



МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ
ФЕДЕРАЦИИ
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»
Кафедра Океанологии

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА

(бакалаврская работа)

На тему Спутниковые наблюдения вихревой активности в Черном море.

Исполнитель Мурадов Матвей Нухович

(фамилия, имя, отчество)

Руководитель кандидат физико-математических наук

(ученая степень, ученое звание)

Фролова Наталия Сергеевна

(фамилия, имя, отчество)

«К защите допускаю»

Заведующий кафедрой _____

(подпись)

кандидат физико-математических наук, доцент

(ученая степень, ученое звание)

Лукиянов Сергей Васильевич

(фамилия, имя, отчество)

« » 20 г.

Санкт-Петербург

2022

Тема – Спутниковые наблюдения вихревой активности в Чёрном море.

Оглавление

Список используемых сокращений	3
Введение.....	4
1. Физико-географические условия района исследования.	5
1.1. Основные элементы циркуляции в Чёрном море.	7
1.1.1. Основные типы циркуляции в прибрежной зоне в российском секторе Черного моря.....	9
1.2. Виды вихревых структур	10
2. Дистанционные методы наблюдения за вихревыми структурами.....	12
2.1. Характеристика используемых данных в оптическом диапазоне.....	13
2.2. Описание съёмочной аппаратуры спутников Landsat 8-9, Sentinel-2 (A/B) и Terra/Aqua (Modis).	17
3. Материалы и методы выполнения работы	24
3.1. Материалы	24
3.2. Методика работы.....	25
4 Основные результаты анализа спутниковых снимков района Чёрного моря в оптическом диапазоне	27
4.1 Проявление вихревых структур на спутниковых снимках	27
4.3 Пространственное распределение вихревых структур.....	35
4.3 Временная изменчивость вихревой активности в Чёрном море.....	35
Заключение.....	37
СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ	38

Список используемых сокращений

ОЧТ - Основное черноморское течение

ПАВ - прибрежные антициклонические вихри

РСА - Радар с синтезированной апертурой

ДЗЗ - Дистанционное зондирование Земли

ИК - Инфракрасное излучение

КА - Космический аппарат

ИСЗ - Искусственный спутник Земли

OLI - Operational Land Imager

TIRS - Thermal Infrared Sensor

NASA (НАСА) - Национальное управление по авиации и исследованию космического пространства

USGS (United States Geological Survey) - Геологическая служба США

(ПАВ) - Поверхностно-активное вещество

Введение

В современном мире исследование процессов в океане уже невозможно представить без применения спутниковой информации. Создаются и эксплуатируются новые, все более совершенные космические системы пассивного и активного дистанционного зондирования, функционирующие как в оптическом, так и в радиодиапазонах спектра электромагнитных волн.

Одним из важнейших элементов динамики вод, отвечающих за перемешивание, являются мелкомасштабные процессы, такие как субмезомасштабные вихри, фронты и внутренние волны. Методы дистанционного зондирования достаточно эффективны для исследования подобных процессов, характеризующихся сильной изменчивостью во времени и пространстве. На сегодняшний день мелкомасштабные вихревые структуры изучены достаточно слабо в силу их малых размеров, нестационарности, спонтанности появления и малого времени жизни.

В данной работе использовались изображения, полученные с различных спутников, для выявления особенностей пространственно-временных характеристик вихревых структур в Чёрном море.

Цель работы заключалась в проведении исследования мелкомасштабных вихревых структур по спутниковым изображениям в оптическом диапазоне и выявлении особенностей их проявления в акватории Чёрного моря.

В связи с поставленной целью был выделен ряд задач:

1. Проанализировать литературные источники, касающиеся темы исследования;
2. Познакомиться с дистанционными методами наблюдения вихревых структур;
3. Провести анализ имеющегося архива спутниковых данных и выбрать подходящие изображения для работы;
4. Выявить особенности проявления вихревых структур в акватории Чёрного моря.

1. Физико-географические условия района исследования.

Черное море располагается между Восточной Европой и Малой Азией и вытянуто в широтном направлении: длина 1150 км, наибольшая ширина 580 км, наименьшая от мыса Сарыч до южного побережья – 263 км. Мелководным Керченским проливом оно соединяется с Азовским морем. Проливом Босфор длиной 75 км, наименьшей глубиной 53 м и шириной 700 м в наибольшей узости – с Мраморным морем, и далее через пролив Дарданеллы – с Эгейским и Средиземным морями. Близкий к современному уровень моря установился 5–6 тысяч лет назад, когда произошло последнее соединение со Средиземным морем.

Площадь моря составляет 423 тыс. км², средняя глубина около 1315 м, наибольшая – 2210 м. На западе и северо-западе моря берега низкие, на востоке к морю вплотную подступают горы Кавказа, на юге и севере – гористые районы Малой Азии и невысокие горы Крыма. Береговая линия изрезана слабо. В северо-западной части есть несколько глубоко вдающихся в море заливов, возникших в результате затопления речных долин (Бургасский, Днестровский и Днепро-Бугский лиманы), а также многочисленные солоноватоводные озера и заболоченные участки. Северо-западная часть моря представляет собой широкую материковую отмель, которая, сужаясь, тянется вдоль западного побережья до Босфора. Годовой речной сток в море составляет в среднем более 310 км³ и почти 80% этого объема поступает на северо-западный мелководный шельф, куда впадают Дунай и Днепр, вторая и третья по объему стока реки Европы. Пресный баланс моря положительный, поскольку береговой сток и осадки превышают испарение примерно на 180 км³. Объем воды в море оценивается в 555 тыс. км³.

Климат Черного моря является смягченным континентальным. Хороший летний прогрев поверхности моря обуславливает высокую (8,9°C) среднюю температуру воды. Зимой средняя температура воды на поверхности в открытом море составляет 6-8°C, однако на северо-западе и к югу от

Керченского пролива опускается до $0,5^{\circ}\text{C}$ и даже "минус" $0,5^{\circ}\text{C}$. Летом на всей акватории моря поверхностные воды прогревается до 25°C и более до глубины 15-30 м. Глубже сезонного термоклина температура понижается примерно до слоя 75-100 м, где располагаются холодные промежуточные воды с постоянной в течение всего года температурой $7-8^{\circ}\text{C}$. Ниже температура с глубиной очень медленно повышается из-за геотермического притока тепла от дна и на глубине 2 км достигает $9,2^{\circ}\text{C}$.

По особенностям формирования и характеристикам воды моря подразделяют на поверхностные с соленостью до 18‰, промежуточные и глубинные. Циркуляция поверхностных вод моря циклоническая. Выделяются два крупных центральных круговорота в восточной и западной частях моря. Скорость течения увеличивается от 10 см/с в центре до 25 см/с на периферии этих круговоротов.

С глубиной скорости течений быстро затухают до глубин порядка 100 м. Средняя соленость составляет около 18‰, близ устьев рек – менее 9‰. В открытой части моря соленость увеличивается с глубиной от 17–18‰ на поверхности до 22,3‰ у дна. Важной особенностью гидрологической структуры вод моря является существование постоянного галоклина между горизонтами 90–120 м. Соленость в этом интервале глубин увеличивается с 18,5 до 21,5‰.

Море почти всегда свободно ото льда. Лишь в отдельные холодные зимы прибрежные воды в северо-западной мелководной части моря покрываются льдом. Ледообразование начинается в середине декабря. Толщина льда достигает 14–15 см, а в суровые зимы – 50–55 см. К концу марта льды повсеместно исчезают.

Приливы незначительные и их максимальная величина не превышает 10 см. Хорошо выражены в море сгонно-нагонные явления под влиянием сильных зимних ветров, достигающие 20–60 см у берегов Кавказа и Крыма и до 2 м в северо-западной части. Осенне-зимние штормовые ветра могут развивать волны высотой до 6–8 м. Стоячие колебания уровня моря (сейши)

развиваются в бухтах с периодами от нескольких минут до 2ч и амплитудой в 40–50 см [1–2].

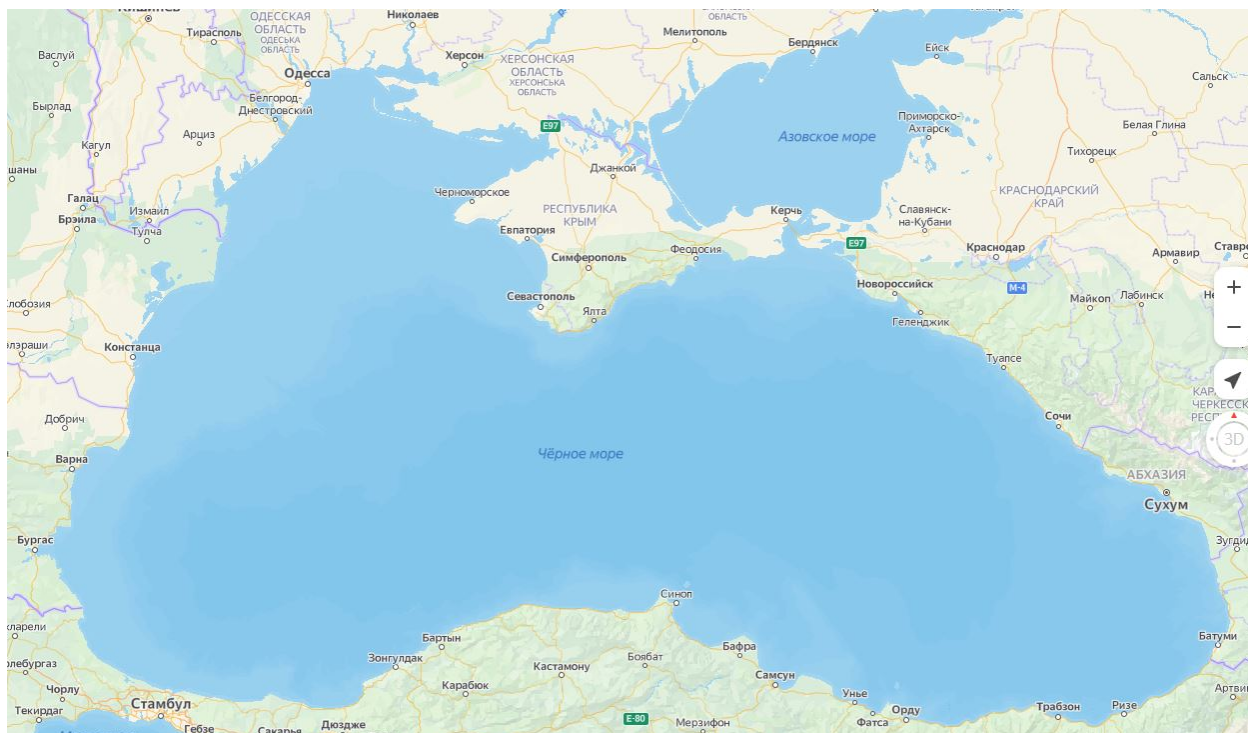


Рис. 1 Карта Чёрного моря

1.1. Основные элементы циркуляции в Чёрном море.

