



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

Кафедра Экспериментальной физики атмосферы

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА
(магистерская диссертация)

На тему «Использование спутниковой съёмки при исследовании мезомасштабных
атмосферных вихрей над акваторией Чёрного моря»

Исполнитель

Комнатов Илья Вячеславович

(фамилия, имя, отчество)

Руководитель

кандидат географических наук, доцент

(ученая степень, ученое звание)

Федосеева Наталья Владимировна

(фамилия, имя, отчество)

«К защите допускаю»
Заведующий кафедрой

(подпись)

кандидат физико-математических наук, доцент

(ученая степень, ученое звание)

Восканян Карина Левановна

(фамилия, имя, отчество)

«08» февраля 2026 г.

Санкт-Петербург
2026

СОДЕРЖАНИЕ

| | |
|---|----|
| Введение..... | 3 |
| Глава 1. Мезомасштабные атмосферные вихри: физическая природа и методы исследования..... | 7 |
| 1.1 Физико-географическая характеристика Черноморского региона и рельеф местности..... | 7 |
| 1.2 Определение и классификация мезомасштабных атмосферных циклонических вихрей | 11 |
| 1.3 Физические механизмы формирования и развития вихревых структур над морскими акваториями..... | 15 |
| 1.4 Современное состояние исследований МАЦВ в отечественной и зарубежной литературе..... | 21 |
| Глава 2. Дистанционное зондирование и методология анализа данных | 25 |
| 2.1. Характеристика спутниковых систем и данных дистанционного зондирования..... | 25 |
| 2.2 Физические принципы регистрации сигнала и алгоритмы предварительной обработки данных..... | 32 |
| 2.3 Характеристика массивов атмосферного реанализа и океанографических данных..... | 35 |
| 2.4 Методический алгоритм сбора, обработки и визуализации данных | 39 |
| Глава 3. Анализ пространственно-временной изменчивости и условий формирования мезомасштабных вихрей над Черным морем..... | 43 |
| 3.1 Статистический анализ повторяемости МАЦВ за период 2012–2022 гг. .. | 43 |
| 3.2 Интерпретация типовых сценариев в фазах сезонных максимумов | 48 |
| 3.3 Интерпретация типовых сценариев в фазах сезонных минимумов | 54 |
| 3.4 Верификация механизмов вихреобразования на основе репрезентативной выборки 2020 года..... | 61 |
| Заключение..... | 67 |
| Список использованных источников..... | 69 |

Введение

Современная оперативная метеорология всё чаще упирается в «потолок» точности при прогнозировании процессов в регионах со сложной орографией и изрезанной береговой линией. Черноморское побережье в этом смысле — один из самых трудных участков. Здесь на фоне термической трансформации воздушных масс над теплой акваторией и динамического влияния Крымских и Кавказских гор возникают специфические возмущения — мезомасштабные атмосферные циклонические вихри (МАЦВ) [1]. Имея горизонтальный масштаб от пары десятков до ста-двухсот километров, эти структуры зачастую «проваливаются» между узлами расчетных сеток глобальных моделей атмосферы. Тем не менее, именно эти «невидимые» вихри определяют экстремальный характер погоды на побережье: от внезапных шквалов и смерчей до катастрофических ливней, вызывающих мгновенные паводки на горных реках. Практика показывает, что без понимания природы этих объектов невозможно обеспечить безопасность ни мореплавания, ни береговой инфраструктуры, что и определяет острую актуальность данной работы.

История изучения мезометеорологических процессов насчитывает не одно десятилетие, однако акватория Черного моря долгое время оставалась для исследователей труднодоступным регионом. Береговая сеть станций дает лишь фрагментарную картину, а информативность наземных наблюдений резко падает уже в нескольких десятках километров от уреза воды. В таких условиях дистанционное зондирование Земли из космоса превращается из вспомогательного средства в основной, а порой и единственный источник данных. Спутниковые снимки в видимом и ИК-диапазонах позволяют не просто увидеть облачные спирали, но и детально разобрать «анатомию» вихря. Однако, работая с архивами MODIS и VIIRS, мы неизбежно сталкиваемся с проблемой интерпретации: как отличить случайное конвективное скопление от реального динамического узла? Несмотря на фундаментальные труды А.Ю. Иванова [2] и Д.А. Яровой [3], вопрос количественной связи между «пятнистостью» полей

температуры поверхности моря и взрывным генезисом вихрей в осенне-зимний период всё еще требует уточнения.

В качестве объекта исследования выступают мезомасштабные атмосферные процессы и возникающие в них циклонические структуры над акваторией Черного моря. Предметом исследования являются физические механизмы формирования этих вихрей, их эволюция и диагностические признаки, проявляющиеся в полях спутниковых данных и результатах численного анализа. Главная цель работы заключается в том, чтобы на базе комплексного использования многоспектральной съемки и данных реанализа выявить критические термодинамические условия, при которых запускается механизм вихреобразования, и систематизировать эти характеристики для практического применения.

Для достижения цели мы поставили перед собой ряд конкретных задач. Прежде всего, необходимо было критически переосмыслить существующие классификации МАЦВ [4] и выделить те типы вихрей, которые наиболее характерны для Черноморского бассейна. Далее предстояло оценить реальный потенциал радиометров MODIS и VIIRS, учитывая помехи от облачности верхнего яруса и особенности съемки над водной поверхностью. Ключевой этап исследования — анализ связи между температурой воды, прорывами холодных воздушных масс и вертикальной устойчивостью атмосферы. Финальная часть работы посвящена разработке алгоритма, который позволил бы совместить визуальную структуру облачных вихрей на снимке с расчетными полями завихренности и дивергенции из массива NCEP/NCAR (National Centers for Environmental Prediction/ National Center for Atmospheric Research).

Методология исследования базируется на синтезе классического синоптического анализа и современных методов обработки пространственной информации. Мы не просто ведем статистический учет случаев, а стараемся проследить физику процесса: от момента появления первой зацепки на спутниковом снимке до выхода вихря на побережье. Информационную основу составили многолетние архивы снимков высокого разрешения со спутников

Terra, Aqua и Suomi NPP. Для глубокой диагностики динамики атмосферы привлекались сеточные данные реанализа NCEP/NCAR Европейского центра среднесрочных прогнозов погоды (ECMWF). Верификация наиболее опасных случаев проводилась по материалам прибрежных метеостанций, что позволило подтвердить реальную значимость обнаруженных нами структур.

Уникальность исследования заключается в уточнении пороговых градиентов в системе «вода–воздух», выступающих триггерами для локального циклогенеза именно над Черным морем. Нам удалось показать, что сопоставление морфологии облачных ветвей с количественными показателями относительного вихря позволяет «поймать» МАЦВ на более ранних стадиях, чем это делают стандартные методы. Кроме того, в работе акцентировано внимание на роли орографических препятствий как фактора стационарирования и усиления вихревых потоков. Теоретическая значимость работы состоит в расширении представлений о мезомасштабной циркуляции в средних широтах, а практическая ценность — в возможности внедрения предложенных диагностических признаков в работу синоптических подразделений для уточнения прогнозов опасных явлений.

В конечном счете, мы стремимся к тому, чтобы спутниковый мониторинг в сочетании с данными реанализа перестал быть просто инструментом «пост-анализа» уже случившихся событий, а стал базой для оперативной диагностики мезомасштабных рисков. Наш подход опирается на понимание того, что в условиях Черноморского региона именно мезомасштабная завихренность, подпитываемая значительными тепловыми потоками от поверхности моря, является ключевым драйвером опасных явлений, которые традиционная синоптическая сеть «видит» слишком поздно.

Диссертационная работа выстроена таким образом, чтобы последовательно пройти путь от теоретического осмысления физики вихрей до практических алгоритмов их идентификации.

В первой главе мы фокусируемся на физической природе МАЦВ, рассматривая их не как случайные атмосферные образования, а как результат

сложного взаимодействия термодинамических факторов и орографии. Здесь проводится подробный обзор существующих классификаций и уточняются механизмы трансформации воздушных масс над акваторией, которые приводят к локальному циклогенезу.

Вторая глава посвящена методическому инструментарию исследования. В ней раскрываются технические возможности современных космических систем и обосновывается выбор конкретных спектральных каналов для дешифрирования вихревых структур. Особое внимание уделено методике совмещения спутниковых данных с полями реанализа, что позволяет «заглянуть» внутрь облачных спиралей и оценить их реальную динамику.

Глава 1. Мезомасштабные атмосферные вихри: физическая природа и методы исследования

1.1 Физико-географическая характеристика Черноморского региона и рельеф местности

Черноморский бассейн представляет собой уникальный в планетарном масштабе природный объект, чья изолированность и глубоководность создают предпосылки для формирования автономной метеорологической системы. Располагаясь во внутренней части Евразийского континента, море выступает в роли гигантского термодинамического резервуара, который в холодный период года аккумулирует солнечную энергию, а в теплый — служит стабилизатором температурного режима [5]. Физико-географическая уникальность региона начинается с геометрии самой котловины: её вытянутость с запада на восток более чем на тысячу километров при сравнительно небольшой ширине создает идеальные условия для разгона воздушных масс и формирования специфических ветровых режимов. Согласно исследованиям ведущих специалистов, таких как А.Г. Костяной и А.Г. Зацепин [6], [7], именно бассейн Черного моря является зоной, где динамика водных масс и атмосферная циркуляция переплетены наиболее тесно, образуя сложную систему обратных связей.

Особое внимание следует уделить морфометрическим характеристикам береговой линии, которая характеризуется резким контрастом между равнинными северо-западными участками и высокогорными восточными и южными побережьями. Северо-западный шельф с его обширными мелководьями и системой лиманов оказывает специфическое влияние на трансформацию приземного слоя атмосферы, способствуя быстрому выхолаживанию воздуха в зимнее время. В то же время центральная и восточная части моря характеризуются большими глубинами, превышающими две тысячи метров, что обеспечивает колоссальную тепловую инерцию водной толщи. Эта инерция

является фундаментальным климатообразующим фактором: даже при сильных вторжениях арктического воздуха поверхность моря остается относительно теплой, что провоцирует возникновение экстремальных вертикальных градиентов температуры, являющихся «топливом» для мезомасштабных вихрей.

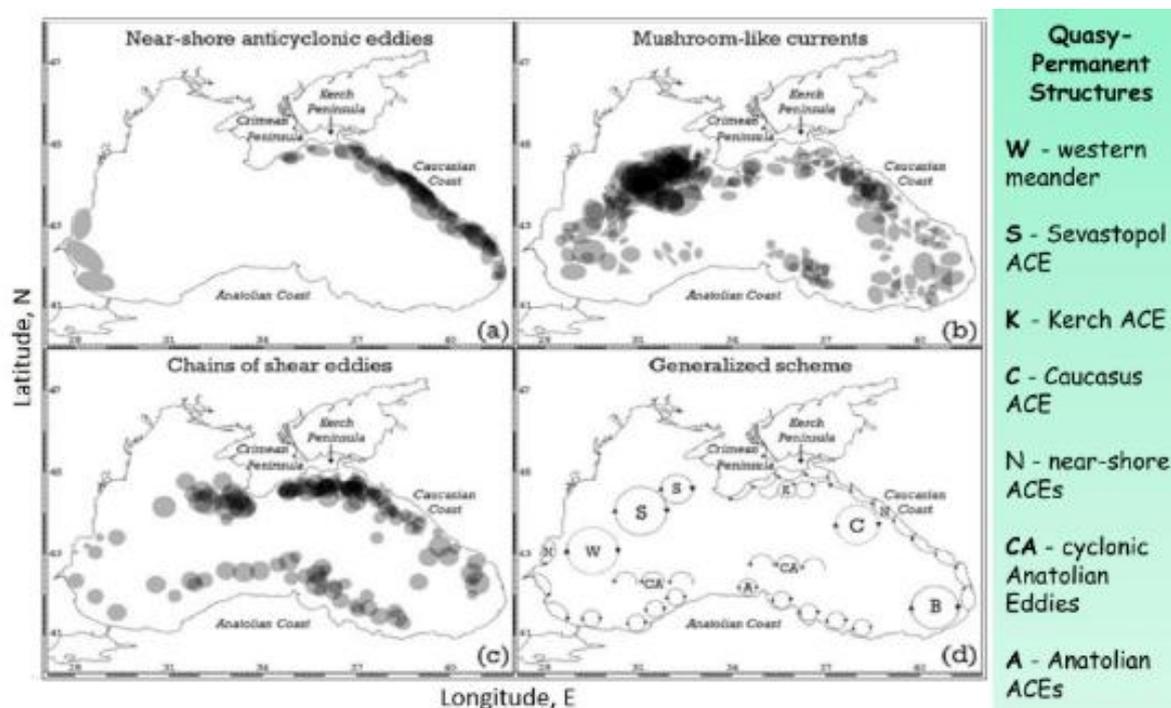


Рисунок 1.1 – классификация мезомасштабных структур в Чёрном море [8]

