся-

ване при различните симулационни сценарии и коефициенти на дифузия.

6.2.1 Настройка на модела и гранични условия

В този параграф използваме модула за симулации на нефт на модела OpenDrift [43] за проследяване на движението на нефтени частици, изпуснати от Мопанг. Той включва вградена библиотека с разнообразни видове нефтени продукти и взема предвид някои химични трансформации на нефта. След като експериментирахме с различни видове нефтени продукти, избрахме мазутно гориво, тъй като то е било широко използвано като корабно гориво по времето на потъването на Мопанг.

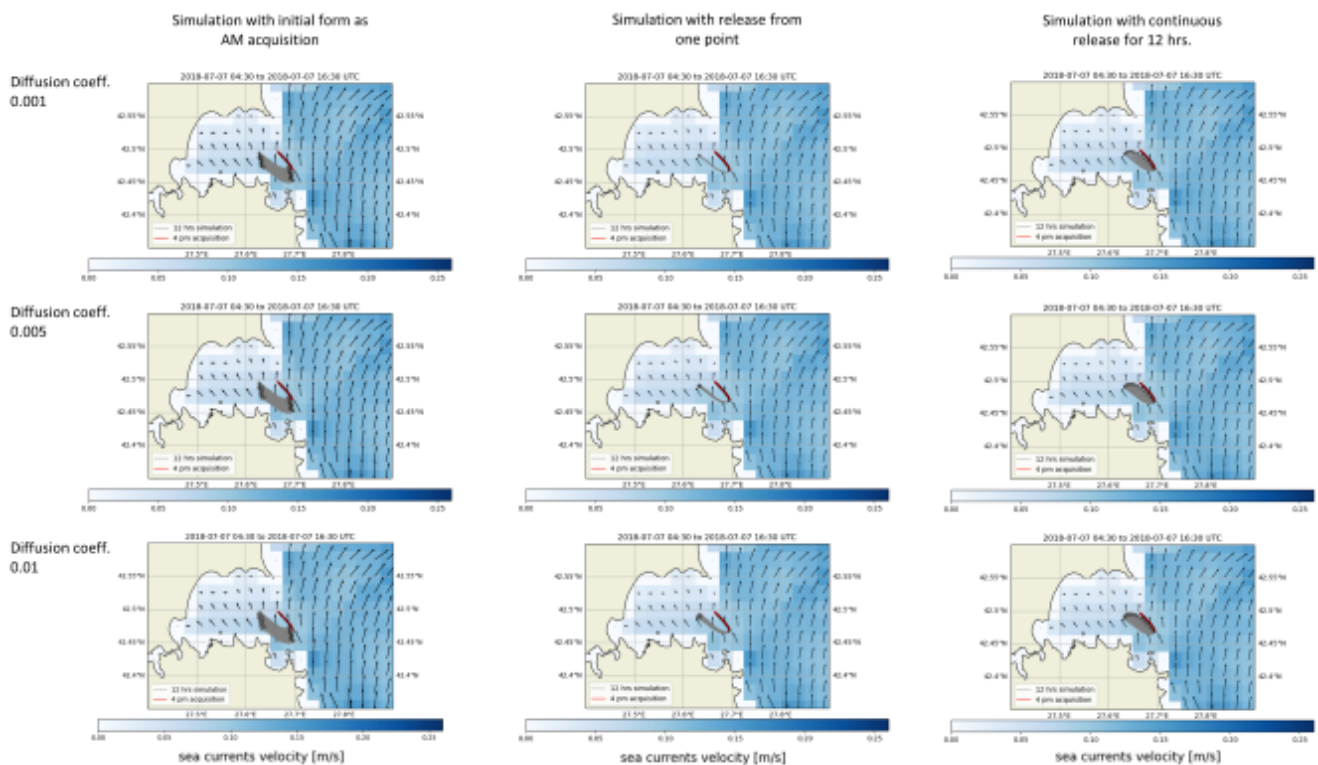
След внимателно проучване на наличните изображения, избрахме снимките на Sentinel-1 от 7 юли 2018 г. в 4 ч. сутринта и 16 ч. следобед UTC за моделни симулациите. Причината е, че и двете детектирани петна са с различна и характерна форма и могат ясно да бъдат свързани с потъналия кораб Мопанг.

Доброто припокриване на формата и позицията на трасери от изчисленията на модела с действителната детекция от спътниковата снимка би доказало достоверността на модела, който използваме за прогнозиране на разпространението на нефт в морската среда за конкретния случай, който наблюдаваме. Оценяваме степента на припокриване, като изчисляваме инвариантите на момента на Ху, както е описано в раздел 2.4.

Направени са три симулации с различни начални сценарии на засяване на трасери и три коефициента на дифузия. Всяка симулация е направена първо в продължение на 12 часа и 300 трасера. При второто пускане всеки от трите сценария е интегриран, докато всички трасери заседнат на морското дъно или достигнат брега. Резултатите от симулацията са илюстрирани заедно с детектираното нефтено петно в следобедните часове, за да може директно да се сравнят визуално резултатите от симулацията с реалните наблюдения. Фонът на графиките показва състоянието на морските течения в края на симулацията.

Данните за метеорологичните условия са едни и същи за всички експерименти. Основният недостатък на процеса е, че разделителната способност на данните за скоростта на повърхностните течения не е достатъчна (2 km), за да се представи адекватно бреговата линия. OpenOil екстраполира стойностите на посоката и скоростта на течението, което обаче не взема предвид местната циркулация и непредсказуемите промени в посоката на течението.

По време на симулационните експерименти тествахме различни настройки за скоростта на смесване на нефта, емулгиране, разливане, изпарение и дифузия. Оказа се, че коефициентът на дифузия оказва най-голямо влияние върху крайната форма. В настоящата работа представяме три различни коефициента на дифузия, за да покажем как тяхната модулация се отразява на крайната форма.



Фигура 6.1: Резултати от трите различни сценария на изпускане на нефт за три различни параметъра на дифузия. Първа колона: засяване в рамките на форма, каквато е детектирана сутринта; втора колона: точково изпускане, трета колона: непрекъснато изпускане на трасери. Трите параметъра на дифузия са показани на редовете: $0,001 \text{ m}^2/\text{s}$ - първи ред, $0,005 \text{ m}^2/\text{s}$ - втори ред, $0,01 \text{ m}^2/\text{s}$ - трети ред.

6.2.2 Тестване на чувствителността към първоначалната форма на нефтения разлив и коефициента на дифузия

Извършени са три симулации с различна начална форма на нефтеното петно: 1) трасерите са засети във формата на нефтеното петно, както е детектирано от сателитната снимка; 2) нефтът се изпуска наведнъж от точков източник; 3) нефтът се изпуска непрекъснато от точков източник от координатите на потъналия кораб. Всеки от трите сценария е представен за три различни параметъра на дифузия: $0,001 \text{ m}^2/\text{s}$, $0,005 \text{ m}^2/\text{s}$ и $0,01 \text{ m}^2/\text{s}$, заедно с петното детектирано в 16:00 ч. на същия ден. Резултатите са представени на фигура 6.1. Тънките сиви линии показват траекторията на всеки трасер.