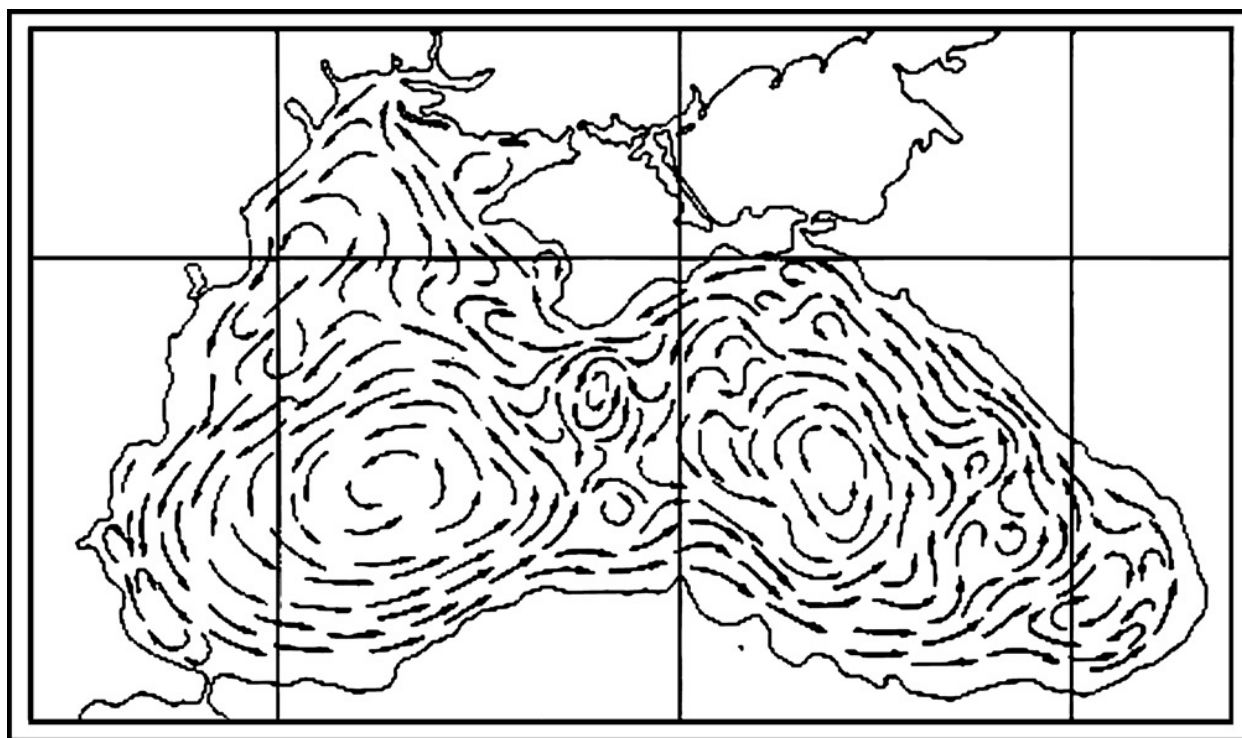


Рис. 2 схема течений Чёрного моря.

«Очки Книповича», главная среднебассейновая циркуляция в виде двух огромных петель, названная по имени автора и основателя промысловой океанологии –Н.М.Книповича (1862-1939). Рис. 2.

На сегодняшний день в Черном море выделяют три основных типа циркуляции течений: крупномасштабную, мезомасштабную и мелкомасштабную. К первой относятся: ОЧТ, два циклонических круговорота (восточный и западный). Ко второму типу: антициклонические вихревые структуры и циклонические вихри, грибовидные, струи с горизонтальным размером в 20–100 км, превышающим бароклинный радиус деформации Россби $Rd \approx 15-20$ км в открытом К третьим: циклонические вихри, антициклонические вихревые структуры, грибовидные диполи с диаметрами менее, чем деформации Россби Rd .[3,4-5]

"Основными элементами крупномасштабной циркуляции вод Черного моря являются распространяющиеся по периферии моря в циклоническом направлении Основное черноморское течение (ОЧТ) со стрежнем, расположенным в среднем над континентальным склоном, а также западный и восточный циклонические круговороты. Эти элементы крупномасштабной циркуляции и (в общих чертах) мезомасштабной динамики были выявлены еще до начала широкого использования спутниковой информации, на основе гидрологических измерений/съемок, и нашли отражение на известных схемах циркуляции поверхностных вод Черного моря." [3,6-8]

Внедрение в практику черноморских исследований спутниковой информации значительно расширило понимание авторов особенностей мезомасштабной циркуляции Черного моря и сделало очевидным тот факт, что синоптическая картина течений в его поверхностном слое значительно сложнее, чем это следует из вышеупомянутых схем общей циркуляции. Анализ спутниковой информации и комплексные исследования на основе оперативного использования спутниковых данных и гидрологических съемок с мезомасштабным пространственным

разрешением дали представления о пространственно-временных и кинематических характеристиках мезомасштабных структур, местах их наиболее частого образования и эволюции, факторах, способствующих их образованию, об их влиянии на структуру ОЧТ и роли в горизонтальном и вертикальном водообмене в деятельном слое Черного моря.[3]

1.1.1. Основные типы циркуляции в прибрежной зоне в российском секторе Черного моря.

Первый вид течений наблюдается в осенний период с сентября-октября и продолжается по апрель месяц включительно. В это время года в северной и центральной части Черного моря повышается скорость и сила ветра. Основное черноморское течение устойчиво. В южной части образование вихревых структур уменьшается, увеличивается приток со стороны кавказского побережья. На севере моря возможны появления мезомасштабных вихревых структур.

Второй вид течений наблюдается только в мае месяце и в августе. Проявляется в виду прерывистых, изменчивых ветров и уменьшения притока со стороны кавказского побережья. ОЧТ не устойчиво, на юге моря течения расширяются, у побережья центральной части образуются меандры и антициклонические пространственные структуры, которые могут отрываться от прибрежной зоны и образовывать изолированные структуры.

Третий вид течений (Летний) наблюдается при значительном и продолжительном снижении ветровой активности и притока вод притока со стороны кавказского побережья. ОЧТ мало активно, меандрирует, происходит разветвление, снижаются прибрежные течения. В центре появляются значительные антициклонические пространственные структуры.

1.2. Виды вихревых структур

Как известно, циркуляционные движения в океане включают круговороты общей циркуляции океана, циркуляции синоптических масштабов (ринги и вихри открытого океана) и мелкомасштабные циркуляции. Основной вклад в циркуляцию прибрежной зоны вносят синоптические и мелкомасштабные вихревые структуры. Синоптические вихри по способам их образования можно разделить на следующие категории:

- фронтальные, или ринги, образующиеся путем отсечения меандров от струйных течений;
- свободные, или вихри открытого океана, порождаемые бароклинной неустойчивостью крупномасштабных течений;
- топографические, или вихри, образующиеся при обтекании рельефа дна;
- вихри, индуцированные атмосферными воздействиями - полями вихря напряжения трения ветра и атмосферного давления на поверхности океана.

Мелкомасштабные вихри имеют диаметры несколько десятков километров, а на их фоне могут расти пространственные вихревые структуры еще меньших размеров. Подобные вихри, как правило, имеют спиралеобразный вид, за что получили название «вихри закручивания» (“spin-off eddies”). Они часто образуются в бухтах и заливах, а также в узких проливах.

По направлению вращения вихри делят на циклонические и антициклонические.

Мелкомасштабные вихри в прибрежной зоне образуются как того, так и другого вида.[9]

Из научных статей по данной теме известно:

“В классической картине образования вихревых структур в Черном море, одним из основных источников вихреобразования в прибрежной зоне считается гидродинамическая неустойчивость Основного черноморского течения (ОЧТ), проявляющаяся в его меандрировании, образовании замкнутых кольцевых течений (рингов) с возможной последующей их трансформацией в вихри открытого моря.”[10]

“Анализ межсезонных изменений ОЧТ показал, что усиленная мезомасштабная динамика и продуцируемый ею поперечный к берегу водообмен наблюдается летом в периоды ослабления ОЧТ.”[11]

“Определенные районы прибрежной акватории Черного моря вследствие сочетания особенностей батиграфии и очертаний береговой линии настолько благоприятны для образования мезомасштабных вихрей, что последние наблюдаются там практически постоянно (так называемые квазистационарные вихри), и некоторые из них получили собственные имена (Кавказский, Батумский, Севастопольский и пр.).”[12-14]

К квазистационарному типу вихрей относятся прибрежные антициклонические ПАВ и кольцевые течения (ринги). Самый крупномасштабный вихревой элемент циркуляции поверхностных вод Черного моря – это ОЧТ.

К нестационарному – вихри, образующиеся из-за неоднородности береговой линии; вихревые цепочки и грибовидные течения. Одной из самых совершенных форм проявления нестационарных вихревых структур являются вихревые цепочки. Еще одной широко распространенной формой нестационарных вихревых движений являются грибовидные течения. Наибольшее количество грибовидных течений образуется в двух районах акватории Черного моря. Первый из них расположен вдоль Кавказского побережья, а второй – по линии Евпатория – Бургас.[15]

Другим, в некоторой степени эндемичным для Черного моря типом вихрей являются прибрежные антициклонические вихри (ПАВ), которые образуются в так называемой прибрежной зоне конвергенции между стрежнем ОЧТ и берегом.[16-19]

Типом вихревых структур, промежуточным между ПАВ и нестационарными вихрями, являются вихри, образующиеся вдоль восточной половины южного побережья моря из-за неоднородности береговой линии.[15]

2. Дистанционные методы наблюдения за вихревыми структурами

“Спиральные вихри на поверхности океана с диаметром около 10 км и менее были открыты более 30 лет назад в ходе космической программы «Аполлон», когда первые фотографии таких вихрей были сделаны в зоне солнечного блика.”[20,21-23]

В конце 1970-х эти наблюдения астронавтов были подтверждены на основе изображений, полученных радиолокатором с синтезированной апертурой антенны (РСА) [24], а в дальнейшем с помощью радиолокационных изображений (РЛИ) и непосредственных наблюдений из космоса был выявлен повсеместный характер распространения этого типа вихрей в Мировом океане.[20]

В результате многочисленных исследований было установлено, что спиральные вихри наблюдаются в различных районах Мирового океана; в обоих полушариях; как в прибрежной зоне, так и в открытом море. Как правило, они проявляются в виде хаотично ориентированных и плотно упакованных вихревых кластеров, но могут представлять и одиночные вихри, а также достаточно упорядоченные цепочки таких вихрей. [23]

Практически все спиральные вихри циклонические.