Рельеф местности, окружающий акваторию, выступает в качестве главного архитектора мезомасштабной циркуляции (Рисунок 1.2). Кавказский горный хребет, возвышающийся на востоке, представляет собой мощную аэродинамическую преграду, чья высота зачастую превышает три километра. Такое препятствие заставляет набегающие воздушные потоки либо огибать его, концентрируя энергию ветра в прибрежной полосе, либо переваливать через хребты, что порождает возникновение гравитационных волн и подветренных возмущений. Физика взаимодействия ветра с Кавказским побережьем сложна: при северо-восточных ветрах, известных как бора, холодный воздух скапливается перед горами, а затем с огромной скоростью обрушивается на

теплую морскую гладь в районе Новороссийска и Анапы. Это приводит к взрывной дестабилизации атмосферы и формированию мезомасштабных конвективных структур, которые отчетливо визуализируются на спутниковых снимках MODIS и VIIRS в виде облачных «улиц» и спиралей.

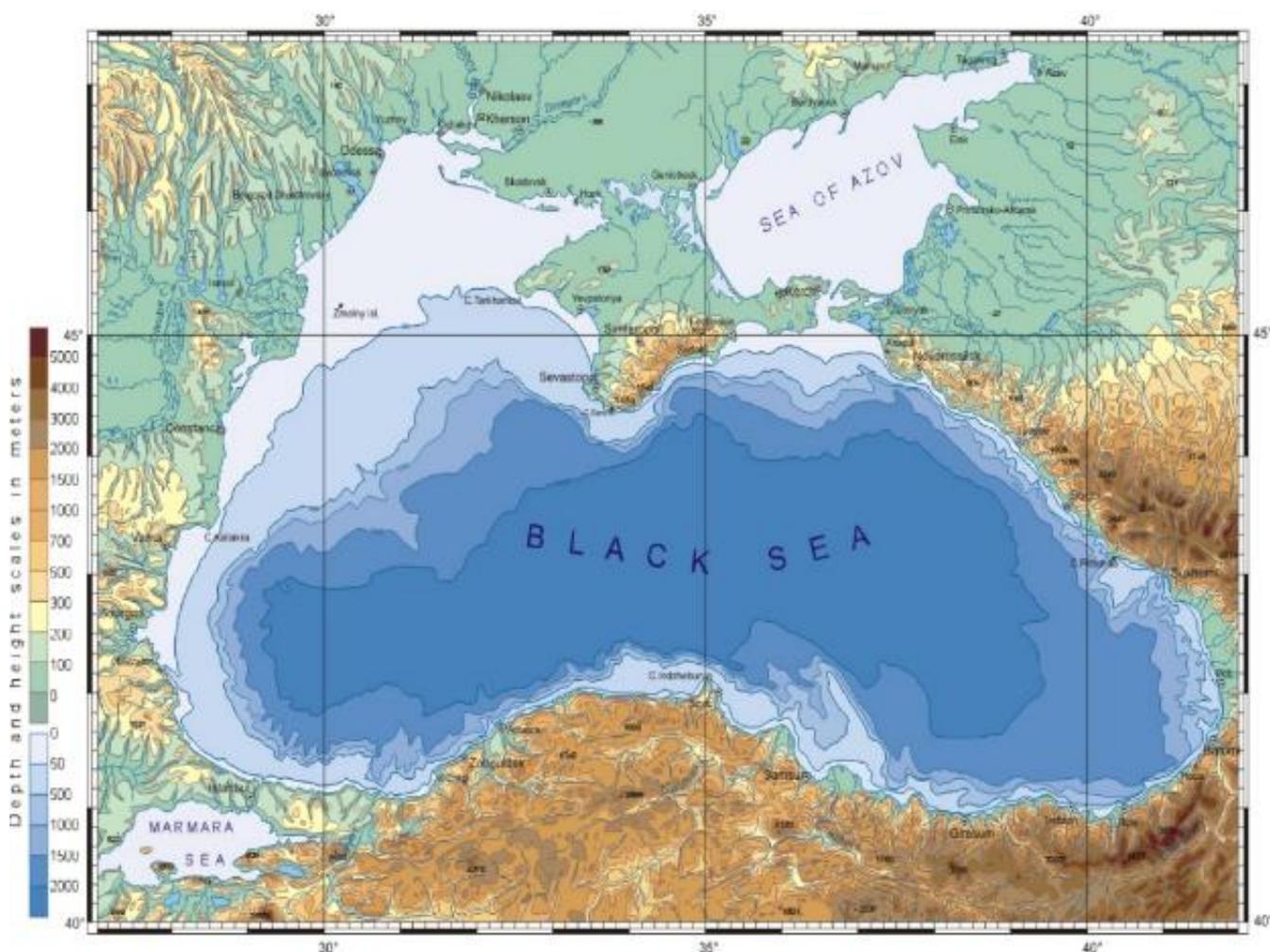


Рисунок 1.2 – Чёрное море, карта высот [7]

Крымский полуостров с его Крымскими горами вносит свой вклад в неоднородность атмосферных полей. Несмотря на меньшую высоту по сравнению с Кавказом, южный берег Крыма создает эффект «амфитеатра», способствующий локализации мезомасштабных циркуляций. Взаимодействие потоков с горными массивами в районе Ялты и Севастополя часто приводит к образованию оторвавшихся вихрей, которые смещаются в открытое море.

Горный рельеф здесь работает как механический триггер, закручивающий поток, в то время как море обеспечивает термическую подпитку процесса. В работах, посвященных бассейновой циркуляции под ветровым воздействием, подчеркивается, что наличие таких «выступов» суши в глубокое море радикально меняет структуру завихренности в прибрежной зоне, создавая очаги мезоциклогенеза, которые невозможно адекватно описать без учета детальной орографии [9].

Южное побережье, ограниченное Понтийскими горами, также играет значительную роль в формировании общего климатического режима, закрывая бассейн от теплых влияний субтропических широт и способствуя удержанию холодных воздушных масс внутри черноморской «чаши». Таким образом, Черное море оказывается зажатым в тиски горных систем практически со всех сторон, за исключением западного сектора. Такая замкнутость в сочетании со сложной конфигурацией дна и берегов превращает регион в естественную лабораторию мезометеорологических процессов. Любое крупномасштабное перемещение воздуха над этой территорией неизбежно трансформируется под влиянием подстилающей поверхности, приобретая черты мезомасштабности, что делает задачу мониторинга данных процессов с использованием дистанционного зондирования и современных архивов реанализа приоритетной для понимания региональных изменений климата (Рисунок 1.3).

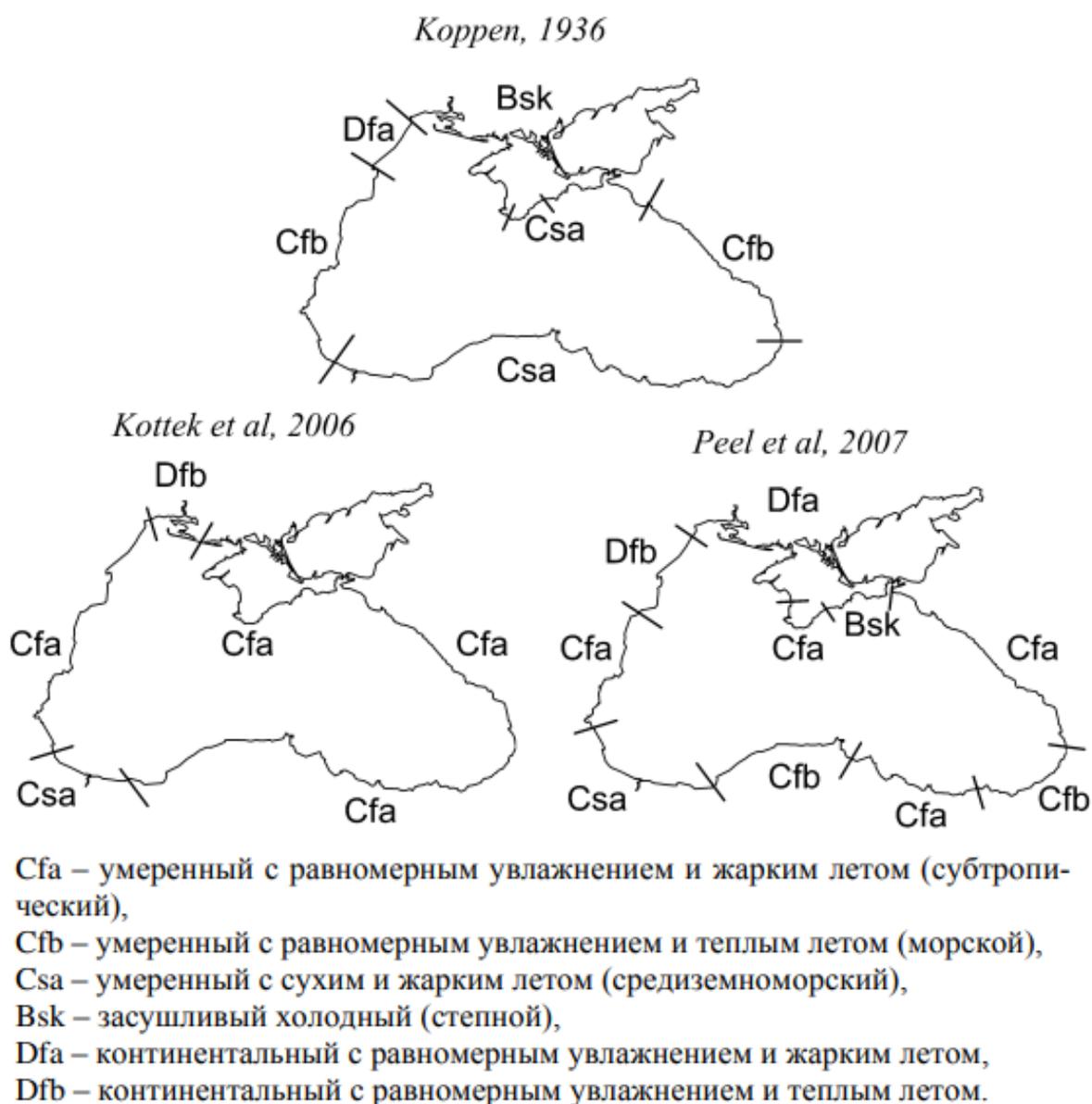


Рисунок 1.3 – Распределение типов климата на побережье Черного моря на основе классификации Кёппена [10]

1.2 Определение и классификация мезомасштабных атмосферных циклонических вихрей

В иерархии атмосферных движений существует обширный класс явлений, занимающий промежуточное положение между синоптическими объектами планетарного масштаба и микромасштабной турбулентностью. Именно в этом диапазоне формируются мезомасштабные атмосферные циклонические вихри

(МАЦВ) — интенсивные вихревые возмущения, горизонтальные размеры которых варьируются от первых десятков до нескольких сотен километров. Согласно классической шкале масштабов атмосферных процессов, предложенной И. Орлански, рассматриваемые объекты относятся преимущественно к градации мезо- β (20–200 км), хотя наиболее крупные и долгоживущие системы могут достигать нижней границы масштаба мезо- α [10]. Одной из главных проблем идентификации таких структур является то, что их характерный размер часто оказывается сопоставим с шагом сетки оперативных численных моделей, что приводит к сглаживанию градиентов давления и ветра в прогностических полях, делая вихрь фактически «невидимым» для численного прогноза без применения процедур даунскейлинга или усвоения высокоразрешающих данных.