При първата симулация всички 300 трасера са засети във формата детектирана от спътниковото изображение от 4 часа UTC на 7 юли 2018 г., първата колона на фигура 6.1. Позицията на трасерите след 12-часова симулация сравнена с реалното наблюдение от 16 часа UTC служи като ориентир за точността на симулациите.

Крайната форма при тези симулации наподобява първоначалната, като трасерите са по-разпръснати при по-високи стойности на дифузията. При този сценарий се приема, че след изтичането нефтът се отделя от източника и продължава да се движи с

теченията, като няма повече изтичания от кораба. Втората симулация е направена с точков източник с малък диаметър, който изпуска всички 300 трасера наведнъж в 4 часа UTC на 7 юли 2018 г. Резултатите са показани в средната колона на фигура 6.1 по същия начин за три коефициента на дифузия, заедно със спътниковото заснемане в 4 ч. Трасерите се движат близко един до друг с малко разсейване, като при сценария с по-голяма дифузия те се раздалечават повече. След 12 часа симулация нито един от трасерите не е заседнал на дъното и не е достигнал брега. Този тип изпускане показва значително по-малко разсейване на трасерите. Този сценарий показва най-малко сходства с нефтеното петно детектирано в 16:00 ч UTC.

Третата симулация също е направена с точков източник с малък диаметър, който започва да изпуска трасери в 4 часа сутринта и постепенно освобождава 300 трасера за 12-те часа на симулация. Резултатите за трите коефициента на дифузия са показани в третата колона на фигура 6.1. Облакът от трасери се движи като струя, която произлиза от местоположението на Мопанг. Вижда се, че струята не е непрекъсната, а е на петна. Това се дължи на факта, че времевата разделителна способност на вятъра и теченията, които влизат в числените симулации, е 1 час. По този начин на всеки час се освобождава определено количество трасери, които се образуват като нефтени петна. Ако трасерите се изпускат на по-малък интервал струята би имала по-продълговата форма.

Визуалната проверка показва, че непрекъснатото изтичане на нефт дава резултати, най-близки до реалните наблюдения, но трудно може да се направи заключение относно коефициента на дифузия. Поради това в следващата глава оценяваме резултатите от симулацията качествено чрез статистика на X_u и определяме кои резултати от симулацията имат най-близък вид и форма до детектираното в следоба нефтено петно.

6.2.3 Верификация на модела чрез инварианти на X_u














Имайки предвид сходството на резултатите от трите симулационни сценария, е необходимо да се въведе обективен параметър за оценка на това кои резултати наподобяват най-точно следобедната форма. В глава 2.4 и в [47] са представени теорията на моментите на изображение и математическото представяне на седемте момента на X_u . Те се използват за математическо описание на трансформации на обекти. Тук ние ги използваме за оценка на най-точните сценарии на симулация. Представени са логаритмичната трансформация на седемте инварианта:

$$\Phi_i = -\text{sign}(\phi_i) \log|\phi_i|.$$

Целта на логаритмичното преобразуване е да се приведат стойностите на инвариантите на момента на X_u в един и същи диапазон.

Всички резултати от симулациите и референтната форма, детектирана в 16:00 ч.,

Таблица 6.1: Коефициенти на сходство, показващи приликата за всеки симулационен сценарий и всеки коефициент на дифузия с референтната форма, открита в 16:00 ч.

Reference image: pm detection 	Seeding from shape as am detection	Point source	Continuous oil release
Diffusion 0.001 	0.001079885 	0.002923571 	0.002083855 
Diffusion 0.005 	0.001887041 	0.002419243 	8.09E-05 
Diffusion 0.01 	0.003256479 	0.001373423 	0.002356056 

се трансформират в бинарни изображения, където пикселите, съдържащи нефтено петно или трасер, са черни, а "чистите" пиксели, без нефт, са бели.

За да изберем най-точната симулация, трябва да определим колко близки на външен вид са двата обекта - нефтеното петно на референтното изображение и всеки симулационен сценарий - чрез изчисляване на коефициент на сходство. Малките стойности на коефициента близки до 0 означават, че двете форми са сходни по външен вид, а големите коефициенти показват форми, които не си приличат.

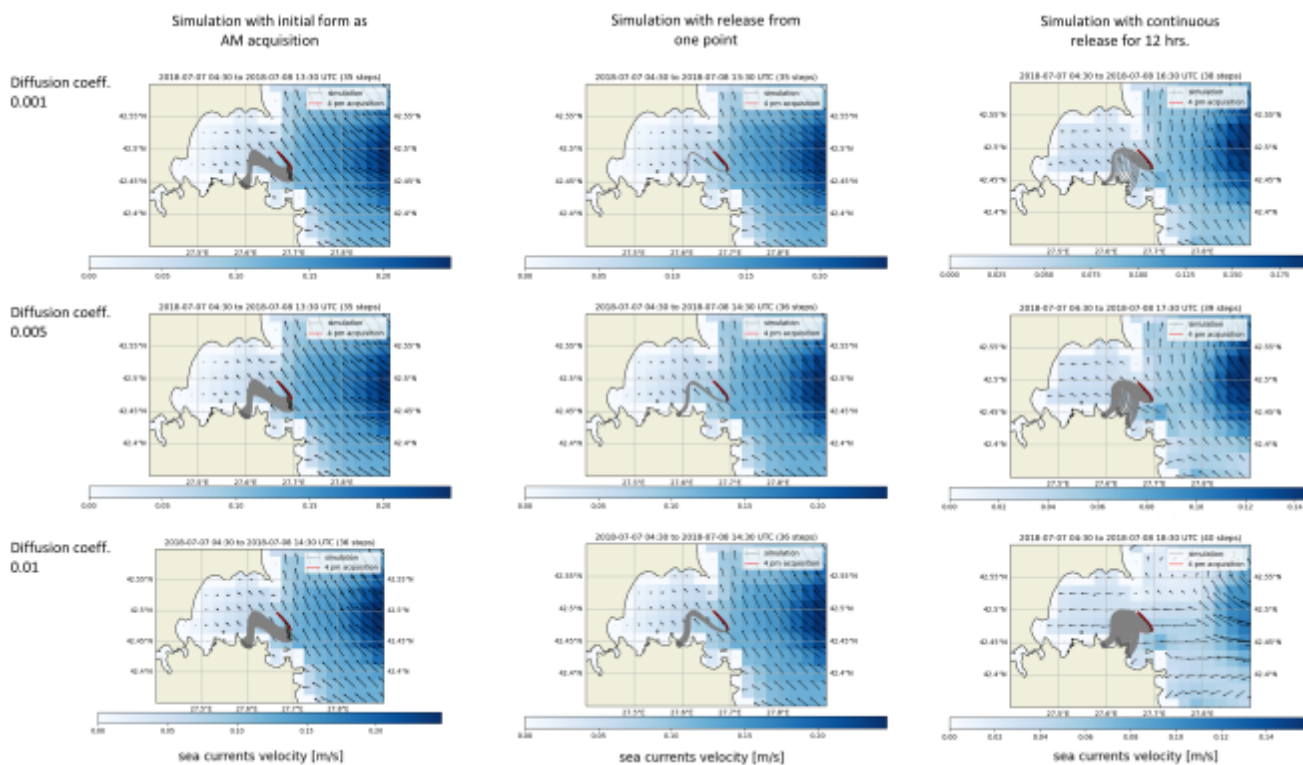
Коефициентът на сходство се пресмята с уравнението