Изучение мелкомасштабных вихрей Черного моря имеет не только научное, но и в значительной мере практическое значение вследствие того, что эти структуры принимают активное участие в процессе горизонтального водообмена, что особенно существенно в условиях все возрастающего антропогенного стресса на экосистемы этих морей. [22]

Последующие годы характеризуются стремительным развитием как непосредственно космических средств и методов ДЗЗ, так и методов интерпретации и усвоения получаемой при этом информации. В дополнение к оптическим системам ДЗЗ пришли радиофизические: пассивные (радиометры) и активные (альтиметры, скаттерометры и радиолокационные станции обзорного и детального наблюдения).

Средства дистанционного зондирования земли в настоящее время предлагают обширнейшие возможности для исследования гидродинамических процессов, происходящих в поверхностном слое морских вод. Благодаря регулярному поступлению объективной информации с высоким пространственным разрешением и широкой полосой обзора стало возможно изучение вихревых структур самого широкого пространственного спектра.

Использование спутниковой информации для исследования гидродинамических структур возможно в двух различных направлениях.

В рамках первого из них возможно проведение подробного исследования зарождения и эволюции отдельного вихря и извлечение детальной информации о его индивидуальных особенностях при использовании достаточно кратковременных серий спутниковых изображений. Этот подход на протяжении длительного времени успешно применяется по отношению к вихревым структурам Черного моря.

В рамках второго подхода анализу подвергается большое количество вихревых структур на основе достаточно длительных наблюдений. Вследствие большого объема анализируемых данных подробное отслеживание всех свойств вихревых структур (например, времени жизни, скорости перемещения, орбитальной скорости и пр.) уже не представляется возможным. Зато в этом случае набирается материал для обобщающего статистического анализа обнаруженных вихрей.

В силу относительной труднодоступности спутниковых данных за длительные периоды времени и значительной трудоемкости анализа таких данных публикации с применением этого подхода значительно более редки.

[25-30]

2.1. Характеристика используемых данных в оптическом диапазоне

В целом наблюдения приборов дистанционного зондирования носят количественный характер. Необработанные данные собираются по заранее заданным координатам и спецификациям датчика. Датчики регистрируют

яркость, которая обрабатывается в необработанные изображения для дальнейшего анализа и интерпретации. При предварительной обработке изображений выполняется совместная регистрация и фазовая калибровка. Например, обработка изображения включает в себя несколько этапов, таких как сжатие по дальности, а затем сжатие по азимуту. После этого изображения также имеют географическую привязку. Интерпретация и анализ спутниковых изображений обычно выполняется с использованием профессионального программного обеспечения для дистанционного зондирования или специальных алгоритмов.

Одной из основных характеристик любых спутниковых снимков является пространственное разрешение. Гонка за улучшением пространственного разрешения набирает обороты, в то время как такое ограничение, как полоса пропускания данных — количество данных, которое может быть передано в течение периода времени, — ограничило спектральные возможности многих спутников высокого разрешения только четырьмя обычными видимыми и почти инфракрасные диапазоны (это изображение обычно состоит из красного, зеленого, синего и ближнего инфракрасного диапазонов).

Под пространственным разрешением понимается минимальное расстояние между двумя объектами, которое можно различить на изображении. Требуемое разрешение пространственного снимка зависит от конечной цели создания исходной спутниковой съемки и размера контролируемой области. Разрешение любого спутника для съемки Земли — это, практически говоря, кратчайшее измерение на земле, формируемое в один пиксель. Разрешение в 1 метр означает, что в идеальных условиях (сверху, глядя вниз) каждый пиксель изображения соответствует 1 м^2 площади земли.

Пространственное разрешение изображения определяется комбинацией высоты полета или орбиты и характеристик датчика. Различные атрибуты датчика могут быть изменены для лучшего обслуживания отдельных случаев использования. Пространственное разрешение изображений, полученных с помощью спутниковых сенсорных систем, обычно выражается в метрах.

Например, разрешение 3 метра означает, что два объекта длиной или шириной 3 метра, расположенные рядом, могут быть отделены (разрешены) друг от друга на выходном изображении.

В технологии дистанционного зондирования пространственное разрешение представляет собой не только возможность идентифицировать присутствие двух объектов, но и их свойства. Как и в цифровой фотографии, более высокое разрешение подразумевает лучшую видимость деталей, представленных на изображении. При дистанционном зондировании пространственное разрешение ограничено дифракцией, аберрациями, несовершенной фокусировкой и атмосферными искажениями. Важно учитывать, что на окончательное разрешение влияют эти факторы. Различные объекты могут быть выделены из изображений с разным разрешением. Например, суда можно обнаруживать уже на изображениях РСА с разрешением 25 x 25 метров, но уже на изображениях с разрешением 3x3 метра уже можно определить направление и, в некоторых случаях, скорость судна.

Разрешение спутниковой съемки может быть пространственным, спектральным, временным или радиометрическим. Для радиолокационных изображений пространственное разрешение в диапазоне 5-100 метров классифицируется как высокое разрешение, разрешение менее 5 метров классифицируется как очень высокое. Для оптических изображений пространственное разрешение считается низким, если оно превышает 80 метров, средним, если оно находится в диапазоне от 10 до 80 метров, высоким, если оно меньше 10 метров, и очень высоким разрешением считается все, что ниже 1 метра.

Временное разрешение дистанционного изображения описывает период времени, когда оно было получено.

Спутниковая съемка на основе радара является экономичным решением для частого покрытия, поскольку время прохождения не зависит от облачности и погодных условий. Этот цикл съемки фиксируется параметрами орбиты

спутника, которые определяют, каким может быть интервал между съемками.

Спутники с оптическими датчиками представляют собой технологию пассивного дистанционного зондирования. Они могут генерировать изображения только тех частей Земли, которые отражают солнечный свет. В темную или облачную погоду оптическая съемка невозможна или возвращает изображение плохого качества. Оптические данные включают видимые диапазоны волн и создают изображения, похожие на то, как человеческий глаз воспринимает мир. В дополнение к видимому свету оптический датчик улавливает свет в ближнем и среднем инфракрасном диапазоне, который не виден человеческому глазу, но содержит важную информацию о характеристиках поверхности. Полученный спектр отражения затем анализируется.

Пассивный датчик регистрирует излучение своей цели в пределах телесного угла зрения. Длины волн ближнего, короткого и среднего инфракрасного диапазона подходят для различения типов растительности со средним разрешением, где размер пикселя варьируется от 10 x 10 до 30 x 30 метров. Оптические спутниковые данные можно комбинировать с лазерными данными, что дает дополнительную информацию о характеристиках местности или растительности.

В дополнение к фактической отражательной способности поверхности цели яркость, определяемая оптическим датчиком, зависит от многих факторов, включая атмосферные условия (ясная или облачная погода), направление источника освещения (угол солнца), рассеяние цели (шероховатая/гладкая поверхность), ориентация поверхности (влияет на топографическое затенение и/или повышенное излучение на холмистой местности) и угол обзора датчика (смотрящий в надире или вне надира).

Процесс превращения спутниковых данных в полезную информацию происходит в несколько этапов. Поскольку спутники могут быть оснащены датчиками разных типов, содержание данных полученных изображений

также различается. Следовательно, источник необработанных данных, инструменты анализа и процессы, необходимые для превращения изображений в ценную информацию, должны выбираться тщательно, начиная с цели и конечного использования информации.

Недавние достижения в методах анализа открыли широкие возможности для применения машинного обучения и искусственного интеллекта для превращения спутниковых изображений в полезную информацию.

2.2. Описание съёмочной аппаратуры спутников Landsat 8-9, Sentinel-2 (A/B) и Terra/Aqua (Modis).

Landsat 8-9

Американская спутниковая программа Landsat — одна из наиболее продолжительных и успешных программ исследования Земли из космоса. В рамках программы было запущено 9 спутников, один из запусков не был удачным (Landsat-6). [32]

Серия успешных миссий Landsat обеспечила спутниковое покрытие континентальной поверхности Земли с 1972 года. Данные этих миссий представляют собой самый продолжительный непрерывный отчет о поверхности Земли, видимой из космоса.

Целью Landsat является продолжение сбора, архивирования и распространения многоспектральных изображений, обеспечивающих глобальное, синоптическое и повторяющееся покрытие земной поверхности в масштабе, позволяющем обнаруживать, дифференцировать, характеризовать и отслеживать естественные и антропогенные изменения с течением времени. Программные цели Landsat изложены в разделе 15 главы 82 Кодекса Соединенных Штатов Америки "Политика дистанционного зондирования земель" (позаимствована из Закона о политике в области дистанционного зондирования земель 1992 года). Этот принцип требует, чтобы проект Landsat предоставлял данные в будущем, которые в достаточной степени согласуются с предыдущими данными Landsat, чтобы позволить обнаружить и количественно охарактеризовать изменения в

поверхности Земли или на ней. Данные Landsat являются уникальным ресурсом для тех, кто работает в сельском хозяйстве, геологии, лесоводстве, региональном планировании, образовании, картировании и исследованиях глобальных изменений. Изображения Landsat также имеют неоценимое значение для Международной хартии по космосу и крупным катастрофам, комплексного реагирования на чрезвычайные ситуации и оказания помощи в случае стихийных бедствий для спасения жизни людей. [33]

Landsat 8 (ранее Landsat Data Continuity Mission, или LDCM) был запущен на ракете Atlas-V с авиабазы Ванденберг, штат Калифорния, 11 февраля 2013 года. Спутник был построен на базе платформы Orbital LEOSTar-3 компанией Orbital Sciences Corporation. На спутнике установлены Operational Land Imager (OLI) и Thermal Infrared Sensor (TIRS). OLI измеряет в видимом, ближнем инфракрасном и коротковолновом инфракрасном диапазонах (VNIR, NIR и SWIR) спектра. TIRS измеряет температуру поверхности земли в двух тепловых диапазонах с помощью новой технологии, которая применяет квантовую физику для обнаружения тепла. Изображения Landsat 8 имеют 15-метровое панхроматическое и 30-метровое мультиспектральное пространственное разрешение на полосе шириной 185 км (115 миль).[34]

С развитием программы все большее внимание уделяется научной полезности данных, что сопровождается более строгими требованиями к характеристике приборов и данных, калибровке и проверке.

Landsat 9 был успешно запущен в понедельник, 27 сентября 2021 года, с базы космических сил Ванденберг в Калифорнии. Данные Landsat 9 находятся в открытом доступе от Геологической службы США (USGS).