С физической точки зрения МАЦВ представляют собой уникальные образования, генезис которых принципиально отличается от формирования классических внетропических циклонов. Если энергетика последних определяется бароклинной неустойчивостью на протяженных фронтальных разделах, то мезомасштабные вихри над морскими акваториями имеют природу, более схожую с тропическими циклонами, несмотря на их развитие в умеренных и высоких широтах. Ключевым драйвером их развития выступает глубокая конвекция, инициируемая мощными потоками тепла и влаги от теплой морской поверхности в холодную воздушную массу. В зарубежной литературе этот класс явлений часто объединяется термином «полярные мезоциклоны» (polar lows), однако применительно к Черноморскому региону более корректно использовать термин «мезомасштабные вихри холодного сезона», так как, несмотря на субтропическое положение бассейна, физика процесса вторжения арктического воздуха на теплую акваторию здесь идентична процессам в Баренцевом или Норвежском морях [11].

Попытки создать универсальную классификацию МАЦВ наталкиваются на значительное разнообразие их морфологических форм, выявляемых средствами спутникового мониторинга. Анализ облачных структур позволяет

выделить несколько устойчивых типов, различающихся как внешним видом, так и динамикой внутренних процессов. Наиболее опасным типом считаются спиралевидные вихри, обладающие четко выраженным «глазом» или центром вращения, вокруг которого закручиваются облачные гряды. Такие системы характеризуются высокой завихренностью и способны генерировать ураганные ветры. Другой распространенный тип — запятообразные облачные системы (comma clouds) [12], формирующиеся обычно в тылу холодных фронтов и связанные с адвекцией положительной завихренности в средней тропосфере. Для Черного моря также характерен особый тип вихрей ячеистой конвекции, когда упорядочивание конвективных ячеек происходит вдоль линий сходимости воздушных потоков, образуя вихревые цепочки.

Отдельного внимания заслуживает классификация по генетическому признаку, разделяющая вихри на сугубо конвективные и орографические. В условиях сложной береговой линии Черного моря орографический фактор часто становится определяющим. Взаимодействие воздушного потока с горными массивами Крыма и Кавказа порождает подветренные депрессии и вихревые диполи, которые могут существовать даже при отсутствии сильной термической неустойчивости, однако при наложении на теплую морскую поверхность такие «механические» вихри быстро приобретают термическое ядро и интенсифицируются [9].

Опираясь на результаты многолетних исследований, в рамках которых проводился детальный анализ спутниковых архивов радиометров MODIS и VIIRS, была разработана и апробирована генетико-географическая классификация МАЦВ. В её основе лежит разделение вихрей по зонам их формирования и особенностям взаимодействия с орографией побережья, что позволяет выделить четыре устойчивых типа.

Вихри открытого моря. Данный тип характеризуется наиболее правильной геометрической формой и отчетливой спиралевидной структурой облачных ветвей. Они формируются в центральных частях акватории, где влияние береговой черты минимально, а основным драйвером выступает термическая

неустойчивость. Такие вихри обладают наибольшим временем жизни и выраженным «глазом» в центре циркуляции.

Прибрежные (Кавказские) вихри. Генезис этих структур неразрывно связан с динамическим влиянием Кавказского хребта. Они возникают в непосредственной близости от берега в результате обтекания горных массивов воздушными потоками. Орографическое возмущение в сочетании с температурными контрастами создает компактные и очень интенсивные вихревые узлы, часто стационарирующие у побережья.

Кавказские «оторвавшиеся» вихри. Этот тип представляет собой эволюционное развитие прибрежных структур. Зародившись у склонов гор, под влиянием ведущего потока вихри смещаются вглубь акватории, теряя прямую связь с орографией, но продолжая черпать энергию из тепловых ресурсов моря. Для них характерна быстрая трансформация формы и высокая изменчивость траекторий.

Вихри западной части акватории. Данная группа выделена в связи со специфическими условиями циркуляции в западном секторе Черного моря. Здесь вихреобразование часто происходит под влиянием ложбин давления, спускающихся с континента, и взаимодействия с Крымским полуостровом. Эти вихри имеют свою специфическую повторяемость и траектории, часто определяющие погоду на западном и северо-западном побережьях.

Подобная дифференциация объектов, заложенная в основу нашего исследования, позволяет не просто констатировать факт наличия облачного вихря, но и учитывать региональную специфику его динамики. Это дает возможность более точно интерпретировать спутниковую информацию и подбирать адекватные диагностические параметры для анализа каждого конкретного случая, что является необходимым условием для перехода от описательной метеорологии к количественному прогнозу мезомасштабных рисков.

1.3 Физические механизмы формирования и развития вихревых структур над морскими акваториями

Термодинамическая природа мезомасштабных атмосферных циклонических вихрей над Черным морем позволяет рассматривать их как локальные тепловые машины, где основным источником энергии выступает термическая и влажностная неоднородность пограничного слоя атмосферы [13]. В отличие от крупномасштабных внетропических циклонов, чье развитие в значительной степени определяется бароклинной неустойчивостью на фронтальных разделах, мезомасштабные структуры умеренных широт в холодное полугодие развиваются преимущественно за счет прямой передачи тепла от морской поверхности. Процесс мезоциклогенеза инициируется при вторжении холодных и сухих воздушных масс континентального или арктического происхождения на относительно теплую подстилающую поверхность моря. В этой ситуации возникает экстремальный поток явного и скрытого тепла, который стремительно трансформирует нижние слои атмосферы, снижая их плотность и создавая мощный импульс к вертикальному перемещению воздушных масс.

Развитие мезомасштабных вихрей неразрывно связано с организацией облачности в сложные конвективные системы (МКС). В начальной стадии энергия неустойчивости реализуется в виде разрозненных кучево-дождевых облаков, однако под влиянием динамических факторов — таких как сдвиг ветра и орографическая конвергенция — эти ячейки начинают упорядочиваться. На спутниковых снимках высокого разрешения это проявляется в формировании специфических мезомасштабных структур, среди которых особое место занимают «bow echo» (дугообразные эхо) [12]. Эти структуры свидетельствуют о наличии мощных нисходящих потоков, которые, достигая поверхности моря, растекаются и форсируют новые восходящие движения на переднем крае системы. Подобная самоподдерживающаяся динамика приводит к концентрации вихревого момента и формированию замкнутой циркуляции, которая визуально

напоминает уменьшенную копию тропического урагана с характерной спиралевидной геометрией облачных гряд.

Энергетическая подпитка МАЦВ осуществляется не только за счет прямого прогрева от воды, но и в огромной степени благодаря выделению скрытой теплоты конденсации. При подъеме влажного морского воздуха водяной пар конденсируется, высвобождая энергию, которая дополнительно подогревает ядро вихря. Это создает положительную обратную связь: падение давления в центре усиливает приток влажного воздуха с периферии, что ведет к еще более интенсивному облакообразованию и выделению тепла. Как показывают данные реанализа NCEP/NCAR и спутникового зондирования, именно фазовые переходы воды являются тем «топливом», которое позволяет мезоциклону сохранять свою структуру в течение нескольких суток даже после прекращения активной адвекции холода. В этом контексте мезомасштабные вихри Черного моря можно считать промежуточным звеном между чисто конвективными ячейками и полномасштабными циклонами, что требует особого внимания к индексам неустойчивости, таким как CAPE (конвективная доступная потенциальная энергия), рассчитываемым по данным аэрологических диаграмм [14], [15].

Генезис мезомасштабных атмосферных циклонических вихрей над Черным морем определяется сложным взаимодействием динамических факторов и интенсивного энергообмена на границе раздела сред. В отличие от крупномасштабных циклонов, где основным источником энергии служит горизонтальный температурный градиент в зоне фронта, мезомасштабные структуры холодного полугодия черпают энергию преимущественно за счет вертикальной неустойчивости. Ключевым условием запуска этого механизма является резкая адвекция (вторжение) холодных и сухих воздушных масс на относительно теплую подстилающую поверхность моря, что создает ситуацию экстремальной термодинамической разбалансировки.

Центральное место в диагностике таких состояний занимает анализ вертикального профиля температуры, где критическим параметром выступает состояние атмосферы на изобарическом уровне 700 гПа. Выбор данного уровня,

соответствующего средней высоте около 3 километров, обусловлен тем, что именно здесь наиболее отчетливо проявляется влияние свободной атмосферы, уже не затронутой непосредственным трением о подстилающую поверхность, но активно участвующей в формировании конвективных систем. В метеорологической практике разность температур между поверхностью моря и уровнем 700 гПа служит фундаментальным индикатором потенциальной неустойчивости. Когда холодный воздух, перемещаясь в нижних слоях, прогревается от воды, а на высоте 700 гПа сохраняется ядро холода, возникает адиабатический градиент температуры, превышающий критические значения. Это запускает механизм «свободной» конвекции, при которой теплые и влажные объемы воздуха получают мощный импульс к восхождению, пробивая инверсионные слои и достигая высот, необходимых для формирования развитой облачности [2].

Использование данных об уровне 700 гПа позволяет исследователю оценить не только температурный контраст, но и влажностные характеристики, а также геопотенциальную высоту, которая указывает на наличие высотных ложбин. Именно сочетание термического фактора (высокой температуры воды) и динамического фактора (низкого давления и холода на уровне 3 км) создает условия для «взрывного» углубления мезоциклона. Если разность температур в этой системе превышает пороговые значения (обычно более 18–20°C для Черноморского региона), энергия неустойчивости реализуется в виде упорядоченной завихренности.

Динамическое упорядочивание этих потоков в единую спиралевидную систему происходит под влиянием исходной завихренности фона. Она может возникать как за счет сдвига ветра в зоне фронтального раздела, так и в результате трения воздушного потока о сложную береговую черту. Конвергенция воздуха в нижних слоях к центру локального падения давления ведет к концентрации момента импульса. По мере подъема влажного воздуха происходит фазовый переход — конденсация водяного пара. Выделяющаяся при этом скрытая теплота дополнительно подогревает ядро вихря, создавая положительную обратную

связь. Этот процесс, известный как механизм условной неустойчивости второго рода, превращает МАЦВ в автономную систему, способную поддерживать свою жизнедеятельность до тех пор, пока сохраняется приток тепла от морской поверхности.

Особую роль в реализации этих механизмов над Черным морем играет орография. Взаимодействие воздушных потоков с горными массивами Крыма и Кавказа порождает зоны динамической сходимости потоков. При обтекании препятствий, особенно в ситуациях с северо-восточной адвекцией, за горными хребтами возникают подветренные волны и зоны аэродинамического разрежения. Если такое механическое возмущение совпадает с областью высокой термической неустойчивости (определяемой по контрасту с уровнем 700 гПа), оно моментально трансформируется в полноценный мезоциклон. Это объясняет, почему прибрежные вихри часто характеризуются малым радиусом, но экстремально высокими скоростями ветра и интенсивностью осадков, концентрирующимися в узкой зоне у подножия гор [1].

Жизненный цикл таких структур проходит несколько стадий: от появления первичной кучевообразной облачности и формирования «запятой» в поле ветра до стадии максимального развития с отчетливым центром вращения и последующей диссипации при выходе на сушу. Ограниченность запаса тепла в деятельном слое моря и влияние шероховатости берега определяют кратковременность существования МАЦВ (от нескольких часов до суток), что делает задачу их мониторинга с использованием оперативных данных уровня 700 гПа и спутниковой съемки критически важной для регионального прогноза опасных явлений.