$$D(A, B) = \sum_{i=1}^7 \frac{|\phi_i^A - \phi_i^B|}{|\phi_i^A|}. \quad (6.1)$$

Тук A е референтното изображение с формата, детектирана в 16:00 ч. от сателитното изображение, а B идентифицира различните сценарии за симулация; ϕ_i дава всеки от седемте момента на X_u , както са дефинирани в [47].

Таблица 6.1 показва коефициентите, изчислени с уравнението 6.1 за всяка симулация. Коефициентът на сходство е най-близък до 0 при симулацията с непрекъснато изпускане в продължение на 12 часа, с коефициент на дифузия $0,005 \text{ m}^2/\text{s}$, което е средна стойност от трите, които представяме тук.

Този резултат съответства и на визуалната проверка. Непрекъснатото изпускане на нефт от координати, идентични с позицията на потъналия кораб, оставя продълговата следа, разпространяваща се на северозапад с теченията. Посоката на разпространение е много сходна до детектираната форма, като малкото отклонение от очакваната посока може да бъде свързано с ниската разделителна способност на данните за повърхностните течения и вятъра.



Фигура 6.2: Симулации за трите различни сценария на засяване с три различни коефициенти на дифузия – $0.001 \text{ m}^2/\text{s}$, $0.005 \text{ m}^2/\text{s}$, $0.01 \text{ m}^2/\text{s}$. Трасерите се оставят да се носят, докато всички достигнат морското дъно или бреговата линия.

6.2.4 Въздействие на изпускането на нефт върху крайбрежието

В този параграф финализираме трите симулационни сценария, като оставяме трасерите да се носят по течението и вятъра, докато всички достигнат брега или заседнат на морското дъно. Така можем да оценим за колко време се очаква нефтът да достигне бреговата линия и кои райони са по-предразположени към замърсяване.

На фигура 6.2 са обобщени резултатите от тестовете. Вижда се, че при всичките девет симулации трасерите достигат бреговата линия в района на град Черноморец и малкия залив северно от него. Колко широко се простират трасерите зависи най-вече от сценария на засяване. Крайното време за достигане на трасерите до брега варира между 13:30 ч. на 8 юли за точковия източник и най-малкия коефициент на дифузия и 18:30 ч. на 8 юли за непрекъснатото изпускане на нефт и най-големия коефициент на дифузия. Това наблюдение е логично, като се има предвид, че сценарият на посяване с непрекъснато изпускане на нефт освобождава последният ансамбъл трасери в 16:30 ч. UTC на 7 юли.

Всички резултати от симулациите показват, че най-голямо замърсяване се получава в малкия залив северно от Черноморец.

Трябва да се отбележи, че разделителната способност на повърхностните течения не е достатъчно фина, за да обхване дребномащабната циркулация, а последната точка

в мрежата на теченията е на около 3 km от брега. Поради това може да се очаква известно отклонение от крайното място на засядане на трасери.

За да се избегне засядането на трасери в празни места "без данни" между сушата и последната точка от мрежата на теченията, OpenDrift използва билинейна интерполация [43]. Отчасти това може да обясни защо траекториите на трасерите завършват на много сходни места, независимо от разликата в сценариите на засяване и коефициента на дифузия.

Глава 7

Заклучения и научни приноси на дисертацията

7.1 Заклучения

Целта на тази дисертация е да се проучат различни подходи за откриване на аномални структури по повърхността на Черно море с помощта на спътникови данни. За тази цел се анализират изображения от различни мисии и сензори, като се подчертава тяхната област на приложение и потенциал. Аномалните структури на морската повърхност могат да имат различен произход и да подсказват води, втичащи се от сушата или пък замърсяване. Те могат да бъдат и проява на различни общи морски процеси. Определянето на това кои структури са свързани със замърсяване, и кои с естествен морски процес изисква разбиране на анализираните данни и познаване на региона.

Изследването, описано в глава 3, оценява предимствата на хиперспектралните пред мултиспектралните изображения и оценява възможността за характеризиране на различни типове вода по спектрите на отражение.

За тази цел сравняваме изображенията от PRISMA и мултиспектралния инструмент на Sentinel-2 през юли 2020 г. над район в делтата на Дунав и северозападното крайбрежие на Черно море и определяме типове вода с различни характеристики. Анализът на спектрите на отражение разкрива, че речните струи имат най-високи стойности на отражение, а лагуните и крайбрежните райони показват много сходни стойности на отражение на повърхността. Истинското предимство на хиперспектралния сензор пред мултиспектралния е видимо във VNIR (видима и близка инфрачервена област) и SWIR (късовълнова инфрачервена област) за мътни води. Sentinel-2 показва много сходно отражение за четирите типа вода, а PRISMA дава съществена допълнителна информация.

По-нататък проучваме как да определим обхвата на речните води в открито море и фронталната зона между сладки и солени води. Спектрите на PRISMA в 15 точки,

започващи от речното устие до оптично чисти морски води, разкриват постепенно намаляване отразението в пряка зависимост от разстоянието от брега за типовете речен вток и мътни крайбрежни води. От хиперспектралните спектри на отражение може ясно да се определи обхватът на речните води далеч от брега.

Спектрите от Sentinel-2 показват повишена отразителна способност само за първите три точки, разположени в речното устие. Въз основа на останалите спектри не може да се определи допълнителна корелация между мътноста и разстоянието от брега. Тези резултати подчертават предимствата на хиперспектралните спътникови изображения пред мултиспектралните данни за морските и крайбрежните региони. Мултиспектралните спектри от Sentinel-2 не успяват да представят еднозначно различните типове вода в близост до брега само въз основа на анализ на спектрите на отражение. За разлика от тях хиперспектралните данни от мисията PRISMA дават обещаващ резултат, че дори със сравнително проста предварителната обработка и достъпни изчислителните ресурси могат да се разграничат речните води и нивата на мътност.