С момента запуска инженеры миссии НАСА и ученые в сотрудничестве с Геологической службой США проверяют спутник на прочность: направляют его на орбиту, калибруют детекторы и собирают тестовые изображения. Когда спутник полностью сертифицирован, оперативное управление им передается Геологической службе США (USGS).[35]

С запуском Landsat 9 миссия продолжает свое наследие наблюдения за ключевыми природными и экономическими ресурсами с орбиты. Приборы на борту Landsat 9 являются улучшенными копиями тех, которые в настоящее время собирают данные на борту Landsat 8. Landsat 9 оснащен двумя приборами: Operational Land Imager 2 (OLI-2), который собирает изображения земных ландшафтов в видимом, ближнем инфракрасном и коротковолновом инфракрасном свете, и Thermal Infrared Sensor 2 (TIRS-2), который измеряет температуру поверхности земли. Улучшения Landsat 9 включают более высокое радиометрическое разрешение для OLI-2 (14-битное квантование увеличено с 12-битного для Landsat 8), что позволяет датчикам обнаруживать более тонкие различия, особенно в более темных областях, таких как вода или густые леса. Благодаря более высокому радиометрическому разрешению Landsat 9 может различать 16 384 оттенка на заданной длине волны. Для сравнения, Landsat 8 предоставляет 12-битные данные и 4096 оттенков, а Landsat 7 обнаруживает только 256 оттенков с 8-битным разрешением. В дополнение к усовершенствованию OLI-2, TIRS-2 значительно уменьшил рассеянный свет по сравнению с тепловым инфракрасным датчиком (TIRS) Landsat 8, что обеспечивает улучшенную атмосферную коррекцию и более точные измерения температуры поверхности. Тепловой инфракрасный датчик 2 (TIRS-2) Landsat 9 измеряет тепловое излучение, излучаемое земной поверхностью в двух тепловых инфракрасных диапазонах, используя ту же технологию, которая использовалась для TIRS на Landsat 8, однако TIRS-2 является улучшенной версией TIRS Landsat 8. как в отношении класса прибора, так и в плане минимизации рассеянного света. TIRS-2 обеспечивает два спектральных диапазона с максимальным расстоянием наземной выборки, как внутри пути, так и поперек пути, 100 м (328 футов) для обоих диапазонов. TIRS-2 обеспечивает внутренний источник калибровки черного тела, а также возможности обзора пространства.

Срок службы как OLI, так и TIRS составляет 5 лет, хотя космический корабль имеет запас расходных материалов более 10 лет. Как и его предшественники, Landsat 9 является совместной миссией НАСА и Геологической службы США (USGS).[36]

Коллекция снимков Landsat 8-9 уровня 2 включает в себя сцены как Landsat 8, так и последнего запущенного спутника Landsat 9. Landsat 8 и Landsat 9 работают как группировка спутников. Это означает, что эти два почти идентичных спутника работают в тандеме как единая система. Каждый спутник вращается вокруг Земли каждые 16 дней, при этом их две орбиты смещены по времени, так что каждое место на планете отображается каждые восемь дней. Характеристика каналов спутника представлена в Табл.1 [36]

Список диапазонов Landsat 8-9 Operational Land Imager (OLI) и Thermal Infrared Sensor (TIRS)			
№	Канал	Длина волны (мкм)	Разрешение пикселя (м)
1	Побережья и аэрозоли (Coastal aerosol)	0,433–0,453	30
2	Синий (Blue)	0,450–0,515	30
3	Зеленый (Green)	0,525–0,600	30
4	Красный (Red)	0,630–0,680	30
5	Near Infrared (NIR) (Ближний ИК)	0,845–0,885	30
6	SWIR 1 (Ближний ИК)	1,560–1,660	30
7	SWIR 2 (Ближний ИК)	2.100–2.300	30
8	Панхроматический (Panchromatic)	0,500–0,680	15
9	Перистые (Cirrus)	1,360–1,390	30
10	Термальный (Дальний ИК)	10,6-11,2	100
11	Термальный (Дальний ИК)	11,5-12,5	100

Табл.1 Характеристика каналов Landsat 8-9

SENTINEL-2 (A/B)

Sentinel-2A/2B — это миссия по наблюдению за Землей в рамках программы Европейского Союза - Copernicus, которая систематически получает оптические изображения с высоким пространственным разрешением над сушей и прибрежными водами. Миссия представляет собой созвездие с двумя спутниками-близнецами. Copernicus — это новое название Европейской программы наблюдений, ранее известной как Глобальный мониторинг окружающей среды и безопасности (GMES).

Миссия поддерживает широкий спектр услуг и приложений, таких как сельскохозяйственный мониторинг, классификация растительного покрова, управление чрезвычайными ситуациями или качества воды.

Sentinel 2A/2B обеспечивает оптические изображения высокого разрешения и обеспечивает непрерывность текущих миссий SPOT и Landsat. Четыре диапазона с разрешением 10 метров обеспечивают непрерывность таких миссий, как SPOT-5 или Landsat-8, и отвечают требованиям пользователей, в частности, для базовой классификации земного покрова. Шесть полос с разрешением 20 м удовлетворяют требованиям расширенной классификации земного покрова и извлечения геофизических параметров. Диапазоны на 60 м предназначены в основном для атмосферных поправок и скрининга перистых облаков.

Миссия Sentinel-2 обеспечивает глобальное покрытие поверхности земли каждые 10 дней с одного спутника и 5 дней с 2 спутниками, что делает изображения и данные ценными для использования в текущих исследованиях.

Спутники оснащены современным прибором Multispectral Imager (MSI), который обеспечивает получение оптических изображений с высоким разрешением.

Характеристика каналов спутника представлена в Табл. 2[31]

Список диапазонов SENTINEL-2 (A/B) с сенсором MSI (MultispectralInstrument)
--

№	Канал	Длина волны (нм)	Разрешение пикселя (м)
B1	Побережья и аэрозоли (Ultra Blue (Coastal and Aerosol))	443	60
B2	Синий (Blue)	490	10
B3	Зеленый (Green)	560	10
B4	Красный (Red)	665	10
B5	Visible and Near Infrared (VNIR) (Ближний ИК)	705	20
B6	Visible and Near Infrared (VNIR) (Ближний ИК)	740	20
B7	Visible and Near Infrared (VNIR) (Ближний ИК)	783	20
B8	Visible and Near Infrared (VNIR) (Ближний ИК)	842	10
B8A	Visible and Near Infrared (VNIR) (Ближний ИК)	865	20
B9	Коротковолновое инфракрасное излучение (Short Wave Infrared (SWIR))	940	60
B10	Коротковолновое инфракрасное излучение (Short Wave Infrared (SWIR- Cirrus))	1375	60
B11	Коротковолновое инфракрасное излучение (Short Wave Infrared (SWIR))	1610	20
B12	Коротковолновое инфракрасное излучение (Short Wave Infrared (SWIR-2))	2190	20

Табл.2 Характеристика каналов Sentinel-2 (A/B)

Terra/Aqua (Modis).

Программа NASA Earth Observing System (EOS) была задумана в 1980-х годах и начала формироваться в начале 1990-х. EOS состоит из серии скоординированных полярно-орбитальных спутников, предназначенных для мониторинга и понимания ключевых компонентов климатической системы и

их взаимодействия посредством долгосрочных глобальных наблюдений. Миссии EOS сосредоточены на следующих областях науки о климате: радиация, облака, водяной пар и осадки; океаны; парниковые газы; поверхностная гидрология и экосистемные процессы; ледники, морской лед и ледяные щиты; озон и стратосферная химия; природные и антропогенные аэрозоли. [39]

Спутниковые платформы TERRA и AQUA являются частью Американской системы наблюдения Земли NASA EOS (Earth Observing System). Оба следуют стандартной околополярной солнечно-синхронной орбите на высоте 705 км и частотой около 14,6 циклов в день со следующими различиями: TERRA: запущен в декабре 1999 года, утренняя орбита (10 часов 30 минут на экваторе, нисходящий узел). AQUA: запущен в мае 2002 года, дневная орбита (13 часов 30 минут на экваторе, восходящий узел). Обе платформы оснащены одним и тем же MODIS-датчиком (спектрометром изображений с умеренным разрешением), который одновременно работает в 3 разных режимах. [40] Характеристика каналов спутника представлена в Табл. 3 [39]

Список диапазонов MODIS (Moderate-resolution Imaging Spectroradiometer – сканирующий спектрорадиометр среднего разрешения)			
№	Канал	Длина волны	Разрешение пикселя (м)
1-2	Контуров облаков и земных объектов	620-670 (нм) 841-876 (нм)	250
3-7	Свойства облаков и земных объектов	459 – 479 (нм) 545 – 565 (нм) 1230 – 1250(нм) 1628 – 1652(нм) 2105 – 2155(нм)	500
8-16	Цвет океана, Фитопланктон и Биогеохимия океана	405 – 420 (нм) 438 – 448 (нм) 483 – 493 (нм) 526 – 536 (нм) 546 – 556 (нм) 662 – 672 (нм) 673 – 683 (нм) 743 – 753 (нм) 862 – 877 (нм)	1000

17-19	Атмосферный водяной пар	890 – 920(нм) 931 – 941 (нм) 915 – 965 (нм)	1000
20-23	Температура облаков и поверхности Земли	3,660 - 3,840(мкм) 3,929 - 3,989 (мкм) 3,929 - 3,989 (мкм) 4.020 - 4.080 (мкм)	1000
24-25	Температура воздуха	4,433 - 4,498 (мкм) 4,482 - 4,549 (мкм)	1000
26-28	Перистые облака, водяной пар	1,360 - 1,390 (мкм) 6,535 - 6,895 (мкм) 7,175 - 7,475 (мкм)	1000
29	Облачные свойства	8.400 - 8.700 (мкм)	1000
30	Озон	9,580 - 9,880 (мкм)	1000
31-32	Температура облаков и поверхности Земли	10.780 - 11.280(мкм) 11.770 - 12.270(мкм)	1000
33-36	Максимальная высота облаков	13.185 - 13.485 (мкм) 13.485 - 13.785 (мкм) 13.785 - 14.085 (мкм) 14.085 - 14.385 (мкм)	1000

Табл.3 Характеристика каналов Terra/Aqua (Modis).

3.Материалы и методы выполнения работы

3.1.Материалы

В данной работе использовалась коллекция сцен спутниковых снимков из публичной, облачной веб-платформы Sentinel Hub EO Browser. Доступ был выполнен средствами электронной информационной сети «интернет» по адресу обращения:-<https://apps.sentinel-hub.com/eo-browser/>.

Sentinel Hub EO Browser - это веб-платформа для облачной обработки данных дистанционного зондирования. Созданная в рамках программы Copernicus она направлена на создание глобального, непрерывного и легкодоступного источника спутниковых данных. Sentinel Hub EO Browser объединяет полный архив спутников Sentinel, а также миссий Landsat 5, 7 и 8, продуктов Envisat Meris, Proba-V и MODIS. Браузер можно использовать для визуализации индексов, таких как NDVI, NDWI и индекс влажности, и есть возможность импортировать пользовательские сценарии, написанные на JavaScript или Python.

В процессе работы был проанализирован архив спутниковых снимков за период с мая 2017г., по апрель 2022г., полученных с КА Landsat 8-9, Sentinel-2 (A/B), Terra/Aqua (Modis). За этот период было изучено более 4000 сцен, подходящих по критериям отбора, которые позволили выявить вихревые структуры.