Рассматривая физические механизмы мезомасштабного циклогенеза, необходимо подчеркнуть, что Черноморский регион выступает в роли естественной лаборатории, где локальные термические градиенты накладываются на крупномасштабную динамику средней тропосферы. Если ранее в отечественной литературе упор делался преимущественно на приземную барическую топографию, то современные исследования смещают акцент на

вертикальную мощность этих процессов [16]. Мезомасштабный вихрь в своей эволюции проходит критическую фазу, когда его существование перестает зависеть только от трения и теплообмена в пограничном слое и начинает определяться условиями на рубеже свободной атмосферы. Этот рубеж, традиционно сопоставляемый с высотой около 3 километров, является зоной, где формируется основной энергетический потенциал системы.

Ключевым фактором, определяющим переход мезомасштабного скопления облачности в организованный вихрь, является интенсивность адвекции водяного пара. Анализ динамики экстремальных событий последних лет позволяет говорить о функционировании «влажных конвейеров», которые связывают перегретую поверхность моря с верхними ярусами атмосферы. Процесс строится на непрерывной конвергенции влажных воздушных масс, которые при подъеме достигают уровней, где влияние подстилающей поверхности нивелируется. В этой зоне происходит масштабная фазовая трансформация влаги. Выделяющаяся при этом скрытая теплота конденсации служит внутренним двигателем вихря, создавая дополнительную плавучесть и ускоряя восходящие потоки. Подобная термодинамическая «самоподпитка» объясняет феномен взрывного углубления мезоциклонов: система фактически перерабатывает влагу, накопленную в нижних слоях, в кинетическую энергию циркуляции на высотах.

Динамическая устойчивость МАЦВ напрямую коррелирует с распределением относительной завихренности в толще атмосферы. Как показывают результаты моделирования конвективных структур [17], мезомасштабная система обретает жизнеспособность только в случае достижения вертикальной когерентности. Это означает, что область максимального вращения в свободной атмосфере должна пространственно синхронизироваться с термическим возмущением у поверхности моря. В отсутствие такой связности вихрь быстро диссипирует, не успев сформировать замкнутую циркуляцию. Однако при достижении «вертикального резонанса» оси вихря выравниваются, что минимизирует внутренние потери энергии и позволяет структуре существовать автономно, перемещаясь вдоль побережья.

Для формирования архива именно этот признак вертикальной мощности стал определяющим при верификации случаев мезоциклогенеза.

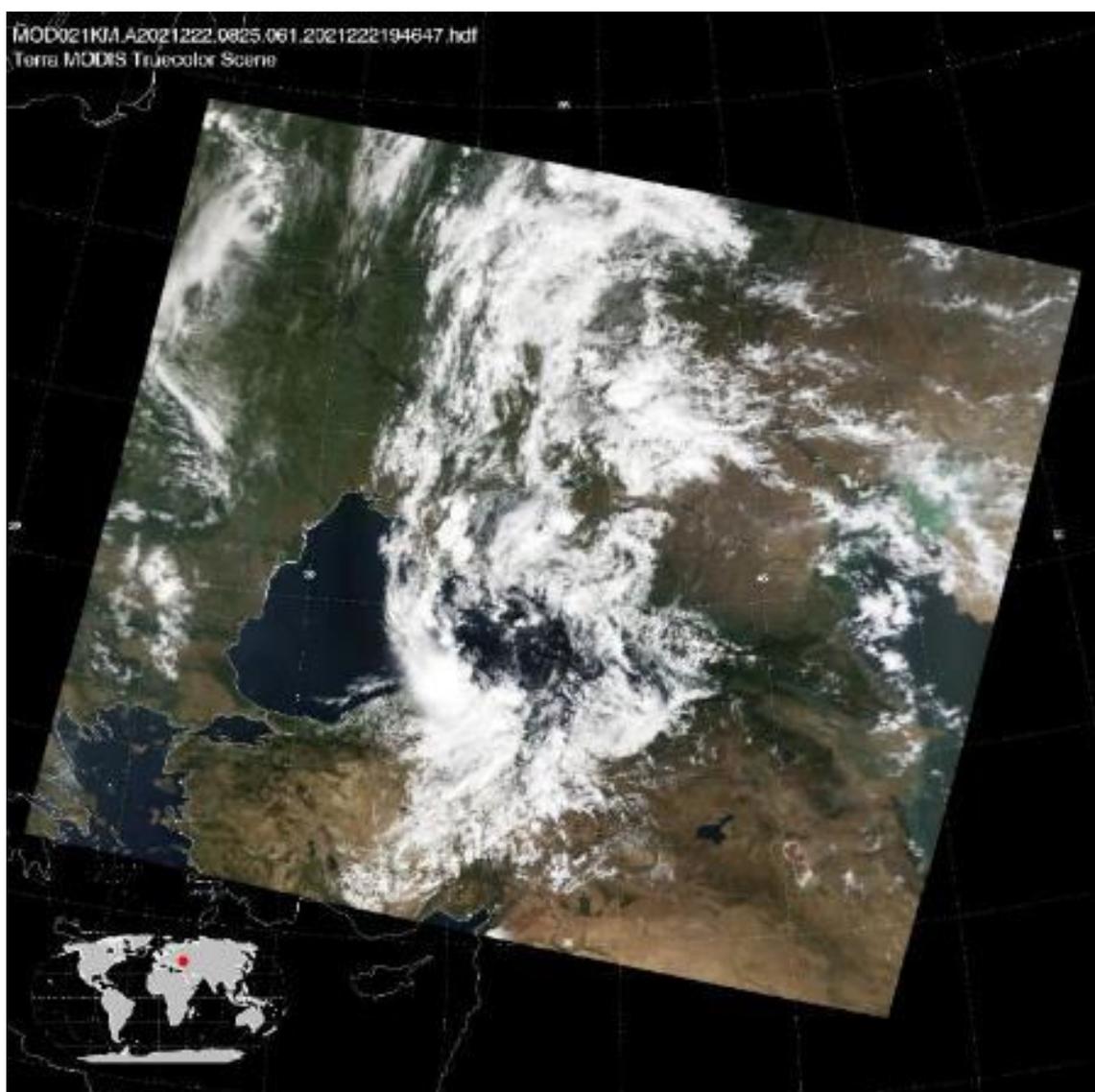


Рисунок 1.3 – Спутниковый снимок в видимом спектре. MODIS L1B Granule Images (RGB=4:3:1). 10.08.2021 08:25 ВСВ [18]

Взаимодействие описываемых процессов с орографией Крымских и Кавказских гор создает дополнительные условия для дестабилизации. Горные массивы не только деформируют воздушные потоки в нижнем слое, но и способствуют принудительному подъему влажного воздуха к границе свободной атмосферы, работая как катализатор конвекции. В итоге мезомасштабный вихрь

предстает не как плоская приземная структура, а как объемный атмосферный объект, чей «корневой» слой подпитывается теплом моря, а «двигатель» расположен на уровне средней тропосферы. Исследование этих взаимосвязей через призму данных реанализа позволяет не просто фиксировать факт наличия вихря, но и количественно оценивать его энергетический потенциал, что крайне важно для понимания генезиса экстремальных осадков в прибрежной зоне.

1.4 Современное состояние исследований МАЦВ в отечественной и зарубежной литературе

Изучение мезомасштабных вихревых структур проделало значительную эволюцию: от случайных визуальных наблюдений до системного метеорологического мониторинга с использованием орбитальных группировок. Анализ накопленного научного материала показывает, что фундаментальный интерес к мезомасштабным процессам в средних широтах резко возрос в последние десятилетия, что связано с осознанием их вклада в формирование экстремальной погоды, которую не удастся адекватно описать в рамках классической синоптической парадигмы.

В отечественной науке сложилось устойчивое направление, рассматривающее Черноморский бассейн как уникальный полигон для изучения процессов взаимодействия океана и атмосферы. Значительный вклад в систематизацию знаний о вихрях внесли работы, базирующиеся на данных радиолокации и оптического зондирования [1]. В этих исследованиях впервые была показана высокая повторяемость МАЦВ и доказано, что акватория Черного моря является зоной активного мезоциклогенеза, сопоставимой по интенсивности с высокоширотными регионами. Авторами была проведена колоссальная работа по дешифрированию тысяч снимков, что позволило выявить сезонную цикличность: пик активности приходится на осенне-зимний период, когда температурные контрасты между водой и воздухом достигают максимума. Однако в этих работах часто подчеркивается проблема «пропуска» вихрей из-за

облачности верхнего яруса, которая маскирует низкоуровневые циркуляции, что ставит перед современными исследователями задачу поиска косвенных признаков вихреобразования в смежных спектральных каналах.

Параллельно с дешифрированием снимков развивалось направление физического и численного моделирования. Исследователи морских метеорологических процессов акцентируют внимание на энергетике вихрей [4]. В частности, в литературе активно обсуждается вопрос о том, можно ли считать МАЦВ Черного моря прямыми аналогами полярных мезоциклонов или они ближе к тропическим системам. Ряд авторов доказывает, что ключевым драйвером здесь выступает не бароклинная неустойчивость (характерная для фронтов), а конвективная неустойчивость, поддерживаемая потоками скрытого тепла. Это порождает научную дискуссию о применимости классических критериев циклогенеза к малым формам. Использование мезомасштабных численных моделей показало, что стандартные методы параметризации конвекции часто недооценивают интенсивность МАЦВ, что требует внедрения более совершенных схем учета турбулентных потоков в пограничном слое атмосферы.

В работах, основанных на комплексном анализе спутниковой информации прослеживается четкая методическая линия: переход от качественного описания облачных форм к количественному анализу полей метеорологических величин. Сравнительные исследования полярных вихрей Арктики и мезоциклонов умеренных широт позволили выявить общие диагностические предикторы, такие как критическая разность температур на уровнях 850 и 700 гПа. Тем не менее, как отмечается в большинстве актуальных публикаций, существует выраженный разрыв между теоретическими моделями и оперативной практикой. Спутниковые данные часто анализируются в отрыве от динамических полей реанализа, что не позволяет в полной мере оценить трехмерную структуру вихря в момент его максимального развития.

Зарубежная литература последних лет делает упор на использование микроволновых данных и скаттерометрии для определения полей ветра над

морской поверхностью [17]. Однако специфика Черного моря, характеризующаяся близостью берегов и сложной конфигурацией горного рельефа, накладывает ограничения на использование стандартных глобальных алгоритмов из-за эффекта «загрязнения» сигнала сушей. Это заставляет исследователей искать региональные решения, адаптированные к условиям замкнутых бассейнов.

Обобщая современное состояние вопроса, можно выделить несколько нерешенных проблем, на которых фокусируется данная диссертация. Во-первых, это отсутствие единого автоматизированного подхода к идентификации МАЦВ, который объединял бы морфологические признаки облачности с термодинамическими характеристиками реанализа NCEP/NCAR. Во-вторых, роль орографического фактора (влияние Кавказского и Крымского побережий) часто рассматривается лишь качественно, без детального сопоставления с расчетными полями завихренности. Таким образом, современный этап исследований требует перехода к синтетическим методам мониторинга, где визуальная информация со спутников MODIS и VIIRS выступает в неразрывной связи с количественными параметрами вертикальной структуры атмосферы. Именно такой подход позволит преодолеть ограничения существующих методик и обеспечить новый уровень точности в диагностике мезомасштабных погодных рисков.

Подводя итог теоретическому анализу, проведенному в рамках первой главы, можно констатировать, что мезомасштабные атмосферные циклонические вихри являются неотъемлемым и крайне динамичным элементом региональной циркуляции над Черным морем. Их физическая природа, основанная на интенсивном теплообмене в системе «море–атмосфера» и модулируемая сложным рельефом побережья, обуславливает их высокую опасность для прибрежной инфраструктуры. Теоретический обзор подтвердил, что наиболее эффективным методом исследования данных объектов является сочетание дистанционных и расчетных методов.