Глава 4 представя схема на иновативна методология за откриване на зауствания на отпадни води в крайбрежната зона на Черно море въз основа на изображения от Sentinel-2.

В нашето проучване изследваме разпространението на речни струи, като предполагаме, че по подобен начин можем да приложим резултатите към пречистените отпадни води, тъй като двата вида води имат сходни оптични характеристики. Променливите, които анализираме, са присъщите оптични свойства на водата (Inherent Optical Properties – IOPs) и по-точно фракционният принос на всеки от трите абсорбера – детрит, цветна разтворена органична материя (CDOM) и фитопланктонен пигмент – към общото поглъщане. За обработка са избрани общо 881 изображения от Sentinel-2 за 2017 г., 2018 г. и 2019 г. с облачност по-малка от 20%, които покриват избраната от нас област.

Основните изводи от това проучване могат да бъдат обобщени, както следва:

- Данните за валидиране от AERONET за концентрацията на хлорофил-а показват добро съответствие със стойностите, изчислени от C2RCC с коефициент на корелация 0.73, което доказва валидността на методологията на изследването, [66].
- Анализът на фракциите на абсорберите показва, че за групи 1 и 2, разположени близо до брега и силно повлияни от речния вток, преобладаващият абсорбер е CDOM, тъй като речният вток носи значително количество оптично активни компоненти. Промените във фракцията на фитопланктонен пигмент и фракцията на детрит се компенсират между тях. За откритоморските групи (3, 4 и 5) преобладаващият абсорбер е детритът.
- Влиянието на речната струя постепенно намалява от брега към открито море.

Тернарните графики ясно показват, че основната характеристика на речните и отпадни води е увеличената стойност на приноса на CDOM към абсорбцията.

- На осреднените тернарни диаграми трите откритоморски групи могат да бъдат ясно разграничени по преобладаващия принос на детрита към общата абсорбция. Дялът на фитопланктонен пигмент се увеличава, с отдалечаване от брега към открито море, за сметка на намаляване на фракцията на CDOM.

Тези изводи помагат да съставим схема на алгоритъм за идентифициране на необичайни източници на вода в морската среда. Алгоритъмът следи за рязка промяна в типичните фракции на абсорбция на CDOM, детрит и фитопланктонен пигменти на зададено от потребителя място. Анализът на фракциите на трите абсорбера вместо стойностите на концентрациите им е иновативен подход, който носи определени предимства: намалява се влиянието от неточности на алгоритмите за изчисляване на концентрации (често подвеждащи в райони с оптично комплексни води като Западното Черноморие), и премахва необходимостта от подробна информация за физичните свойства на морската вода.

В глава 5 проверяваме адаптивен прагов алгоритъм за района на Западното Черноморие и изследваме случаят на непрекъснато изпускане на нефт от потъналия кораб Мопанг в близост до бреговата линия.

Проучените тестови случаи, представени в глава 5.1, показват цялостно добро представяне на адаптивния прагов алгоритъм, внедрен в океанския инструмент на SNAP за откриване на нефтени разливи.

Изследването, представено в глава 5.2, демонстрира способността за надеждно детектиране на малки нефтени разливи в близост до бреговата линия. Като тестови случай е използвано изтичането на нефт от потъналия кораб Мопанг, намиращ се в непосредствена близост до българското крайбрежие.

Анализът показва, че нефтеното замърсяване, видимо през летния период на 2017 г., е от същия порядък като това през 2018 г., което води до заключението, че изтичането е започнало преди 2017 г. Това се потвърждава и от Gade [77], където са демонстрирани единични изпускания и през 2015 г.

Както през юли и август 2018 г., така и през август 2017 г. са установени сходно интензивни течове. Пространственият обхват на откритите петролни петна варира между 0.17 и 2.4 km².

Наличните спътникови изображения SAR с детектирани нефтени петна сутрин и следобед за три дати (7 юли, 6 август и 29 септември 2018 г.) представено в [73] дава уникална възможност да се изследва промяната на разлива и да се оцени въздействието на теченията върху разпространението на нефт. Вижда се, че като цяло формата и размера не се променят значително през деня, но променят посоката и ориентацията си спрямо повърхностното течение. Петната се разпространяват по протежение на или напречно на потока на повърхностното течение, далеч от зоните

с голяма скорост на течението.

В глава 6 изучаваме потенциала на Лагранжевите модели за симулиране на нефтени разливи. В раздел 6.1 е направен първи опит в тази област чрез експериментиране с опростен модел с пасивни Лагранжеви частици. Ограниченията му включват това, че изветрянето на частиците не е взето под внимание и скоростта на вятъра не е въведена като гранично условие. Също така моделът е двуизмерен, което означава, че не се отчита вертикалното движение и не е включена батиметрията за засядане на частици.

В глава 6.2 развиваме идеята за внедряване на спътникова информация в моделирането на нефтени разливи, но използваме по-комплексен модел за симулации на детектирания нефтен разлив от потъналия кораб Мопанг. Използваме моделът OpenDrift като избираме три различни сценария за засяване на трасери и тестваме три различни коефициента на дифузия. Крайните резултати са верифицирани с реални спътникови наблюдения.

Резултатите с време за симулация 12 часа (старт в 4 ч. сутринта на 7 юли 2018 г.) се сравняват с реално детектираното нефтено петно от 16 часа същия ден. Различните симулационни сценарии също показват, че началните условия за засяване на трасери оказват значително влияние върху крайната форма. Формата на нефтеното изпускане от Мопанг детектирано следобед, ни подсказва как точно се случва изтичането на нефт.

За да определим резултатът от кой симулационен сценарий наподобява реалните SAR наблюдения най-точно, правим анализ въз основа на статистика на X_u за пространствени трансформации на обекти. Резултатите от анализа и визуалната проверка показват един и същ резултат. Непрекъснатото изтичане на нефт с умерен коефициент на дифузия от $0,005 \text{ m}^2/\text{s}$ дава резултати, които са най-близки до реалното наблюдение на Sentinel-1 от 16:00 ч. на 7 юли 2018 г. Това предполага, че най-вероятно резервоарите на потъналия кораб са изпускали нефт непрекъснато през периода на наблюдение.

В последната стъпка правим продължителна симулация, докато всички 300 трасера заседнат на морското дъно или достигнат бреговата ивица. При всеки сценарий районът с най-значително замърсяване е малкият залив северно от град Черноморец. Най-широко се разпростира замърсяването в случая на непрекъснато изтичане на нефт и голям коефициент на дифузия.

Представеното в тази дисертация изследване обхваща три много различни набора от спътникови данни, които детектират и наблюдават различни повърхностни структури в Черно море. За всеки набор от данни приложихме различна методология, като подчертахме предизвикателствата и възможностите за извличане на информация. В последната стъпка приложихме и моделиране спрямо реални SAR наблюдения, като валидирахме модела и избрахме сценария за изпускане на нефт, който описва най-добре реалните наблюдения.