3.2.Методика работы

Ввиду специфики спутниковой съемки, из-за невозможности охвата одним снимком всей акватории моря, а также для удобства обработки данных, область исследования была разделена на «квадраты», с условной привязкой к населенным пунктам в качестве ориентира. Рис.3

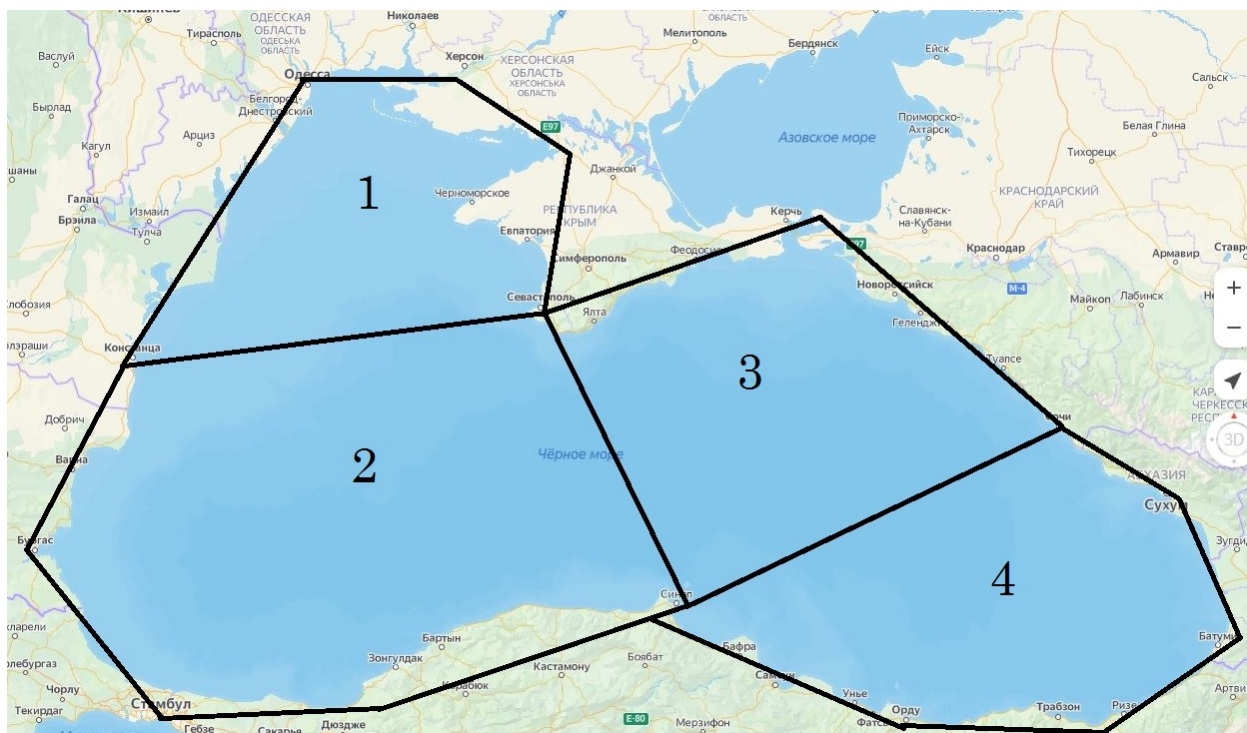


Рис.3 Зонирование области исследования.

На странице облачной веб-платформы Sentinel Hub EO Browser, галочками выбираем спутники, указываем временной промежуток, выставляем процент облачности на снимке. По завершении настроек переходим к поиску. Рис.4

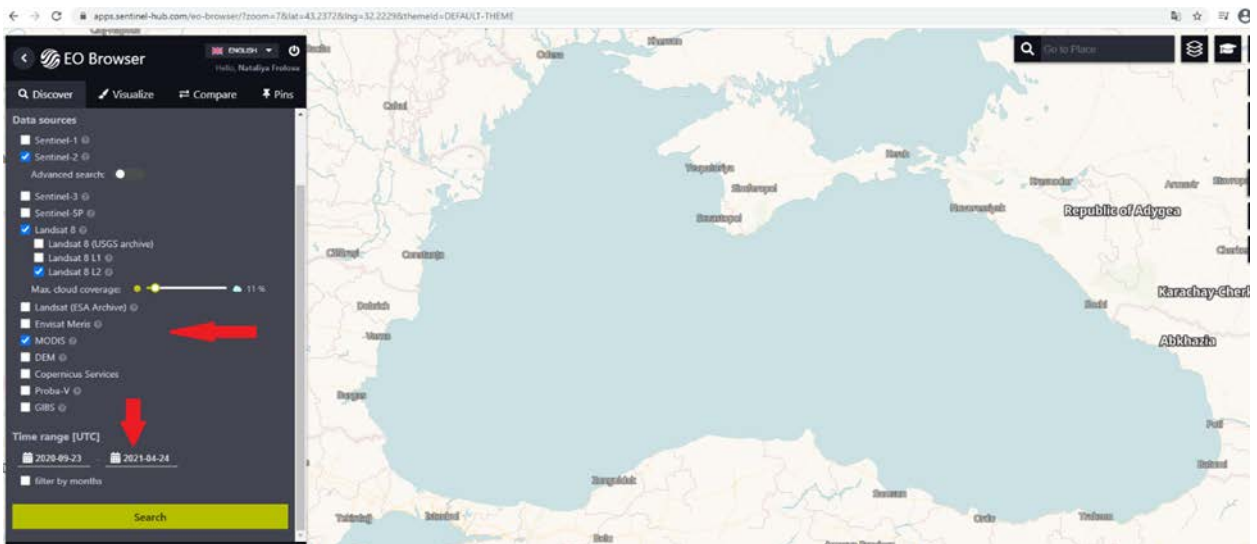


Рис.4 Настройка поисковой выборки.

В результатах поиска отбираем подходящие снимки. Рис.5

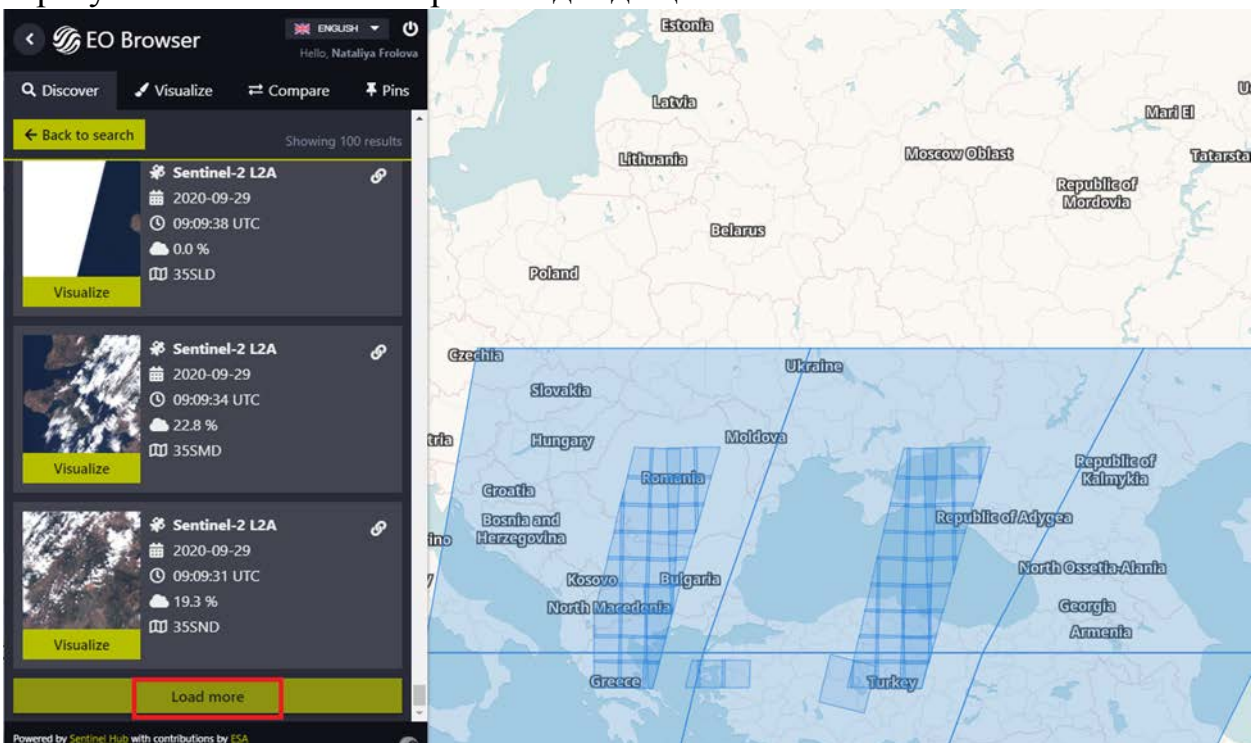


Рис.5 Сортировка результатов поиска.

После выбора снимка во вкладке «визуализация» можно выбрать комбинацию каналов, а во вкладке «эффекты» изменить гамму, контрастность, повысить или понизить частоты дискретизации, чтобы проявить вихревые структуры на снимке. Рис.6

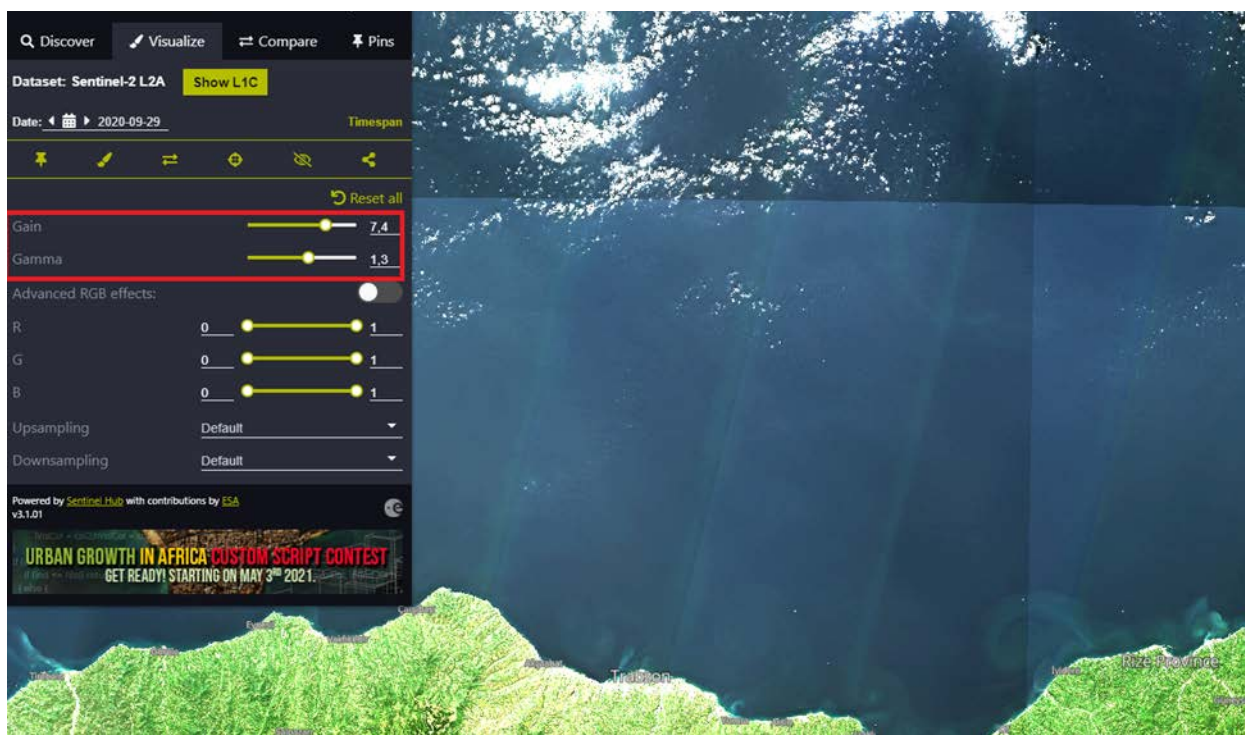


Рис. 6 Обработка изображения.