Установлено, что классификация вихрей, учитывающая их географическую локализацию (открытого моря, прибрежные, оторвавшиеся и западные), позволяет более целенаправленно подходить к выбору прогностических параметров. В то же время, выявленный дефицит комплексных методик мониторинга, интегрирующих спутниковые снимки и высокоразрешающие данные реанализа, определяет вектор дальнейшего исследования. Это ставит перед нами задачу детального описания во второй главе используемого инструментария, характеристик космических систем зондирования и алгоритмов обработки пространственных данных, необходимых для реализации заявленного методического подхода.

2.1. Характеристика спутниковых систем и данных дистанционного зондирования

Мониторинг мезомасштабных процессов над акваторией Черного моря предъявляет жесткие требования к пространственному и временному разрешению данных. В условиях, когда контактные метеорологические наблюдения в открытом море фактически отсутствуют, а сеть береговых станций не обладает необходимой репрезентативностью для открытой воды, основным источником информации становятся спутниковые системы среднего и высокого разрешения. В рамках данного исследования ключевой упор сделан на использование данных, получаемых с многоспектральных радиометров MODIS (Рисунок 2.1) (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) и VIIRS (Рисунок 2.2) (Visible Infrared Imaging Radiometer Suite). Эти инструменты позволяют проводить не только качественный визуальный анализ морфологии облачных систем, но и получать количественные оценки термодинамических параметров подстилающей поверхности и атмосферного столба.

Техническая база радиометра MODIS представлена на двух космических платформах — Terra и Aqua, запущенных в рамках международной программы Earth Observing System (EOS). Расположение идентичных приборов на двух разных спутниках с солнечно-синхронными полярными орбитами позволяет достигать высокой частоты наблюдений: спутник Terra пересекает экватор в утренние часы (около 10:30 местного времени), тогда как Aqua проходит этот же участок в послеполуденное время (около 13:30). Для исследования мезомасштабных атмосферных циклонических вихрей (МАЦВ) над Черным морем такая конфигурация орбитальной группировки является критически важной, так как она позволяет фиксировать суточную динамику развития конвективных систем и отслеживать эволюцию вихревых спиралей на различных

стадиях их жизненного цикла — от момента зарождения под влиянием орографии до стадии диссипации в открытом море.

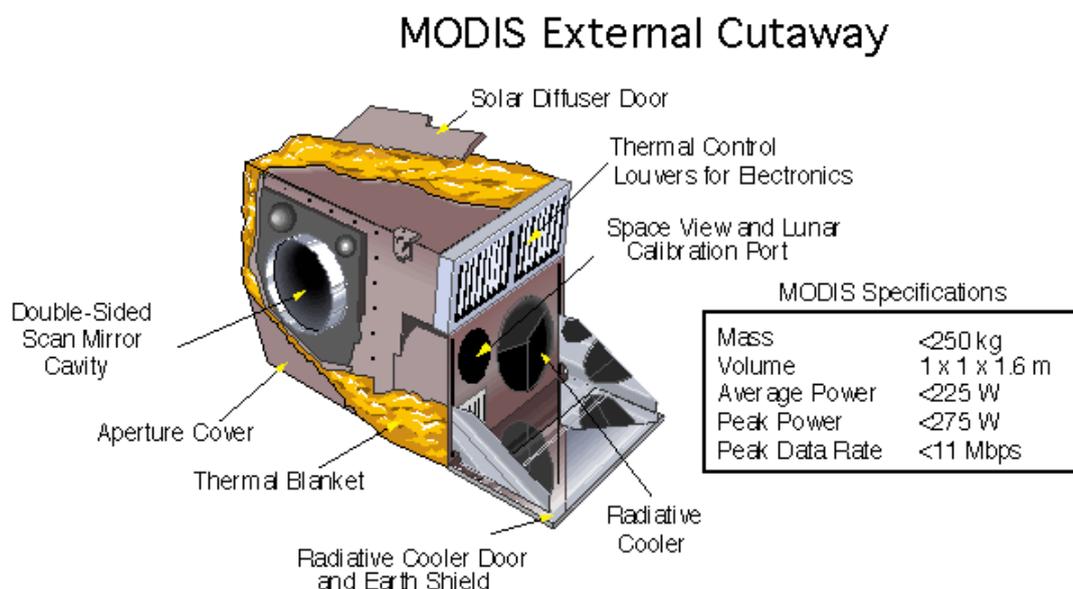


Рисунок 2.1 – внешний разрез блока MODIS [19]

Физика функционирования MODIS основана на регистрации электромагнитного излучения в 36 спектральных диапазонах, охватывающих интервал от 0,4 до 14,4 микрон. Сложная оптико-механическая схема прибора, построенная на принципе поперечного сканирования (Рисунок 2.3) («whiskbroom scanner»), обеспечивает полосу обзора шириной 2330 километров, что позволяет полностью покрывать акваторию Черного моря за один проход спутника. При анализе мезомасштабных структур особое значение имеют первые два канала видимого и ближнего инфракрасного диапазона (0,62–0,67 мкм и 0,84–0,87 мкм соответственно), которые обладают беспрецедентным для метеорологических приборов надирным разрешением в 250 метров. Столь высокая детальность изображений дает исследователю возможность идентифицировать не только общую морфологию вихря, но и его внутреннюю

микроструктуру, включая отдельные кучево-дождевые ячейки, радиальные линии конвергенции и зоны восходящих потоков, которые зачастую имеют линейные размеры менее одного километра.

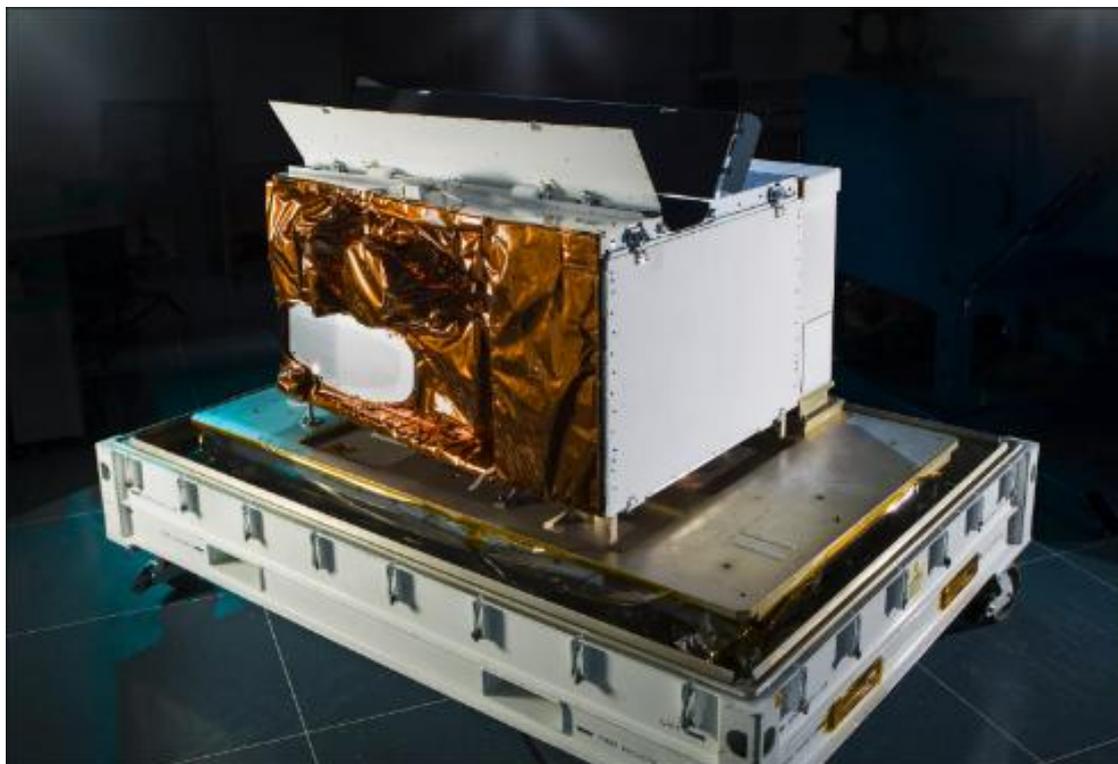


Рисунок 2.2 – внешний вид модуля VIIRS [20]

В ночной период, когда оптические каналы неинформативны, мониторинг переходит в тепловой инфракрасный диапазон. Здесь ключевыми являются 31-й и 32-й каналы (10,78–12,27 мкм), работающие в окне прозрачности атмосферы. Яркостная температура, фиксируемая в этих каналах, напрямую коррелирует с высотой верхней границы облаков (ВГО). Для мезомасштабных атмосферных циклонических вихрей (МАЦВ) характерно наличие мощных кучево-дождевых башен, которые на ИК-снимках отображаются как зоны экстремально низких температур (до -40°C ... -50°C). Анализ разности яркостных температур в каналах «водяного пара» (каналы 27–29) позволяет оценивать влагозапас средней

тропосферы, что дает косвенную информацию о потенциале интенсификации вихря еще до начала формирования выраженной спиралевидной структуры.

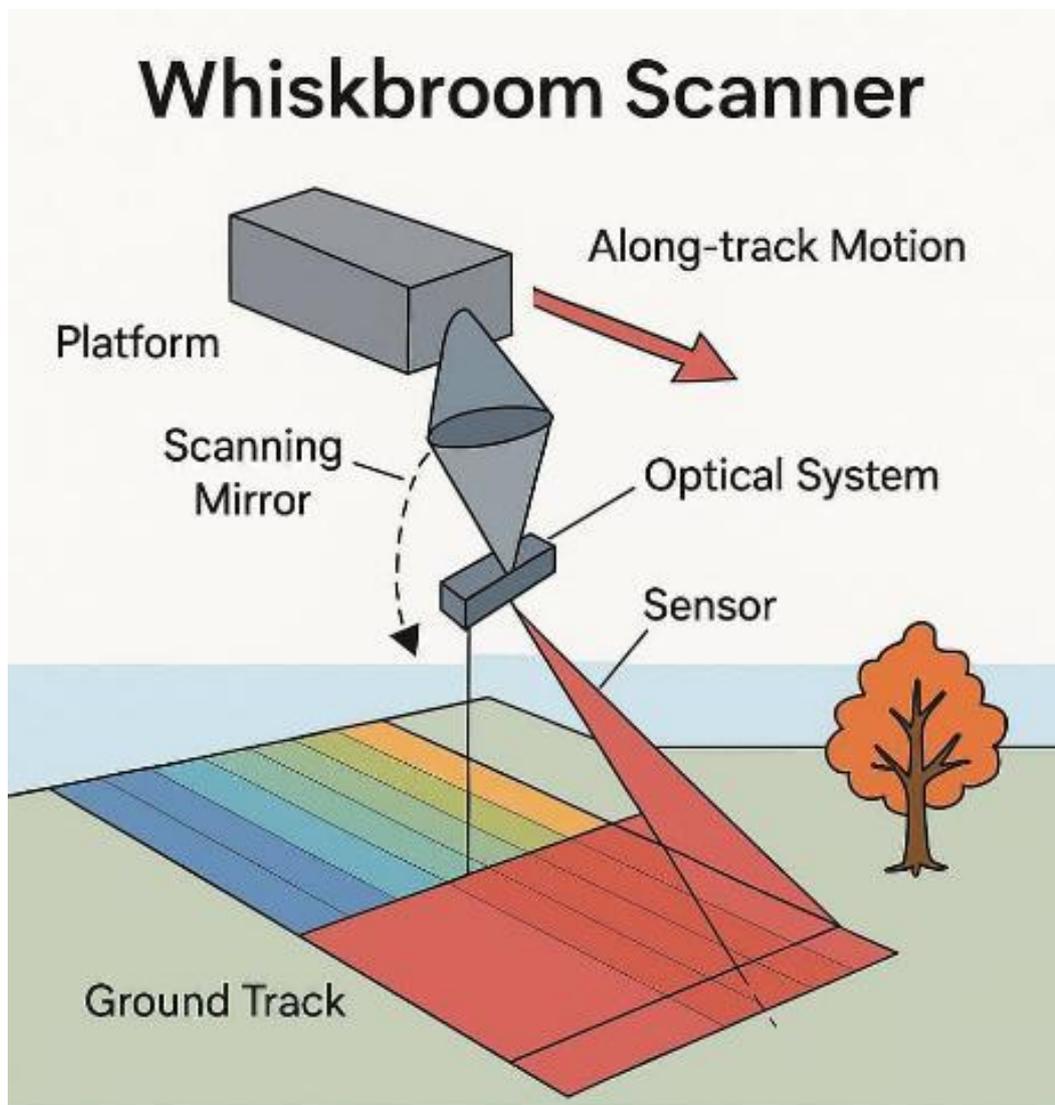


Рисунок 2.3 – Принцип работы поперечного сканирования [21]