7.2 Новост на изследването и научни приноси

В дисертацията са представени различни подходи за откриване на аномални структури в Черно море с помощта на спътникови данни. Анализирахме изображения от три много различни типа сензори, за да придобием широка представа за темата и да проучим различните възможности за извличане на информация. Като цяло нашето изследване се отнася до идентифицирането на води с произход от сушата (речни, отпадни) и нефтени разливи на морската повърхност.

Въз основа на заключенията, представени в раздел 7.1, можем да формулираме следните научни приноси.

- За първи път са анализирани хиперспектрални изображения от мисията PRISMA за Черно море, като е разработен нов метод за характеризиране на типа вода (с речен или крайбрежен произход) по спектрите на отражение в района на делтата на река Дунав. Показано е предимството на използването на хиперспектрални изображения пред мултиспектралните. Изследването е едно от малкото основани на хиперспектрални данни за региона на Черно море до момента.
- В дисертацията е представен иновативен метод за идентифициране на типове води, базиран на преобладаващия абсорбер, определен по абсорбционната част на присъщите оптични свойства (inherent optical properties) на морската вода. Методът е използван за основа на автоматичен алгоритъм за детектиране на отпадни води от мултиспектрални изображения.
- За първи път систематично е изследвано нефтеното замърсяване от потъналия кораб Мопанг въз основа на радарни данни от мисията Sentinel-1 за района на българското крайбрежие за годините 2017 и 2018. Показани са зоните на разпространение на петното и периодите, в които се открива на спътниковите изображения.
- Разпространението на нефтеното замърсяване от потъналия кораб Мопанг е симулирано за първи път числено с модела OpenDrift, като спътниковите изображения се използват за дефиниране на началните условия и калибриране на параметрите на дифузията в модела.
- За първи път се използват инвариантите на Ху за валидиране на числен модел за разпространение на нефтено замърсяване с реални спътникови наблюдения. При сравняване на наблюдаваната и моделираната форма на нефтения разлив инвариантите на Ху дават количествена мярка на съпадението и дават възможност да се оцени точността на резултатите от симулацията.

Публикации свързани с дисертацията

Публикации в международни списания с импакт фактор:

1. Gancheva, I. and Peneva, E. "Verification of the SNAP ocean-tool for oil spill detection for the Bulgarian Black Sea region." AIP Conference Proceedings. Vol. 2075. No. 1. AIP Publishing LLC, 2019. doi.org/10.1063/1.5091267
2. Gancheva I., Peneva E. "Remote Sensing and Modelling of the Mopang Oil Pollution Near the Bulgarian Black Sea Coast". In International conference on Environmental protection and disaster RISKS Oct 2 (pp. 383-398). Springer, Cham, 2020. doi.org/10.1007/978-3-030-70190-1_26
3. Gancheva, I., Peneva, E. and Slabakova, V. "Detecting the Surface Signature of Riverine and Effluent Plumes along the Bulgarian Black Sea Coast Using Satellite Data". Remote Sensing, 13(20), p.4094, 2021. doi.org/10.3390/rs13204094
4. Gancheva, Irina. "Analysis of hyperspectral and multispectral reflectance spectra in the Black Sea coastal area near the Danube delta: comparison of PRISMA and Sentinel-2 observations." Journal of Physics: Conference Series. Vol. 2255. No. 1. IOP Publishing, 2022. doi:10.1088/1742-6596/2255/1/012015

Публикации в български списания:

5. Gancheva, I, "Oil Spill Detection in SAR Satellite Images: a Review" Annual of Sofia University St. Kliment Ohridski, Faculty of Physics, 2018, Vol. 111, pp. 5-22.

Публикации в разширен текст от международни конференции:

6. Gancheva, I. and Peneva, E. "Impact of the mesoscale circulation on the dispersion of oil pollution in the western Black Sea basin", Fourteenth International Conference On Marine Sciences and Technologies–Proceedings, 199-203, ISSN 1314-0957, I Gancheva and E Peneva, 2018; <https://doi.org/10.7546/IO.BAS.2018.3>
7. Gancheva, I. and Peneva, E., 2020. "Remote Sensing of Oil Pollution in the Black Sea – the Mopang Case". In Proceeding of 1st international conference on environmental protection and disaster risks (pp. 602-608).

Участие в конференции и научни форуми

Докторантката е докладвала резултати от дисертацията в 7 международни и 6 национални конференции.

1. Устен доклад на годишния семинар на Катедра Метеорология и Геофизика на база Гьолечица на 9 юни 2018 г. с тема “Демонстрация на софтуера “SNAP” за визуализация и обработка на спътникови изображения”
2. Постерен доклад на тема “Verification of the SNAP Ocean-Tool for Oil Spill Detection for the Bulgarian Black Sea Region”, 10 th International Conference of the Balkan Physical Union, 26 – 30 август 2018 в София, България
3. Устен доклад на тема “Наблюдение на климатичните промени посредством спътникова информация”, междукатедрен семинар “Природни ресурси, климатични промени и социално-икономическата им значимост в исторически план” на 12 – 14 октомври 2018 в Боровец, България
4. Устен доклад на тема “Impact of the Mesoscale Circulation on the Dispersion of Oil Pollution in the Western Black Sea Basin” на “14th International conference on marine sciences and technologies – Black Sea 2018” на 10 октомври 2018 във Варна
5. Устен доклад - представяне на приложение на данни от Коперник на 1-ви национален ден на програма Коперник – Copernicus 4 BG, презентация на тема “Влияние на мезо-циркуляцията върху разпространението на нефтени замърсявания в района на Западно Черно море” на 23 ноември 2018 в София
6. Участие в ежегодната асамблея на Европейския геофизичен съюз във Виена, Австрия – 7-13 април 2019 г. с постерен доклад на тема “The case study of Mopang fuel oil leak in August 2018 in Southwest Black Sea near the Bulgarian town Sozopol”
7. Устен доклад на Обучителен семинар "Физика и химия на Земята, атмосферата и океана" организиран от Катедра Метеорология и Геофизика, с. Вършец, 31. май-2 юни 2019, на тема “Детектиране на мазутния разлив близо до Созопол от кораба Мопанг от лятото на 2018 год. посредством спътникова информация“
8. Участие в ежегодната асамблея на Европейския геофизичен съюз, онлайн – 4-8 май 2020 г. с постерен доклад на тема “Satellite remote sensing techniques for detection of riverine and other sources flows in the coastal part of the Black Sea”
9. Участие в конференцията ESA Φ -week, организирана от Европейската Космическа Агенция, онлайн – 28 септ.-2 окт. 2020, с постерен доклад на тема “Satellite detection of wastewater contamination in the Black Sea coastal areas”
10. Устен доклад на 11-ри национален ден на програма Коперник – Copernicus 4 BG с международно участие на тема “Monitoring the extent of riverine and other sources flow in the Bulgarian Black Sea coastal zone using satellite remote sensing”