Измерение диаметра обнаруженных вихрей. Рис. 6а.

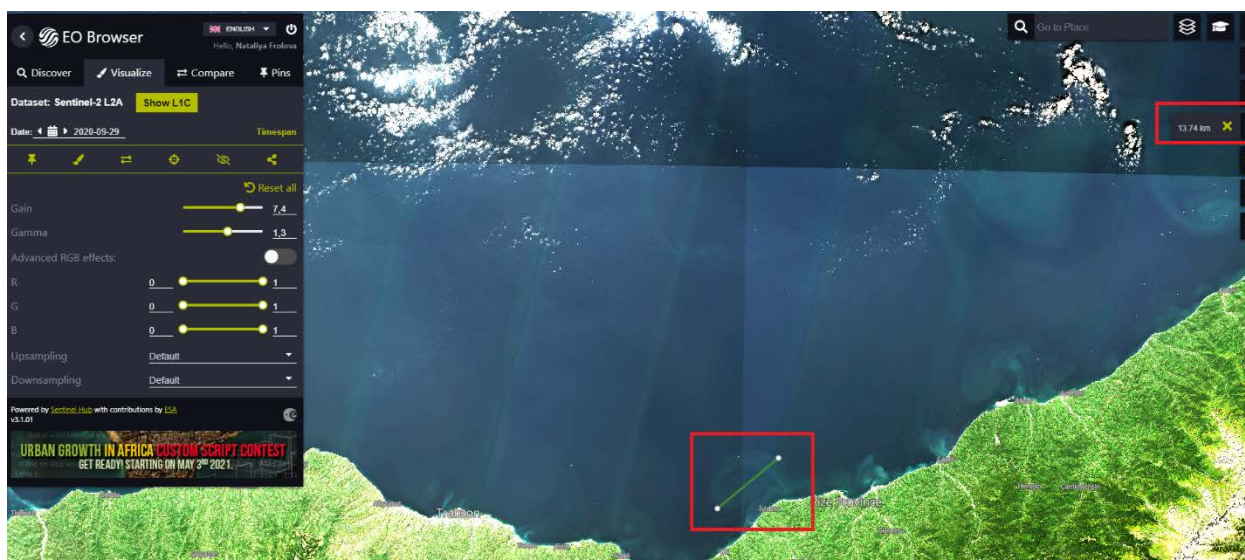


Рис. 6а. Обработка изображения.

4 Основные результаты анализа спутниковых снимков района Чёрного моря в оптическом диапазоне

4.1 Проявление вихревых структур на спутниковых снимках

Отобранные в ходе работы спутниковые снимки были изучены на наличие вихревых структур, классифицированы по типу вращения, размеру диаметра.

В ходе работы всего идентифицировано 4467 вихревых структур.

Подробные результаты представлены в Табл. 4

Количество идентифицированных вихрей по годам					
Май - декабрь 2017	Январь - декабрь 2018	Январь - декабрь 2019	Январь - декабрь 2020	Январь - декабрь 2021	Январь - апрель 2022
556	813	865	1222	848	163
Количество идентифицированных вихрей по месяцам					
Январь	163	Май	597	Сентябрь	451
Февраль	170	Июнь	600	Октябрь	278
Март	332	Июль	628	Ноябрь	154
Апрель	364	Август	594	Декабрь	136

Табл. 4 Результаты наблюдения вихревых структур

В процессе были выявлены следующие виды вихревых структур:

грибовидный, циклонический и антициклонический, вихревые цепочки.

Рис.7-11.

По типу закручивания спирали, вихрь соотносят к циклоническому или антициклоническому, движение по ходу часовой стрелки -

антициклонический тип, а против часовой – циклонический.

Количество идентифицированных циклонических вихрей в целом больше, чем антициклонических, так из 163-х вихрей в 2022г., 88 были циклоническими, 46 антициклоническими и 29 грибовидными.

Циклонические вихри существуют значительно меньшее время от нескольких часов до 1-2х суток, а антициклонические от недель до полугода.

На Рис.7., хорошо виден грибовидный вихрь по краям шляпки, которого слабовыраженные циклонический и антициклонический вихри, а у основания ножки достаточно крупный антициклонический вихрь, который вероятно его «питает», также на снимке можно увидеть несколько малых циклонических вихрей, которые уже «питают» антициклонический. Данные

вихревые структуры хорошо видно на спутниковых снимках, благодаря большого количества поверхностно-активного вещества в этом районе. Грибовидный вихрь расположен вдоль берега и вероятно вызван кратковременным ветряным импульсом, а виток более крупного, антициклонического, расположен у р. Гумиста и может быть вызван ее стоком, более мелкие циклонические могут быть образованы в следствии сдвиговой неустойчивости прибрежных течений связанная с особенностями береговой зоны.

К сожалению из-за погодных условий не удалось провести дальнейшее наблюдение за этими явлениями т.к высокая облачность в течении нескольких дней не позволяла визуализировать вихревые структуры в данном районе.

На рис. 12-14 можно увидеть антициклонический вихрь, который наблюдался 7 мая, размерами больше 50км в диаметре. Вокруг него образовались несколько циклонических вихрей значительно меньшего диаметра, не превышавшего 10км. На снимке видна разница в цветовой гамме, вероятно, указывающая на источник взвеси от прилегающих стоков рек (р. Тачли Крик (каменный ручей), р. Речушка Мачка, р. Речушка Кара, р. Разветвлённый поток). Данное проявление возможно из-за ослабшего ОЧТ и меандрирования, переменного ветра и расширения прибрежного течения.

Антициклонические вихри с радиусом более 40км обладают значительными орбитальными скоростями, их скорость вращения может достигать 25м/с. Известна зависимость орбитальной скорости от радиуса антициклонической вихревой структуры, которая равна 0,7. Вихревые структуры заметно увеличиваются в диаметре и повышают скорость вращения в первые 20% времени своего существования, достигнув 80% времени «жизни» эти параметры значительно падают. Данный вихрь, возможно, можно отнести к Анталийскому типу.

12 мая, антициклонический вихрь потерял около 20% от своего размера, а фигура приобрела черты диполя. Но уже 17 мая различимы только циклоны.