Дальнейшим технологическим этапом развития систем зондирования стал прибор VIIRS, установленный на спутниках Suomi NPP и серии JPSS. Обладая полосой обзора 3040 км, VIIRS превосходит MODIS по охвату территории, полностью исключая «пропуски» между витками над Черноморским бассейном. Уникальной физической особенностью VIIRS является наличие

панхроматического канала DNB (Day/Night Band), предназначенного для съемки в условиях сверхнизкой освещенности. Технология DNB позволяет фиксировать излучение в видимом спектре, используя свет луны или естественное свечение атмосферы, что делает возможным визуальное обнаружение облачных вихрей в ночное время. Для формирования полноценного архива МАЦВ за 2012–2022 гг. данные DNB стали незаменимым инструментом, так как они позволяют преодолеть ограничение традиционной ИК-съемки, при которой низкие облака зачастую сливаются по температуре с поверхностью моря. Высокая чувствительность этого канала позволяет четко разделять уровни облачности и отслеживать перемещение центров завихренности в течение всей ночи, обеспечивая непрерывность мониторинга, необходимую для расчета скоростей смещения вихревых систем.

Важным аспектом «материальной части» исследования является использование производных продуктов спутникового зондирования, в частности данных о температуре поверхности моря (SST). Для мезомасштабного циклогенеза над Черным морем SST выступает в роли основного энергетического параметра. Алгоритмы обработки MODIS/VIIRS позволяют восстанавливать поля температуры воды с точностью до 0,5 К при разрешении 1 км. Это позволяет выявлять локальные температурные аномалии («пятна тепла»), которые зачастую служат триггерами для зарождения вихрей прибрежного и открытого типов.

Тем не менее, эксплуатация оптических и ИК-сенсоров сопряжена с определенными ограничениями физического характера. Основным из них является непрозрачность облачности для данных диапазонов, что делает невозможным прямое зондирование структуры ветра и давления под облачным слоем. Для преодоления этого барьера в работе используется методология комплексирования: спутниковая информация высокого разрешения служит для морфологического анализа и точной локализации центра вихря, в то время как динамические параметры восстанавливаются по данным реанализа. Таким образом, технический комплекс MODIS-VIIRS обеспечивает необходимую

эмпирическую основу исследования, позволяя с высокой точностью фиксировать геометрию, тип и стадию развития мезомасштабных атмосферных систем над всей акваторией Черного моря.

Особое внимание при использовании спутниковых данных уделяется проблеме атмосферной коррекции, особенно в прибрежных зонах Черного моря, где влияние аэрозольного загрязнения и близость горного рельефа Кавказа могут вносить искажения в регистрируемый сигнал. Физические алгоритмы, заложенные в продукты MODIS и VIIRS, учитывают рэлеевское рассеяние молекулами газа и рассеяние Ми на частицах аэрозоля, что позволяет восстанавливать истинные значения отражательной способности облаков и температуры поверхности моря (SST). Для нашего архива параметры SST, полученные с помощью ИК-каналов, выступают в качестве индикатора энергетического потенциала акватории. Высокая точность определения температуры поверхности (до 0,5 К) позволяет верифицировать наличие тепловых пятен и фронтальных разделов, которые часто служат очагами генерации мезомасштабных вихрей.

Помимо сканирующих радиометров, поставляющих информацию о планиметрической структуре облачности, критически важную роль в исследовании играют данные атмосферных зондировщиков (саундеров), таких как AIRS (Atmospheric Infrared Sounder) на спутнике Aqua и CrIS (Cross-track Infrared Sounder) на платформе Suomi NPP (Рисунок 2.4). В отличие от обычных камер, данные приборы являются гиперспектральными инфракрасными спектрометрами, предназначенными для восстановления вертикальных профилей температуры и влажности атмосферы.

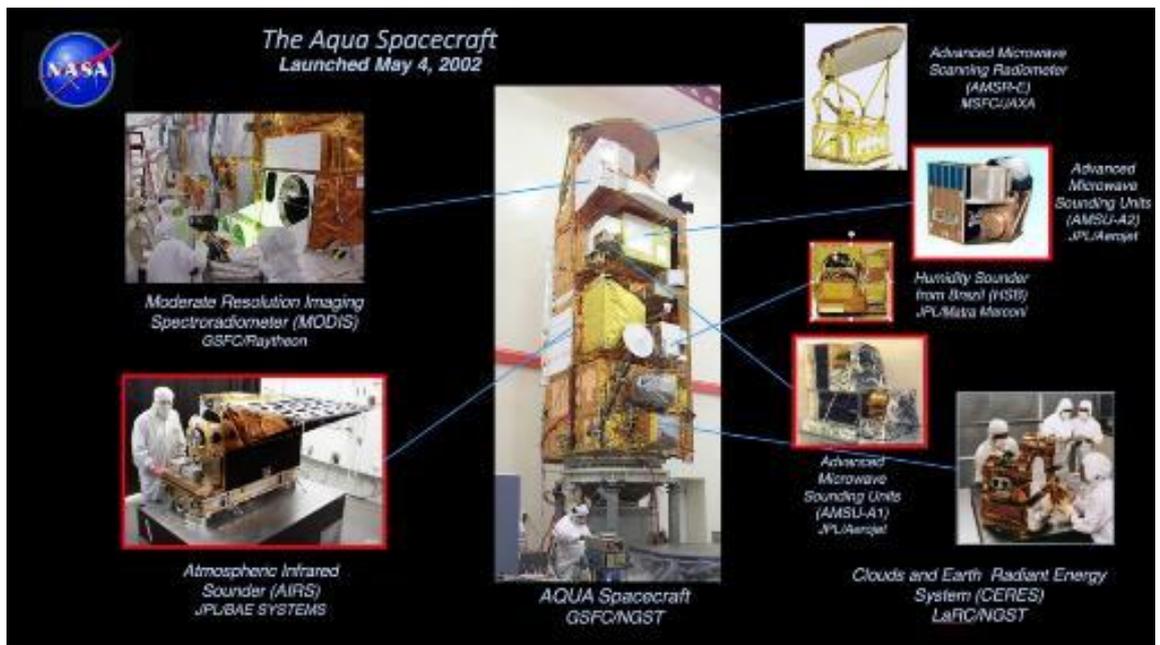


Рисунок 2.4 – инструментальный комплекс спутника Aqua [22]

Физический принцип работы саундеров основан на регистрации излучения в тысячах узких спектральных каналов, настроенных на линии поглощения атмосферных газов (преимущественно углекислого газа и водяного пара). Поскольку поглощение на разных длинах волн происходит на разных высотах, приборы позволяют проводить своего рода «томографию» атмосферного столба. Для задач мониторинга мезомасштабных структур это дает возможность определять термодинамические характеристики воздушных масс непосредственно в ядре вихря. В частности, данные саундеров позволяют зафиксировать наличие холодного высотного ложбины над прогретой поверхностью моря, что является главным предиктором мезоциклогенеза.

Интеграция данных AIRS/CrIS с данными реанализа NCEP повышает достоверность исследования, так как спутниковое зондирование обеспечивает реальную пространственную детализацию термических неоднородностей, которую модели иногда сглаживают.

2.2 Физические принципы регистрации сигнала и алгоритмы предварительной обработки данных

Интерпретация спутниковых изображений требует четкого понимания того, как именно формируется цифровой сигнал на борту космического аппарата и какие трансформации он претерпевает перед попаданием в аналитическую систему. Платформы Terra, Aqua и Suomi NPP функционируют на солнечно-синхронных орбитах высотой порядка 700–824 км. Орбитальная механика этих спутников рассчитана на прохождение экватора в фиксированное местное солнечное время (Local Solar Time). Для задач нашего исследования эта геометрическая жесткость играет решающую роль: она обеспечивает постоянство условий освещенности. Угол падения солнечных лучей на подстилающую поверхность для снимков, сделанных в один и тот же сезон, но в разные годы, остается практически неизменным. Это исключает появление артефактов, связанных с длинными тенями от облачных башен, и позволяет корректно сравнивать морфологию вихрей.

Важным аспектом комплексного анализа является интеграция данных оптического зондирования с термодинамическими параметрами атмосферных столбов. В контексте исследования мезомасштабных вихрей ключевую роль играет связь между температурой воздушных масс и геопотенциальной высотой изобарических поверхностей (в частности, уровня 700 гПа). Физическая природа этой связи базируется на барометрической формуле, согласно которой толщина атмосферного слоя между двумя уровнями давления прямо пропорциональна его средней температуре. Холодные воздушные массы обладают более высокой плотностью, что приводит к «сжатию» слоя и, как следствие, к снижению геопотенциальной высоты целевого уровня давления. Напротив, в теплых массах воздух расширяется, увеличивая вертикальную мощность слоя.

Для нашего исследования эта зависимость имеет принципиальное значение при верификации вихревых структур. Спутниковые приборы (саундеры), измеряя уходящее тепловое излучение, позволяют восстановить

вертикальный профиль температур. Обнаружение области аномально низкого геопотенциала на высоте 700 гПа в сочетании с данными спутникового мониторинга температуры поверхности моря (SST) позволяет идентифицировать очаги термодинамической неустойчивости. Низкий геопотенциал на высоте свидетельствует о наличии холодного ядра, которое при взаимодействии с относительно теплой подстилающей поверхностью Черного моря провоцирует интенсивные конвективные токи. Таким образом, сопоставление прояски геопотенциальных высот с яркостными характеристиками облачных спиралей позволяет нам с высокой точностью определять стадию развития и энергетический потенциал мезоциклона.

Первичный физический процесс, лежащий в основе получения данных — регистрация спектральной плотности энергетической яркости (Spectral Radiance). Оптико-механические сканеры (MODIS) и радиометры с матричными детекторами (VIIRS) фиксируют поток электромагнитного излучения, попадающий во входную апертуру прибора. Измеряемая величина L_{TOA} (Top of Atmosphere) на верхней границе атмосферы представляет собой сложную суперпозицию сигналов. Она складывается из излучения, отраженного непосредственно от целевого объекта (облачности или воды), и диффузного излучения самой атмосферы, возникающего вследствие рассеяния на молекулах газа и аэрозолях. Над темной поверхностью Черного моря вклад атмосферной дымки в видимом диапазоне может достигать 80–90% от общего сигнала, что делает необработанные данные («сырой» уровень Level-0) непригодными для анализа мезомасштабных структур.

Преобразование потока фотонов в информативный продукт происходит в процессинговых центрах NASA через цепочку калибровок. На этапе формирования данных уровня Level-1B цифровые отсчеты с детекторов переводятся в физические величины ($\text{Вт}/(\text{м}^2 \cdot \text{стер} \cdot \text{мкм})$) с использованием бортовых эталонов. Сканирующее зеркало прибора на каждом обороте «смотрит» на внутреннее абсолютно черное тело и панель солнечного диффузора, что позволяет в реальном времени компенсировать температурный

дрейф сенсоров и деградацию оптики. Параллельно выполняется процедура геолокации: каждый пиксель растрового изображения привязывается к географическим координатам на эллипсоиде Земли. Точность этой операции, базирующейся на эфемеридах спутника и звездных датчиках ориентации, достигает долей пикселя. Именно эта высокая координатная точность позволяет нам впоследствии накладывать на оптический снимок поля давления из реанализа NCEP без риска пространственного сдвига.