11. Устен доклад на 1st International Conference on Environmental Protection and Disaster Risks, онлайн, 29-30 септ. 2020 с тема "Remote Sensing of Oil Pollution in the Black Sea – the Mopang Case"
12. Устен доклад на Трети научен семинар "Физика и химия на Земята, атмосферата и океана" организиран от Катедра Метеорология и Геофизика, с. Баня, 3 - 5 октомври 2021 с тема "Идентифициране на замърсявания от отпадни води посредством спътникова информация за района на българското Черноморие"
13. Постерен доклад на ESA Living Planet Symposium 23-27 май 2022 в Бон, Германия на тема "The benefits of hyperspectral imagery in Black Sea coastal waters near the Danube Delta: comparison of PRISMA and Sentinel-2 observations"

Литература

- [1] David Blondeau-Patissier, James FR Gower, Arnold G Dekker, Stuart R Phinn, and Vittorio E Brando. A review of ocean color remote sensing methods and statistical techniques for the detection, mapping and analysis of phytoplankton blooms in coastal and open oceans. *Progress in oceanography*, 123:123–144, 2014.
- [2] Daniel Odermatt, Anatoly Gitelson, Vittorio Ernesto Brando, and Michael Schaepman. Review of constituent retrieval in optically deep and complex waters from satellite imagery. *Remote sensing of environment*, 118:116–126, 2012.
- [3] Zbyněk Malenovský, Helmut Rott, Josef Cihlar, Michael E Schaepman, Glenda García-Santos, Richard Fernandes, and Michael Berger. Sentinels for science: Potential of sentinel-1,-2, and-3 missions for scientific observations of ocean, cryosphere, and land. *Remote Sensing of environment*, 120:91–101, 2012.
- [4] Julie Transon, Raphaël d’Andrimont, Alexandre Maignard, and Pierre Defourny. Survey of hyperspectral earth observation applications from space in the sentinel-2 context. *Remote Sensing*, 10(2):157, 2018.
- [5] Lachezar Filchev. Satellite hyperspectral earth observation missions—a review. *Bulgarian Academy of Sciences ISSN 1313–0927*, page 191, 2014.
- [6] Claudia Giardino, VE Brando, Peter Gege, Nicole Pinnel, Eric Hochberg, E Knaeps, Ils Reusen, Roland Doerffer, Mariano Bresciani, F Braga, et al. Imaging spectrometry of inland and coastal waters: state of the art, achievements and perspectives. *Surveys in Geophysics*, 40(3):401–429, 2019.
- [7] O Yu Lavrova, MI Mityagina, and IA Uvarov. Detection and recognition of various water types in black sea coastal zone and in lakes of crimea based on hyperspectral data analysis. *Sovrem. Probl. Distantionnogo Zondirovaniya Zemli Kosmosa*, 11(1):135–147, 2014.
- [8] Yu P Zaitsev and BG Alexandrov. Recent man-made changes in the black sea ecosystem. In *Sensitivity to Change: Black Sea, Baltic Sea and North Sea*, pages 25–31. Springer, 1997.

- [9] Laurence D Mee. The black sea in crisis: a need for concerted international action. *Ambio* (Sweden), 1992.
- [10] Oleg A Yunev, Snejana Moncheva, and Jacob Carstensen. Long-term variability of vertical chlorophyll a and nitrate profiles in the open black sea: eutrophication and climate change. *Marine Ecology Progress Series*, 294:95–107, 2005.
- [11] S Moncheva, O Gotsis-Skretas, K Pagou, and A Krastev. Phytoplankton blooms in black sea and mediterranean coastal ecosystems subjected to anthropogenic eutrophication: similarities and differences. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 53(3):281–295, 2001.
- [12] Jana Friedrich, Felix Janssen, Dmitry Aleynik, Hermann W Bange, N Boltacheva, MN Çagatay, Andrew W Dale, Giuseppe Etiope, Zeynep Erdem, Maria Geraga, et al. Investigating hypoxia in aquatic environments: diverse approaches to addressing a complex phenomenon. *Biogeosciences*, 11(4):1215–1259, 2014.
- [13] Georgi M Daskalov. Overfishing drives a trophic cascade in the black sea. *Marine Ecology Progress Series*, 225:53–63, 2002.
- [14] Temel Oguz and Denis Gilbert. Abrupt transitions of the top-down controlled black sea pelagic ecosystem during 1960–2000: evidence for regime-shifts under strong fishery exploitation and nutrient enrichment modulated by climate-induced variations. *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, 54(2):220–242, 2007.
- [15] Arthur Capet, J-M Beckers, and Marilaure Grégoire. Drivers, mechanisms and long-term variability of seasonal hypoxia on the black sea northwestern shelf—is there any recovery after eutrophication? *Biogeosciences*, 10(6):3943–3962, 2013.
- [16] OV Kopelevich, VI Burenkov, SV Ershova, SV Sheberstov, and MA Evdoshenko. Application of seawifs data for studying variability of bio-optical characteristics in the barents, black and caspian seas. *Deep Sea Research Part II: Topical Studies in Oceanography*, 51(10-11):1063–1091, 2004.
- [17] Marcel Babin, Dariusz Stramski, Giovanni M Ferrari, Herve Claustre, Annick Bricaud, Grigor Obolensky, and Nicolas Hoepffner. Variations in the light absorption coefficients of phytoplankton, nonalgal particles, and dissolved organic matter in coastal waters around europe. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 108(C7), 2003.
- [18] Tanya Churilova, Vyacheslav Suslin, Olga Krivenko, Tatiana Efimova, Nataliia Moiseeva, Vladimir Mukhanov, and Liliya Smirnova. Light absorption by phytoplankton in the upper mixed layer of the black sea: Seasonality and parametrization. *Frontiers in Marine Science*, 4:90, 2017.