Рис.7. Грибовидный вихрь, размер шляпки 34км, август 2020

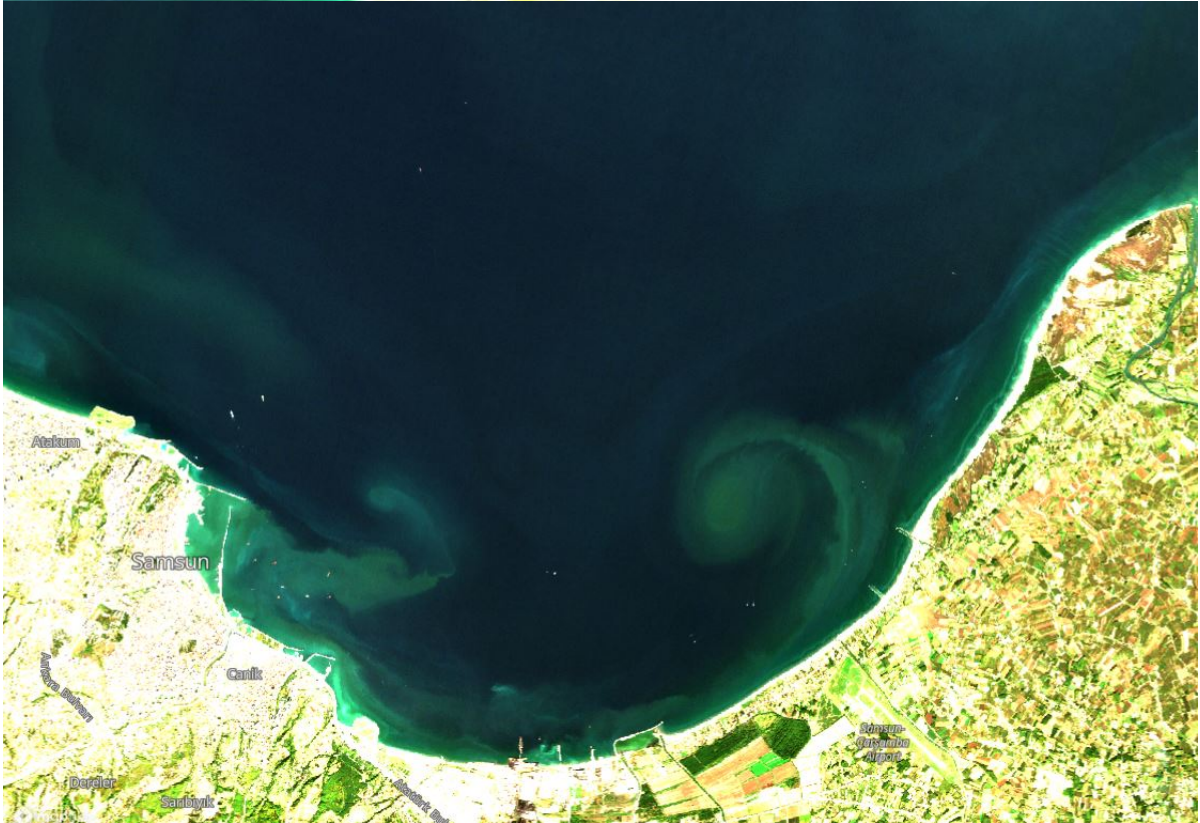


Рис.8.Циклонический вихрь, 4км, октябрь 2020



Рис.9. Антициклонический вихрь

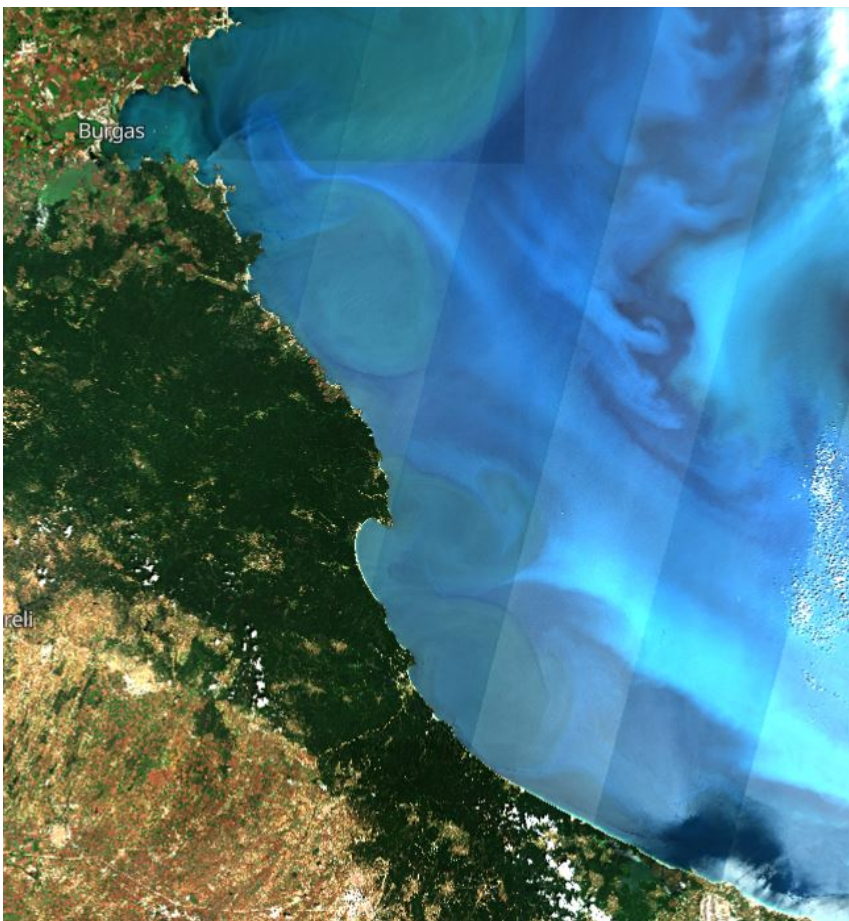


Рис.10. Прибрежные антициклонические вихри (Пав).

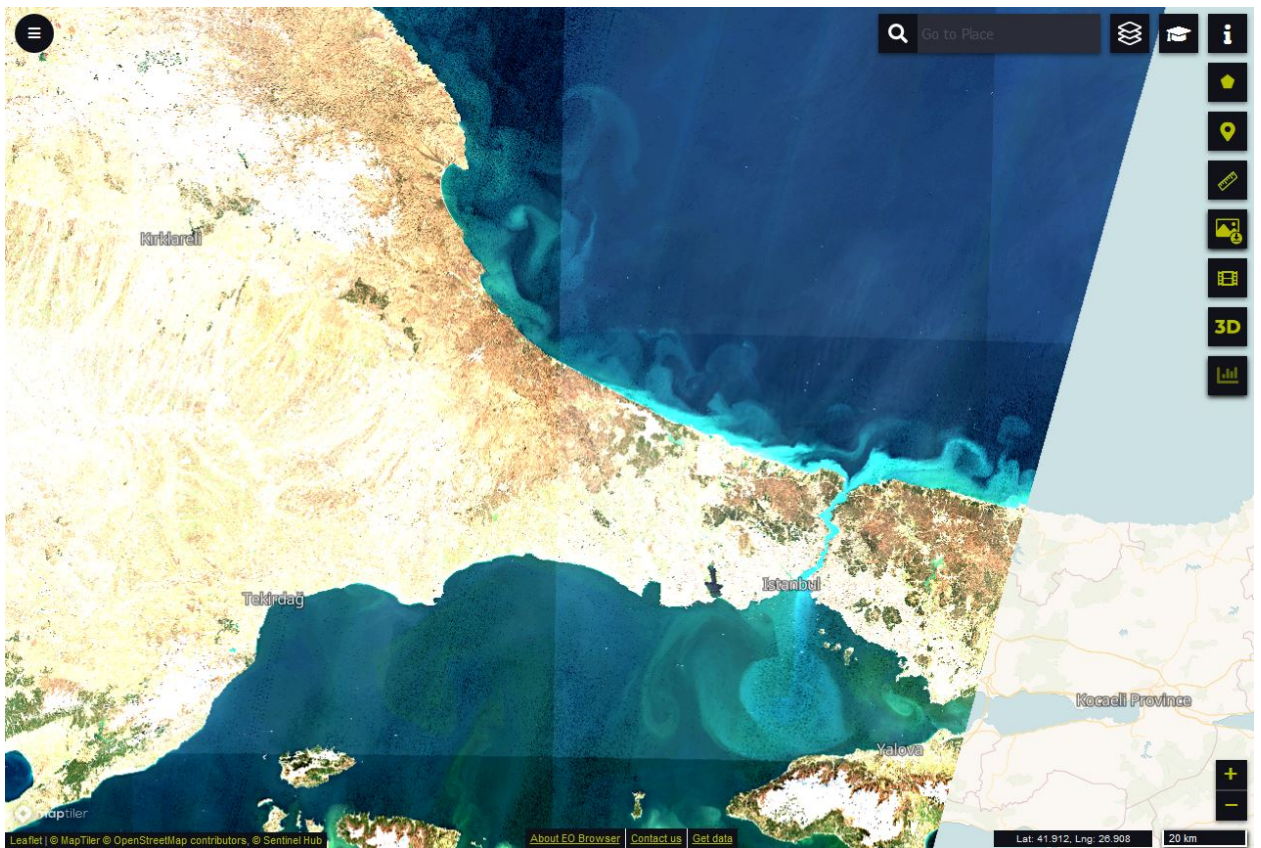


Рис.11. Грибовидный вихрь, прибрежные антициклонические вихри (ПАВ), и вихревая цепочка.



Рис.12. 7 мая



Рис.13. 12 мая

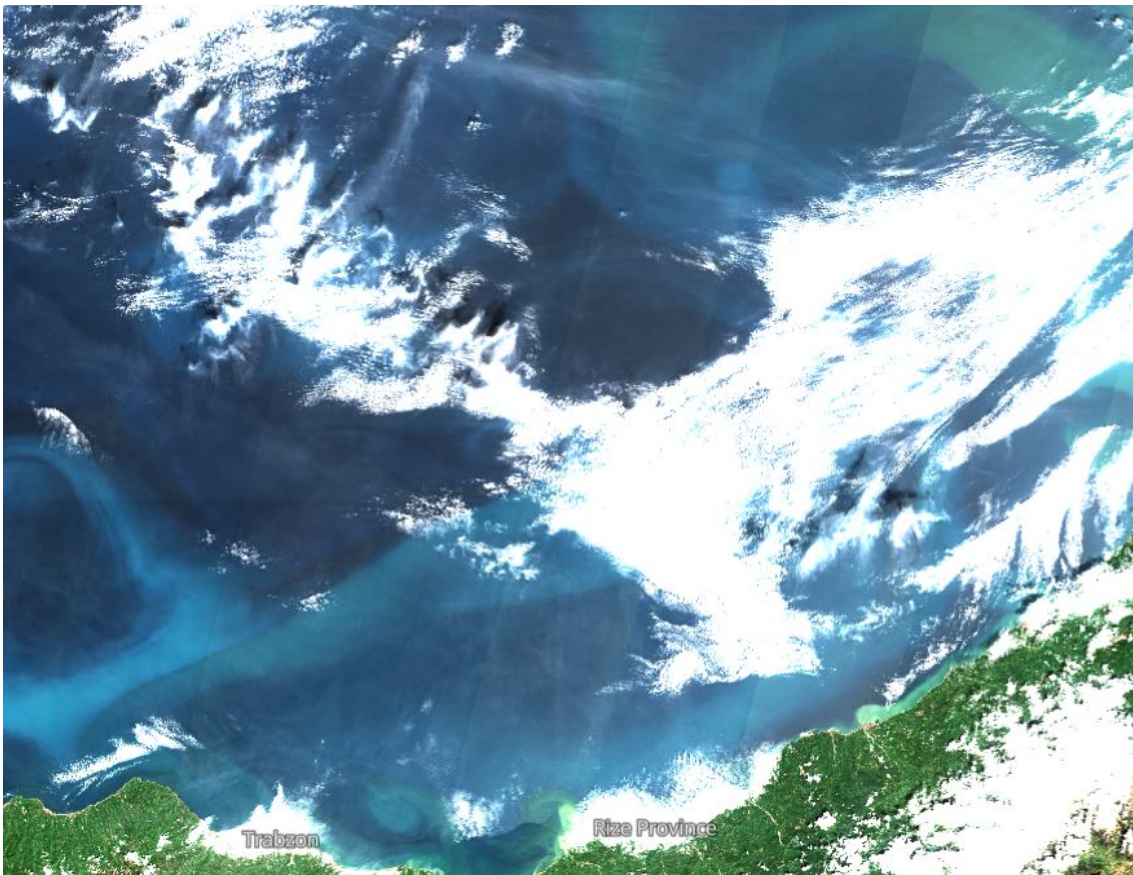


Рис.14. 17 мая

4.3 Пространственное распределение вихревых структур

За период наблюдения, по данным спутниковых снимков выявлено множество, преимущественно в акватории всего моря, циклонических вихрей. Грибовидные вихри чаще встречались у Кавказского побережья и имели значительные размеры 30-50км, а так же распространены по течению Евпатория-Бургас. Антициклонические вихри распространены вдоль восточного и южного побережья больше, чем на западном.

В ходе работы проводилось измерение диаметра визуализированной вихревой структуры. Результаты измерений представлены графически в виде гистограммы (Табл. 6)



Табл. 6– Гистограмма повторяемости диаметров вихревых структур за весь период исследования

Гистограмма демонстрирует, что среднее значение диаметра имеет широкий диапазон, от 2-х до 55км. Размер антициклонических вихрей составлял от 20 до 55км, а циклонических от 2х до 20, грибовидных -34-55км. При этом диаметр наиболее часто повторяющейся вихревой структуры составляет 8 километров.

4.3 Временная изменчивость вихревой активности в Чёрном море

Для удобства анализа частоты появления вихревых структур, на основе полученных данных построена гистограмма. Табл. 7



Табл. 7– Гистограмма повторяемости проявления вихревых структур по месяцам

Как видно по гистограмме наблюдаемость вихревых структур наиболее высока с марта по октябрь, а в летние месяцы достигает максимума с пиковыми значениями в июле. Это можно объяснить тем, что в этот период расширяются причины формирования поверхностных пленок. Среди них: нефтесодержащие судовые сбросы, прибрежные загрязнения, взвесь и грязевые пятна, которые поднимаются со дна на поверхность моря с пузырьками газа и переносом вместе с ними питательных веществ для фитопланктона, что приводит к экспоненциальному росту его численности и эффекту «цветения воды». Фитопланктон Черного моря многообразен и включает в себя виды диатомовых, зелёных, золотистых, динофитовых водорослей и цианобактерий. Вихревые структуры хорошо различимы в полях фитопланктона.