Ключевым этапом для визуальной идентификации вихрей выступает атмосферная коррекция. В используемой системе NASA Worldview визуализируется продукт «Corrected Reflectance» (Скорректированная отражательная способность). Алгоритм обработки моделирует прохождение луча через толщу атмосферы, вычитая вклад рэлеевского рассеяния (рассеяние света на молекулах воздуха, дающее голубой фон) и поглощение озоном. Для каналов видимого диапазона это критически важно: без коррекции тонкие периферийные спирали вихрей и линии конвергенции были бы неразличимы на фоне атмосферной вуали. Алгоритм восстанавливает контрастность сцены, приближая изображение к виду, который имел бы наблюдатель, находящийся непосредственно над облаками.

Специфика работы с тепловыми ИК-каналами (используемыми для данных OISST и оценки высоты облаков) имеет свои физические нюансы. Здесь измеряется собственное излучение Земли, и задача сводится к решению обратной задачи переноса излучения для получения яркостной температуры. Сенсоры VIIRS и MODIS используют «окна прозрачности» атмосферы (диапазоны 3.7, 11 и 12 мкм), где поглощение водяным паром минимально. Однако даже в этих окнах учитывается ослабление сигнала, зависящее от влагосодержания атмосферного столба. Продукты уровня Level-2, попадающие в наш архив, уже содержат пересчитанные значения температуры подстилающей поверхности (SST) и верхней границы облачности, очищенные от влияния атмосферы. Работа с такими верифицированными физическими величинами переводит

исследование из разряда описательного в количественное, позволяя оперировать точными термодинамическими параметрами вихря.

2.3 Характеристика массивов атмосферного реанализа и океанографических данных

Диагностика мезомасштабных атмосферных процессов над Черноморским регионом требует привлечения массивов данных, которые сочетали бы в себе высокую временную однородность и предельную пространственную точность. В рамках формирования десятилетнего архива мезомасштабных атмосферных циклонических вихрей (МАЦВ) за период 2012–2022 гг. критически важным этапом стало обоснование выбора источников данных для описания состояния свободной атмосферы и подстилающей поверхности моря. В отличие от синоптических объектов глобального масштаба, мезовихри крайне чувствительны к локальным термическим аномалиям и тонкой структуре барических полей, что предопределило использование связки из классического атмосферного реанализа NCEP/NCAR и специализированного океанографического продукта сверхвысокого разрешения OISST Ultra High Resolution.

Изучение термодинамического состояния атмосферы в данной работе базируется на использовании данных реанализа NCEP/NCAR, предоставляемого Лабораторией физических наук (PSL) Национального управления океанических и атмосферных исследований (NOAA). Данный массив данных представляет собой результат реализации глобальной системы усвоения данных, которая на протяжении десятилетий остается неизменной в своей вычислительной основе. Физическая значимость использования именно этого реанализа для долгосрочного мониторинга заключается в его методологической стабильности: в отличие от оперативных прогностических моделей, которые регулярно обновляются, NCEP Reanalysis использует фиксированную систему спектрального статистического анализа (SSI). Это гарантирует, что выявленные

нами за 10 лет тренды в повторяемости вихрей обусловлены реальными климатическими изменениями, а не модификациями расчетных алгоритмов модели. Схема ассимиляции данных SSI работает по принципу минимизации функционала погрешностей, объединяя информацию от наземных станций, судов, самолетов, спутниковых зондов и данных аэрологического зондирования, в том числе и тех, что архивируются Университетом Вайоминга.

Для анализа мезомасштабного циклогенеза первостепенное значение имеет вертикальная структура атмосферы, которая в модели NCEP представлена на 28 гибридных сигма-уровнях. Особый акцент в нашем исследовании сделан на изобарической поверхности 700 гПа, которая располагается на высоте примерно 3000 метров над уровнем моря. Выбор этого уровня как ключевого диагностического признака в созданном архиве обусловлен его уникальной физической ролью: он находится выше слоя планетарного пограничного трения, но при этом достаточно низко, чтобы отражать непосредственную термодинамическую связь с подстилающей поверхностью. Данные NCEP позволяют с высокой точностью восстанавливать поля геопотенциальной высоты и температуры на этом уровне, что необходимо для идентификации «ядер холода». Именно на уровне 700 гПа мы фиксируем адвекцию холодных воздушных масс, которая при натекании на теплую акваторию Черного моря создает взрывную статическую неустойчивость. Математическая база реанализа позволяет рассчитывать такие производные параметры, как относительный вихрь скорости и дивергенция потоков, что дает возможность верифицировать наличие замкнутой циркуляции, обнаруженной на спутниковых снимках.

Параллельно с анализом атмосферы, важнейшим компонентом исследования является изучение состояния морской поверхности, выступающей в роли энергетического фундамента для мезовихрей. Для этих целей в работе привлечен уникальный продукт OISST Ultra High Resolution (UHR) версии 2.0, доступный через платформу NASA PODAAC. Физика создания этого массива данных радикально отличается от стандартных глобальных карт температуры поверхности моря (SST). Продукт OISST UHR базируется на методе

оптимальной интерполяции (OI), который интегрирует данные инфракрасных радиометров AVHRR и микроволновых сенсоров, таких как AMSR. Пространственное разрешение этого массива составляет 0.01 градуса, что соответствует примерно одному километру на местности. Для Черного моря с его сложной береговой линией и узкими зонами прибрежных апвеллингов такое разрешение является критически необходимым. Оно позволяет выявлять мезомасштабные «пятна тепла» в районе Кавказского побережья или Южного берега Крыма, которые зачастую становятся очагами генезиса вихрей, но полностью игнорируются глобальными моделями с низким разрешением.

Особая ценность продукта OISST UHR заключается в его классификации как данных уровня L4 (Level 4). Это означает, что конечный пользователь получает пространственно непрерывное поле данных, в котором полностью устранены пробелы, вызванные облачностью. Математический алгоритм интерполяции в OISST использует данные микроволновых датчиков, для которых облака прозрачны, в качестве базиса, на который накладываются высокодетальные измерения инфракрасных сенсоров при наличии ясного неба. В контексте формирования нашего десятилетнего архива это обеспечило возможность получения точных значений SST для каждого случая МАЦВ, даже если сам вихрь в момент съемки был полностью закрыт мощной облачной спиралью. Наличие таких данных позволило нам количественно оценить разность температур между морем и уровнем 700 гПа, которая является фундаментальным триггером конвекции. Использование продукта PODAAC позволило обнаружить, что многие вихри зарождаются именно над локальными антициклоническими круговоротами Черного моря, характеризующимися повышенным теплозапасом, что было бы невозможно зафиксировать при использовании менее детальных данных.

Интеграция данных NCEP и OISST UHR в рамках единой методологии потребовала решения сложной задачи согласования различных пространственных сеток. Если реанализ NCEP предоставляет данные на относительно грубой регулярной сетке, то океанографические данные обладают

на порядок большей детализацией. Процесс их совместной обработки осуществлялся в программной среде Panoply с предварительной конвертацией всех исходных массивов в формат NetCDF-4. Этот формат выбран не случайно: он позволяет инкапсулировать в одном файле не только значения физических величин, но и подробные метаданные, соответствующие стандартам CF (Climate and Forecast conventions). В Panoply выполнялась процедура билинейной интерполяции данных реанализа на сетку спутниковых наблюдений, что позволило проводить корректное наложение изолиний давления и температуры на снимки MODIS/VIIRS. Такой подход обеспечил высокую точность локализации центров вихрей, позволив нам утверждать, что каждый объект в архиве за 2012–2022 гг. привязан к конкретной физической аномалии в поле температуры или давления.

Более того, использование данных NCEP позволяет дополнить исследование анализом влажностного режима. Удельная и относительная влажность на различных уровнях тропосферы, извлекаемая из реанализа, дает возможность оценить количество скрытой теплоты, доступной для высвобождения при конденсации внутри вихря. В сочетании с данными OISST о температуре воды, это позволяет рассчитывать потоки тепла и влаги по полуэмпирическим формулам, описывающим обмен энергией на границе раздела сред. Для десятилетнего периода наблюдений такая комплексная информация позволила выявить интересную закономерность: мезомасштабные вихри в восточной части моря часто поддерживаются за счет специфических прибрежных «карманов» теплой воды, зафиксированных сенсорами PODAAC, в то время как динамический импульс они получают от высотных ядер холода, диагностированных по картам NCEP.

Завершая характеристику используемых массивов, необходимо подчеркнуть, что выбор связки NCEP и OISST UHR продиктован стремлением к максимальной объективности. Данные NCEP обеспечивают стабильность климатического фона и корректность описания средней тропосферы, в то время как данные PODAAC дают необходимую мезомасштабную детализацию

подстилающей поверхности. Это сочетание позволило превратить методическую базу исследования из простого набора инструментов в мощную аналитическую систему. Сформированный на этой основе архив за 2012–2022 гг. содержит не только визуальные образы вихрей, но и их полные физические «паспорта», включающие в себя значения температуры воды в точке генезиса, вертикальные температурные градиенты и характеристики поля ветра.

2.4 Методический алгоритм сбора, обработки и визуализации данных

Реализация комплексного подхода к исследованию мезомасштабных вихрей требует выстраивания четкой технологической цепочки, охватывающей этапы от первичного поиска событий до их детальной физической интерпретации. Учитывая огромный объем архивных данных (спутниковые снимки за несколько лет и соответствующие им поля реанализа), крайне важно было выбрать инструменты, позволяющие оптимизировать процесс отбора релевантных случаев. В качестве базовой платформы для визуального поиска и первичной фильтрации спутниковой информации был выбран интерактивный сервис NASA Worldview, использующий возможности системы GIBS (Global Imagery Browse Services).

Выбор NASA Worldview в качестве основного инструмента работы с оптическими данными обусловлен его способностью обеспечивать мгновенный доступ к полноразмерным мозаикам снимков MODIS и VIIRS без необходимости предварительной загрузки «тяжелых» гранул данных на локальный носитель. Это позволяет исследователю в режиме реального времени просматривать суточные состояния облачного покрова над Черным морем, оперативно отсеивая дни со сплошной фронтальной облачностью или отсутствием интересующих структур. Сервис предоставляет возможность накладывать слои векторных границ и скорректированных по отражательной способности изображений (Corrected Reflectance), что существенно облегчает визуальную детекцию вихревых спиралей на фоне водной поверхности. Именно с помощью Worldview

был сформирован первичный каталог случаев («кейсов») МАЦВ, для которых впоследствии запрашивались детальные термодинамические данные.

Следующим этапом стало формирование массива данных о состоянии атмосферы для отобранных дат. Выгрузка данных реанализа NCEP/NCAR из хранилища Climate Data Store (CDS) осуществлялась в формате NetCDF (Network Common Data Form). Выбор именно этого формата, в противовес более старому GRIB, не случаен и продиктован требованиями современной научной обработки многомерных массивов. NetCDF является самоописываемым форматом: каждый файл содержит не только сами массивы данных, но и исчерпывающие метаданные (описание переменных, единицы измерения, параметры координатной сетки и времени). Это исключает риск ошибок при интерпретации физических величин.

Кроме того, архитектура NetCDF идеально оптимизирована для хранения многомерных матриц, где каждой точке пространства (широта, долгота, высота) и времени соответствует конкретное значение параметра. Для задач нашего исследования, оперирующего 137 вертикальными уровнями и почасовой дискретностью, это критически важно. К определенным недостаткам формата можно отнести сравнительно большой объем файлов, однако это полностью компенсируется скоростью доступа к произвольным срезам данных (slicing) без необходимости считывать весь массив целиком, а также широкой поддержкой в среде научного программирования и визуализации.

Описанный методический подход позволил реализовать масштабную задачу по формированию специализированного архива мезомасштабных атмосферных циклонических вихрей над Черным морем за десятилетний период с 2012 по 2022 год. Столь длительный временной ряд был необходим для получения достоверной статистической картины и нивелирования влияния межгодовой изменчивости атмосферной циркуляции. Созданный архив представляет собой структурированную базу данных, где каждый выявленный случай прошел многоступенчатую верификацию. В архиве зафиксированы не только точные даты и координаты центров вихрей, но и их принадлежность к

одному из четырех типов согласно принятой генетико-географической классификации.