- [19] Curtis D Mobley, Dariusz Stramski, W Paul Bissett, and Emmanuel Boss. Optical modeling of ocean waters: Is the case 1-case 2 classification still useful? *Oceanography*, 17(SPL. ISS. 2):60, 2004.
- [20] Serkan Sancak, Sukru T Besiktepe, Aysen Yilmaz, Michael Lee, and Robert Frouin. Evaluation of seawifs chlorophyll-a in the black and mediterranean seas. *International Journal of Remote Sensing*, 26(10):2045–2060, 2005.
- [21] Violeta Slabakova, Snejana Moncheva, Natalyia Slabakova, and Nina Dzhembekova. Evaluation of sentinel-3a olci ocean color products in the western black sea. In *Proceeding of 1st international conference on environmental protection and disaster risks*, pages 271–281, 2020.
- [22] Tulay Cokacar, Temel Oguz, and Nilgun Kubilay. Satellite-detected early summer coccolithophore blooms and their interannual variability in the black sea. *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, 51(8):1017–1031, 2004.
- [23] Wilhelm Foissner. Biogeography and dispersal of micro-organisms: a review emphasizing protists. *Acta protozoologica*, 45(2):111–136, 2006.
- [24] O Kopelevich, V Burenkov, S Sheberstov, S Vazyulya, M Kravchishina, L Pautova, V Silkin, V Artemiev, and A Grigoriev. Satellite monitoring of coccolithophore blooms in the black sea from ocean color data. *Remote sensing of environment*, 146:113–123, 2014.
- [25] Jan-Hendrik Körber, Heiko Sahling, Thomas Pape, Christian dos Santos Ferreira, Ian MacDonald, and Gerhard Bohrmann. Natural oil seepage at kobuleti ridge, eastern black sea. *Marine and Petroleum Geology*, 50:68–82, 2014.
- [26] NV Evtushenko and A Yu Ivanov. Oil seeps in the southeastern black sea studied using satellite synthetic aperture radar images. *Izvestiya, Atmospheric and Oceanic Physics*, 49(9):913–918, 2013.
- [27] Diana De Padova, Michele Mossa, Maria Adamo, Giacomo De Carolis, and Guido Pasquariello. Synergistic use of an oil drift model and remote sensing observations for oil spill monitoring. *Environmental Science and Pollution Research*, 24(6):5530–5543, 2017.
- [28] Vasko Galabov, Anna Kortcheva, and Jordan Marinski. Simulation of tanker accidents in the bay of burgas, using hydrodynamic model. *International Multidisciplinary Scientific GeoConference: SGEM*, 3:993, 2012.
- [29] Vasko Galabov, Anna Kortcheva, Georgi Kortchev, and Jordan Marinski. Contamination of bourgas port waters with oil. In *proceeding of Global Congress on ICM*, volume 30, pages 1077–1086, 2013.

- [30] Copernicus - the european union's earth observation programme. <https://www.copernicus.eu/en/about-copernicus>. Accessed: 04.02.2022.
- [31] Maya Ilieva, Lachezar Filchev, and Lyubka Pashova. Preliminary analysis of copernicus data for natural hazards monitoring of the bulgarian black sea coastal zone. In Proceedings, 7th International Conference on Cartography and GIS, pages 18–23, 2018.
- [32] Sergio Cogliati, F Sarti, L Chiarantini, M Cosi, R Lorusso, E Lopinto, F Miglietta, L Genesisio, Luis Guanter, Alexander Damm, et al. The prisma imaging spectroscopy mission: Overview and first performance analysis. *Remote Sensing of Environment*, 262:112499, 2021.
- [33] Enmap-box 3 documentation. <https://enmap-box.readthedocs.io/>. Accessed: 03.02.2022.
- [34] Carsten Brockmann, Roland Doerffer, Marco Peters, Stelzer Kerstin, Sabine Embacher, and Ana Ruescas. 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. In *Living Planet Symposium*, volume 740, page 54, 2016.
- [35] Camilla Brekke and Anne HS Solberg. Oil spill detection by satellite remote sensing. *Remote sensing of environment*, 95(1):1–13, 2005.
- [36] Konstantinos N Topouzelis. Oil spill detection by sar images: dark formation detection, feature extraction and classification algorithms. *Sensors*, 8(10):6642–6659, 2008.
- [37] George Zodiatis, Robin Lardner, Tiago M Alves, Yiannis Krestenitis, Leonidas Perivoliotis, Sarantis Sofianos, and Katerina Spanoudaki. Oil spill forecasting (prediction). *Journal of Marine Research*, 75(6):923–953, 2017.
- [38] Christopher H Barker, Vassiliki H Kourafalou, CJ Beegle-Krause, Michel Boufadel, Mark A Bourassa, Steve G Buschang, Yannis Androulidakis, Eric P Chassignet, Knut-Frode Dagestad, Donald G Danmeier, et al. Progress in operational modeling in support of oil spill response. *Journal of marine science and engineering*, 8(9):668, 2020.
- [39] Panagiota Keramea, Katerina Spanoudaki, George Zodiatis, Georgios Gikas, and Georgios Sylaios. Oil spill modeling: a critical review on current trends, perspectives, and challenges. *Journal of marine science and engineering*, 9(2):181, 2021.
- [40] Yonggang Liu, Robert H Weisberg, Chuanmin Hu, and Lianyuan Zheng. Combining numerical ocean circulation models with satellite observations in a trajectory forecast

- system: a rapid response to the deepwater horizon oil spill. In *Ocean Sensing and Monitoring III*, volume 8030, pages 204–212. SPIE, 2011.
- [41] Qing Xu, Xiaofeng Li, Yongliang Wei, Zeyan Tang, Yongcun Cheng, and William G Pichel. Satellite observations and modeling of oil spill trajectories in the bohai sea. *Marine pollution bulletin*, 71(1-2):107–116, 2013.
- [42] Liliana Rusu. Application of numerical models to evaluate oil spills propagation in the coastal environment of the black sea. *Journal of Environmental Engineering and Landscape Management*, 18(4):288–295, 2010.
- [43] Knut-Frode Dagestad, Johannes Röhrs, Øyvind Breivik, and Bjørn Ådlandsvik. Opendrft v1. 0: a generic framework for trajectory modelling. *Geoscientific Model Development*, 11(4):1405–1420, 2018.
- [44] Atanas Palazov, Stefania Ciliberti, Rita Lecci, Marilaure Grégoire, Joanna Staneva, Elisaveta Peneva, Marius Matreata, Eric Jansen, Leonardo Lima, Diana Azevedo, et al. Cmems black sea monitoring and forecasting centre: An overview on service and scientific developments in 2016-2021 and future perspectives. In *9th EuroGOOS International conference*, 2021.
- [45] Era5 hourly data on single levels from 1979 to present. <https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#!/dataset/reanalysis-era5-single-levels?tab=overview>. Accessed: 02.02.2022.
- [46] Richard J Prokop and Anthony P Reeves. A survey of moment-based techniques for unoccluded object representation and recognition. *CVGIP: Graphical Models and Image Processing*, 54(5):438–460, 1992.
- [47] Ming-Kuei Hu. Visual pattern recognition by moment invariants. *IRE transactions on information theory*, 8(2):179–187, 1962.
- [48] Zhihu Huang and Jinsong Leng. Analysis of hu’s moment invariants on image scaling and rotation. In *2010 2nd International Conference on Computer Engineering and Technology*, volume 7, pages V7–476. IEEE, 2010.
- [49] Yue Guo and Heng Zhen Zhang. Oil spill detection using synthetic aperture radar images and feature selection in shape space. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 30:146–157, 2014.
- [50] David Mera, Veronica Bolon-Canedo, José Manuel Cotos, and Amparo Alonso-Betanzos. On the use of feature selection to improve the detection of sea oil spills in sar images. *Computers & Geosciences*, 100:166–178, 2017.
- [51] Open computer vision - documentation, wiki and tutorials. <https://opencv.org/>. Accessed: 10.05.2022.