В зимнее время вихревые структуры также наблюдаются, но активность их ниже и выявить их сложнее т.к высокая облачность закрывает поверхность моря.

Возможными, причинами снижения активности вихревых структур в зимнее время может быть следующее:

В результате сезонного изменения жизнедеятельности фитопланктона снижается концентрация поверхностно-активных веществ т.к активная фаза фитопланктона зависит от освещённости, температуры воды и концентрации фосфора и азота. Поверхностные пленки подавляя поверхностное волнение, гасят рябь и как бы «вырисовывают» вихревые структуры, влияя на рассеивание электромагнитного сигнала. Тем самым с уменьшением содержания поверхностных пленок, снижается визуализация вихревых структур.

Другой причиной может быть изменение волнового механизма со сликового на сдвигово-волновой т.к в зимнее время повышается скорость поверхностного ветра и если в теплое время скорость ветра при сликовом механизме визуализации вихревых структур от 3-7 м/с позволяет удерживать поверхностным пленкам единую структуру, то в холодное время более высокая скорость ветра 7-12м/с эту структуру разрушает. При сдвигово-волновом механизме визуализации вихревых структур имеет значение интенсивность течения, геометрия съемки и скорость ветра.

Заключение

В процессе работы было выявлено 4467 вихревых структур, полученных на основе анализа спутниковых снимков с мая 2017 по апрель 2022г. В летние месяцы визуализированных вихревых структур было больше, чем в зимние, чаще встречались циклонические вихри, чем другие, по способу визуализации 99% был сликовый. Вихревые структуры были измерены по диаметру, большая их часть была в 8-18км и жизненным циклом в несколько суток. Анализировалась динамика пространственного перемещения. За период наблюдения, по данным спутниковых снимков выявлено множество, преимущественно в акватории всего моря, циклонических вихрей. Грибовидные вихри чаще встречались у Кавказского побережья и имели значительные размеры 30-50км, а так же распространены по течению Евпатория-Бургас. Антициклонические вихри распространены вдоль восточного и южного побережья больше, чем на западном.

СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Сухой В.Ф. Моря Мирового океана. - Л.: Гидрометеиздат, 1986. – 288 с.
2. Mee L., Jeftic L. AoA Region: Black Sea. - UNEP, 2010, 9 p.
3. Комплексный спутниковый мониторинг морей России / О. Ю. Лаврова, А. Г. Костяной, С. А. Лебедев и др.— М.: ИКИ РАН, 2011.— 480 с.
4. Журбас В. М., Зацепин А. Г., Григорьева Ю. В. и др. (2004) Циркуляция вод и характеристики разномасштабных течений в верхнем слое Черного моря по дрейфтерным данным // Океанология. 2004. Т. 44. № 1. С. 34–48.
5. Ginzburg A. I., Kostianoy A. G., Soloviev D. M., Stanichny S. V. (2000) Remotely sensed coastal/deep-basin water exchange processes in the Black Sea surface layer // Satellites, Oceanography and Society / Ed. D. Halpern. Elsevier, 2000. P. 273–287.
6. Блатов А. С., Булгаков Н. П., Иванов В. А. и др. (1984) Изменчивость гидрофизических полей в Черном море. Л.: Гидрометеиздат, 1984. 240с.
7. Овчинников И. М., Титов В. Б. (1990) Антициклоническая завихренность течений в прибрежной зоне Черного моря // Докл. АН СССР. 1990. Т. 314. № 5. С. 1236–1239.
8. Oguz T., Latun V. S., Latif M. A., Vladimirov V., Su H., Markov A., Ozsoy E., Kotovshchikov B., Eremeev V., Unluata U. (1993) Circulation in surface and intermediate layers of the Black Sea // Deep-Sea Research. 1993. V. 40. N. 8. P. 1597–1612. doi: 10.1016/0967-0637(93)90018-X.
9. Лаврова О.Ю. Стики как индикаторы вихревой активности в прибрежной зоне // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса: Физические основы, методы и технологии мониторинга окружающей среды, потенциально опасных объектов и явлений. М.: GRANPolygraph, 2005. Т. II. С. 118-123.

10. Гинзбург А.И., Зацепин А.Г., Костяной А.Г., Кривошея В.Г., Скирта А.Ю., Соловьев Д.М., Станичный С.В., Шеремет Н.А., Шиганова Т.А., Якубенко В.Г., Грегуар М. Антициклонические вихри в глубоководной восточной части Черного моря летом-осенью 1999 г. (спутниковые и судовые наблюдения) // Исследование Земли из космоса, 2001. №5. С. 3-11.
11. Зацепин А.Г., Голенко Н.Н., Корж А.О., Кременецкий В.В., Пака В.Т., Поярков С.Г., Стунжас П.А. Влияние динамики течений на гидрофизическую структуру вод и вертикальный обмен в деятельном слое Черного моря // Океанология, 2007. Т. 47. №3. С. 327-339.
12. Гинзбург А.И., Контарь Е.А., Костяной А.Г., Кривошея В.Г., Соловьев Д.М., Станичный С.В., Лаптев С.Ю. Система синоптических вихрей над свалом глубин в северо-западной части Черного моря летом 1993 г. (спутниковая и судовая информация) // Океанология, 1998. Т. 38. №1. С. 56-63.
13. Stanev E.V. Understanding Black Sea Dynamics: Overview of recent modeling // Oceanography. Vol.18, No.2, June 2005. Pp. 56-75.
14. Staneva J.V., Dietrich D.E., Stanev E.V., Bowman M.J. Rim current and coastal eddy mechanisms in an eddy-resolving general circulation model // J. Mar. Systems. 2001. V. 31. P. 137-157.
15. Каримова С.С. Вихревые течения в Черном море // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса: Физические основы, методы и технологии мониторинга окружающей среды, потенциально опасных явлений и объектов. Сборник научных статей. Выпуск 5. Т. II. М.: ООО «Азбука-2000», 2008. С. 95-101.
16. Кривошея В.Г., Титов В.Б., Овчинников И.М., Москаленко Л.В., Скирта А.Ю., Монахов В.В. Новые данные о режиме течений на шельфе северо-восточной части Черного моря // Океанология, 2001. Т. 41. №3. С. 325-334.

17. Титов В.Б. Морфометрические параметры и гидрофизические характеристики прибрежных антициклонических вихрей в Черном море // Метеорология и гидрология, 2002. №4. С. 67-73.
18. Титов В.Б. Годовая изменчивость динамических параметров Кольцевого циклонического течения в северо-восточной части Черного моря // Метеорология и гидрология, 2003. №8. С. 80-88.
19. Титов В.Б., Прокопов О.И. Характерные черты динамики и структуры вод прибрежной зоны Черного моря // Метеорология и гидрология, 2002. №5. С. 59-67.
20. Каримова С.С. Исследование субмезомасштабных вихрей Черного и Балтийского морей по радиолокационным и радиометрическим спутниковым данным // Электронный сборник докладов Российской научной конференции Зондирование земных покровов радарными с синтезированной апертурой. М.: Издательство JRE, 2010. С. 148-159
21. Scully-Power P. Navy Oceanographer Shuttle Observations, STS 41-G, Mission Report. Naval Underwater Systems Center Tech. Rep. NUSC TD 7611, 1986. 71 pp.
22. Munk, W. and Armi L. Spirals on the sea: A manifestation of upper-ocean stirring // Proceedings of the 12th 'Aha Huliko'a Hawaiian Winter Workshop, 2001.
23. Eldevik T., Dysthe K.B. Spiral eddies // J. Phys. Oceanogr., 2002. V. 32. №3. P.851-869.
24. Fu L.-L., Holt B. Seasat views oceans and sea ice with Synthetic Aperture Radar // JPL publication 81-120, February 15, 1982.
25. Гинзбург А.И. О нестационарных струйных течениях в юго-западной части Черного моря II Исследование Земли из космоса, 1995. №4. С. 10-16
26. Гинзбург А.И. Процессы горизонтального обмена в приповерхностном слое Черного моря II Исследование Земли из космоса, 1994. №2. С. 75-83.

27. Гинзбург А.И., Зацепин А.Г., Костяной А.Г. и др. Антициклонические вихри в глубоководной восточной части Черного моря летом-осенью 1999 г. (спутниковые и судовые наблюдения) // Исследование Земли из космоса, 2001а. №5. С. 3-11.
28. Гинзбург А.И., Зацепин А.Г., Костяной А.Г. и др. Отделение прибрежных антициклонических вихрей от Кавказского берега и их трансформации в вихри открытого моря // Комплексные исследования северо-восточной части Черного моря / Под ред. Зацепина А.Г., Флинта М.В. М.: Наука, 2002. С. 83-90.
29. Гинзбург А.И., Зацепин А.Г., Костяной А.Г. и др. Система синоптических вихрей над свалом глубин в северо-западной части Черного моря летом 1993 г. (спутниковая и судовая информация) // Океанология, 1998а. Т. 38. №1. С. 56-63.
30. Sur H., Iyiu Y. Evolution of satellite derived mesoscale thermal patterns in the Black Sea, Progress in Oceanography, 39, pp. 109-151, 1997.
31. Тематическое дешифрирование и интерпретация космических снимков среднего и высокого пространственного разрешения: учебное пособие / А. Н. Шихов, А. П. Герасимов, А. И. Пономарчук, Е. С. Перминова; Пермский государственный национальный исследовательский университет. – Пермь, 2020. – 49,6 Мб; 191 с.
32. Сайт Геологической службы США [Электронный ресурс] : URL: <https://www.usgs.gov>- Режим доступа: <https://www.usgs.gov/landsat-missions> (дата обращения: 15.06.2022)
33. Сайт Геологической службы США [Электронный ресурс] : URL: <https://www.usgs.gov>- Режим доступа: <https://www.usgs.gov/media/files/landsat-8-9-olitirs-collection-2-level-2-data-format-control-book> (дата обращения: 15.06.2022)(USGS/EROS. LSDS-1328 Version 6.0.PDF)
34. [Электронный ресурс]. URL: (<https://docs.sentinel-hub.com/api/latest/data/landsat-8-l2/>) (дата обращения: 15.06.2022)

35. [Электронный ресурс]. URL:
(https://www.nasa.gov/home/hqnews/2013/may/HQ_13-160_Landsat_8_Begins.html/)
36. [Электронный ресурс]. URL:
(<https://landsat.gsfc.nasa.gov/satellites/landsat-9/>)
37. [Электронный ресурс]. URL: (<https://gis-lab.info/qa/landsat-bandcomb.html/>)
38. Sentinel Hub EO Browser [Электронный ресурс]. URL:
(<https://www.sentinel-hub.com/explore/sentinelplayground/>)
39. NASA (НАСА) [Электронный ресурс]. URL:
(<https://eospsa.nasa.gov/mission-category/3>)
40. Центр совместных исследований Европейской комиссии [Электронный ресурс]. URL:
(<https://marswiki.jrc.ec.europa.eu/agri4castwiki/index.php/TERRA-MODIS>)