- [52] Claudia Giardino, Mariano Bresciani, Federica Braga, Alice Fabbretto, Nicola Ghirardi, Monica Pepe, Marco Gianinetto, Roberto Colombo, Sergio Cogliati, Semhar Ghebrehiwot, et al. First evaluation of prisma level 1 data for water applications. *Sensors*, 20(16):4553, 2020.
- [53] Milad Niroumand-Jadidi, Francesca Bovolo, and Lorenzo Bruzzone. Water quality retrieval from prisma hyperspectral images: first experience in a turbid lake and comparison with sentinel-2. *Remote Sensing*, 12(23):3984, 2020.
- [54] Irina Gancheva. Analysis of hyperspectral and multispectral reflectance spectra in the black sea coastal area near the danube delta: comparison of prisma and sentinel-2 observations. In *Journal of Physics: Conference Series*, volume 2255, page 012015. IOP Publishing, 2022.
- [55] Heidi M Dierssen. Hyperspectral measurements, parameterizations, and atmospheric correction of whitecaps and foam from visible to shortwave infrared for ocean color remote sensing. *Frontiers in Earth Science*, 7:14, 2019.
- [56] Michelle M Gierach, Benjamin Holt, Rebecca Trinh, B Jack Pan, and Christine Rains. Satellite detection of wastewater diversion plumes in southern california. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 186:171–182, 2017.
- [57] Rebecca C Trinh, Cedric G Fichot, Michelle M Gierach, Benjamin Holt, Nabin K Malakar, Glynn Hulley, and Jayme Smith. Application of landsat 8 for monitoring impacts of wastewater discharge on coastal water quality. *Frontiers in Marine Science*, 4:329, 2017.
- [58] Benjamin Holt, Rebecca Trinh, and Michelle M Gierach. Stormwater runoff plumes in the southern california bight: A comparison study with sar and modis imagery. *Marine Pollution Bulletin*, 118(1-2):141–154, 2017.
- [59] Sergey A Lebedev, Andrey G Kostianoy, Dmitry M Soloviev, Evgeniia A Kostianaia, and Yanvarbi A Ekba. On a relationship between the river runoff and the river plume area in the northeastern black sea. *International Journal of Remote Sensing*, 41(15):5806–5818, 2020.
- [60] Andrey G Kostianoy, Sergey A Lebedev, Dmitry M Soloviev, and Yalcin Tepe. On river plumes along the turkish coast of the black sea. *Ecologica Montenegrina*, 25:63–78, 2019.
- [61] Nikolay P Nezlin, Paul M DiGiacomo, Eric D Stein, and Drew Ackerman. Stormwater runoff plumes observed by seawifs radiometer in the southern california bight. *Remote Sensing of Environment*, 98(4):494–510, 2005.

- [62] Nikolay P Nezlin and Paul M DiGiacomo. Satellite ocean color observations of stormwater runoff plumes along the san pedro shelf (southern california) during 1997–2003. *Continental Shelf Research*, 25(14):1692–1711, 2005.
- [63] Florence Lahet and Dariusz Stramski. Modis imagery of turbid plumes in san diego coastal waters during rainstorm events. *Remote Sensing of Environment*, 114(2):332–344, 2010.
- [64] Paul M DiGiacomo, Libe Washburn, Benjamin Holt, and Burton H Jones. Coastal pollution hazards in southern california observed by sar imagery: stormwater plumes, wastewater plumes, and natural hydrocarbon seeps. *Marine Pollution Bulletin*, 49(11-12):1013–1024, 2004.
- [65] European space agency – grid processing on demand. <http://192.106.234.223>. Accessed: 18.05.2022.
- [66] Irina Gancheva, Elisaveta Peneva, and Violeta Slabakova. Detecting the surface signature of riverine and effluent plumes along the bulgarian black sea coast using satellite data. *Remote Sensing*, 13(20):4094, 2021.
- [67] TI Oguz, VS Latun, MA Latif, VV Vladimirov, HI Sur, AA Markov, E Özsoy, BB Kotovshchikov, VV Eremeev, and Ü Ünlüata. Circulation in the surface and intermediate layers of the black sea. *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*, 40(8):1597–1612, 1993.
- [68] Gebco bathymetry 2020 grid. https://www.bodc.ac.uk/data/published_data_library/catalogue/10.5285/a29c5465-b138-234d-e053-6c86abc040b9/. Accessed: 07.02.2022.
- [69] Aeronet ocean colour. https://aeronet.gsfc.nasa.gov/new_web/ocean_color.html. Accessed: 08.02.2022.
- [70] Ilaria Cazzaniga, Giuseppe Zibordi, and Frédéric Mélin. Spectral variations of the remote sensing reflectance during coccolithophore blooms in the western black sea. *Remote Sensing of Environment*, 264:112607, 2021.
- [71] Irina Gancheva and Elisaveta Peneva. Verification of the snap ocean-tool for oil spill detection for the bulgarian black sea region. In *AIP Conference Proceedings*, volume 2075, page 120009. AIP Publishing LLC, 2019.
- [72] Yingcheng Lu, Xiang Li, Qingjiu Tian, Guang Zheng, Shaojie Sun, Yongxue Liu, and Qiang Yang. Progress in marine oil spill optical remote sensing: detected targets, spectral response characteristics, and theories. *Marine Geodesy*, 36(3):334–346, 2013.

- [73] Irina Gancheva and Elisaveta Peneva. Remote sensing of oil pollution in the black sea-the mopang case. In Proceeding of 1st international conference on environmental protection and disaster risks, pages 602–608, 2020.
- [74] News on mopang from the bulgarian online news provider '24 chasa'. <https://www.24chasa.bg/novini/article/7023835>. Accessed: 15.02.2022.
- [75] Irina Gancheva and Elisaveta Peneva. Impact of the mesoscale circulation on the dispersion of oil pollution in the western black sea basin. In Fourteenth International Conference On Marine Sciences and Technologies – Proceedings, pages 199–203. Varna Scientific And Technical Unions, 2018.
- [76] Irina Gancheva and Elisaveta Peneva. Remote sensing and modelling of the mopang oil pollution near the bulgarian black sea coast. In International conference on Environmental protection and disaster RISKS, pages 383–398. Springer, 2020.
- [77] Martin Gade. Longterm release of oil from a wreck in the black sea monitored by spaceborne sar. In IGARSS 2019-2019 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, pages 7952–7954. IEEE, 2019.