Информационная полнота каждой записи в архиве обеспечивается за счет интеграции трех ключевых компонентов. Во-первых, это спутниковое изображение высокого разрешения, фиксирующее морфологию облачного покрова. Во-вторых, это поле температуры поверхности моря, позволяющее оценить тепловой запас акватории в точке генезиса. В-третьих, это восстановленное поле приводного ветра, которое дает количественную оценку интенсивности циркуляции. Наличие такого детального массива данных превращает исследование из анализа разрозненных кейсов в полноценный климатический мониторинг, позволяющий объективно оценить масштаб влияния мезоциклогенеза на метеорологический режим региона.

Для визуализации и анализа полей реанализа использовался специализированный кросс-платформенный программный комплекс Panoply Data Viewer, разработанный Институтом космических исследований имени Годдарда (NASA GISS). Panoply де-факто является стандартом для быстрой и качественной визуализации геопространственных данных в форматах NetCDF, HDF и GRIB. Ключевое преимущество данного ПО в рамках нашей работы заключается в его возможности корректно обрабатывать геопривязку и на лету строить карты в различных картографических проекциях. Поскольку спутниковые снимки и сетка реанализа изначально могут иметь разные системы координат, Panoply позволяет унифицировать их представление, накладывая поля изолиний (например, геопотенциала или давления) и цветовые заливки (температура, влажность) на карту региона с высокой точностью.

Непосредственный алгоритм совместной обработки строился следующим образом: после обнаружения вихря на снимке в Worldview фиксировалось точное время пролета спутника и географические координаты центра облачной структуры. Далее для этого же временного среза (с округлением до ближайшего часа) в Panoply загружался файл NetCDF с данными NCEP/NCAR. С помощью встроенных математических функций программы производился расчет

производных величин, отсутствующих в исходном файле в явном виде, например, модуля градиента температуры или относительной завихренности.

Финальным этапом верификации являлось сопоставление визуального образа вихря с расчетными полями. Случай признавался подтвержденным, если центр облачной спирали на снимке пространственно совпадал (с учетом допустимой погрешности сетки) с локальным максимумом циклонической завихренности на уровне 700 гПа и областью пониженного давления у поверхности. Такой методический подход, объединяющий визуальный анализ в Worldview и глубокую диагностику полей в Panoply на базе формата NetCDF, обеспечил высокую достоверность полученных результатов и позволил отсеять ложные срабатывания, связанные с орографической облачностью, не имеющей вихревой природы.

Глава 3. Анализ пространственно-временной изменчивости и условий формирования мезомасштабных вихрей над Черным морем

3.1 Статистический анализ повторяемости МАЦВ за период 2012–2022 гг.

Сформированный в ходе исследования массив данных, включающий 997 верифицированных случаев мезоциклогенеза, позволяет провести глубокий анализ динамики атмосферных процессов над Черноморским регионом за десятилетие (Рисунок 3.1). Распределение обнаруженных структур в пространстве акватории и во времени подчиняется строгой физической логике, определяемой взаимодействием региональной циркуляции, рельефа побережья и термического состояния морской поверхности.

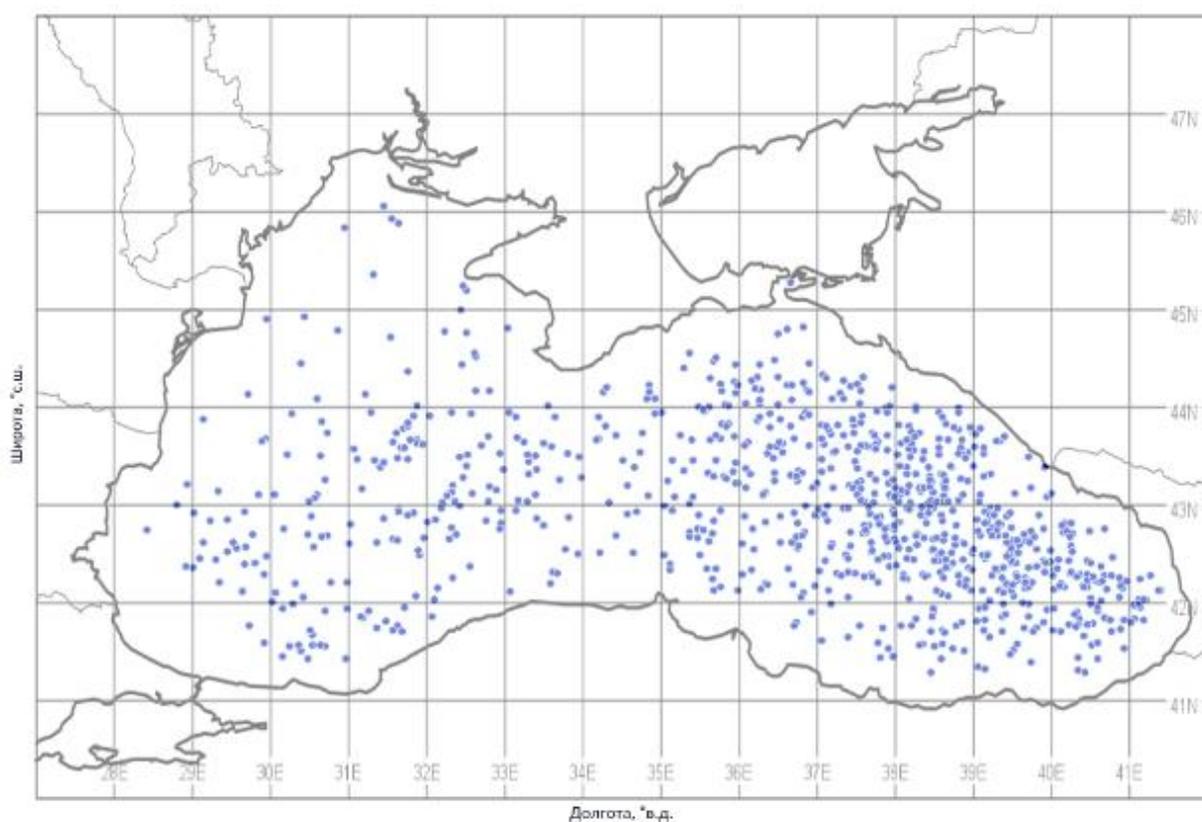


Рисунок 3.1 – пространственное распределение зафиксированных случаев наблюдения мезовихрей в Черноморской акватории

Пространственный анализ показывает, что доминирующую роль в регионе играют вихри восточного побережья, на долю которых приходится 44% всех зафиксированных случаев (Рисунок 3.2). Столь высокая повторяемость в восточном секторе акватории обусловлена орографическим фактором. При преобладании северных и северо-восточных потоков Кавказский хребет выступает в качестве масштабного динамического барьера. Обтекание горных массивов приводит к деформации воздушного потока и формированию заветренных зон пониженного давления, где при наличии достаточного влагозапаса инициируется закручивание мезомасштабных спиралей.

В отличие от береговых структур, вихри открытого моря (35%) тяготеют к центральной и юго-восточной частям акватории, где глубина бассейна и значительная инерционность прогретых водных масс обеспечивают стабильный поток тепла в атмосферу. Здесь механизмы формирования смещаются от орографических к чисто термодинамическим: вихрь зарождается как результат неустойчивости в слое «водная поверхность — средняя тропосфера». «Оторвавшиеся» вихри (15%) представляют собой промежуточную стадию эволюции; зачастую они инициируются у береговой черты, но, аккумулируя энергию за счет конденсации влаги, теряют связь с орографической опорой и мигрируют в глубь акватории. Наименее часто фиксируемые юго-западные вихри (6%) возникают лишь при специфических синоптических условиях, связанных с выходом средиземноморских циклонов или редкими затеками холода в западную часть моря, что подчеркивает уникальность физико-географических условий этого сектора.

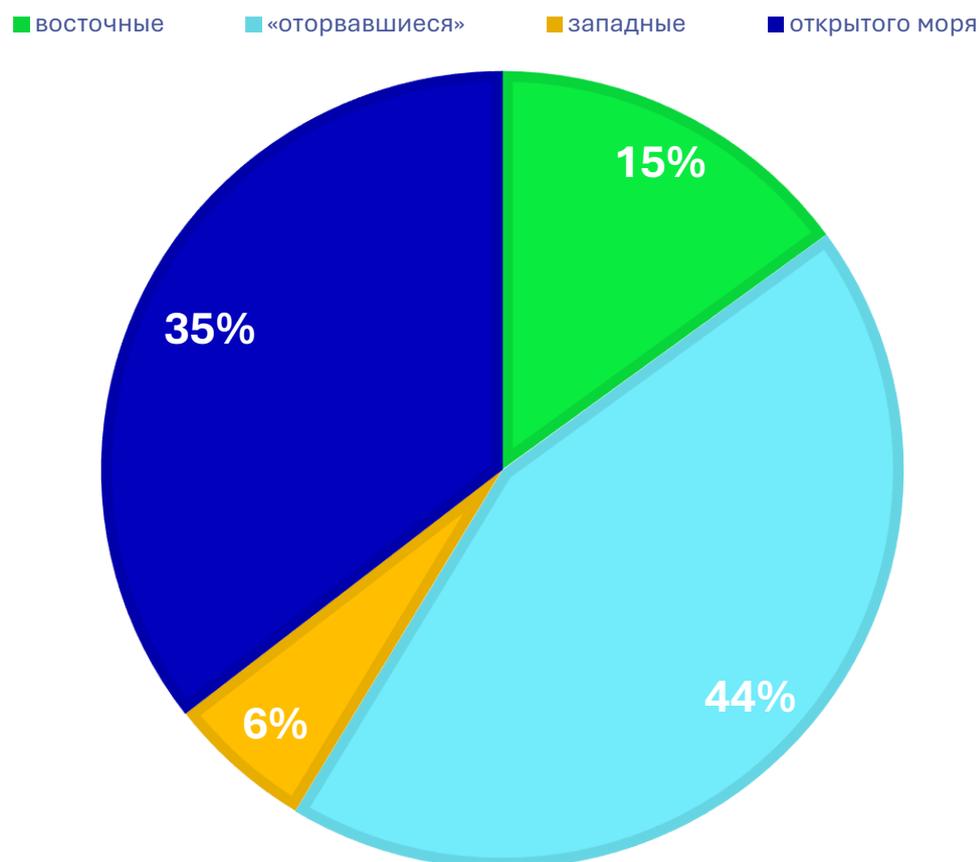


Рисунок 3.2 – процентное соотношение типов МАЦВ

Сезонный ход повторяемости МАЦВ демонстрирует два ярко выраженных режима активности (Рисунок 3.3). Основной максимум, приходящийся на июль (124 случая) и август (143 случая), неразрывно связан с достижением максимальных значений температуры поверхности моря. В этот период акватория выступает в роли мощного аккумулятора энергии. Формирование вихря в летние месяцы провоцируется вторжением холодных воздушных масс на высоты свободной атмосферы (уровень 700 гПа и выше), что создает экстремальную вертикальную неустойчивость. Огромный поток скрытой теплоты, выделяющейся при конденсации поднятого вверх пара, стабилизирует вихревую структуру и обеспечивает ее длительное существование.

Вторичный зимний подъем активности (февраль — 78 случаев) имеет иную физическую природу. В холодное время года определяющим фактором становится резкий температурный контраст между быстро остывающим материком и относительно теплым незамерзающим морем. Вынос холодного воздуха на морскую поверхность порождает мощные потоки явного тепла, которые при поддержке сильных ветров и орографических возмущений вблизи Крыма и Кавказа трансформируются в мезомасштабные циклоны. Это означает, что зимний вихреобразовательный процесс носит более динамический характер, в то время как летний — преимущественно конвективный.

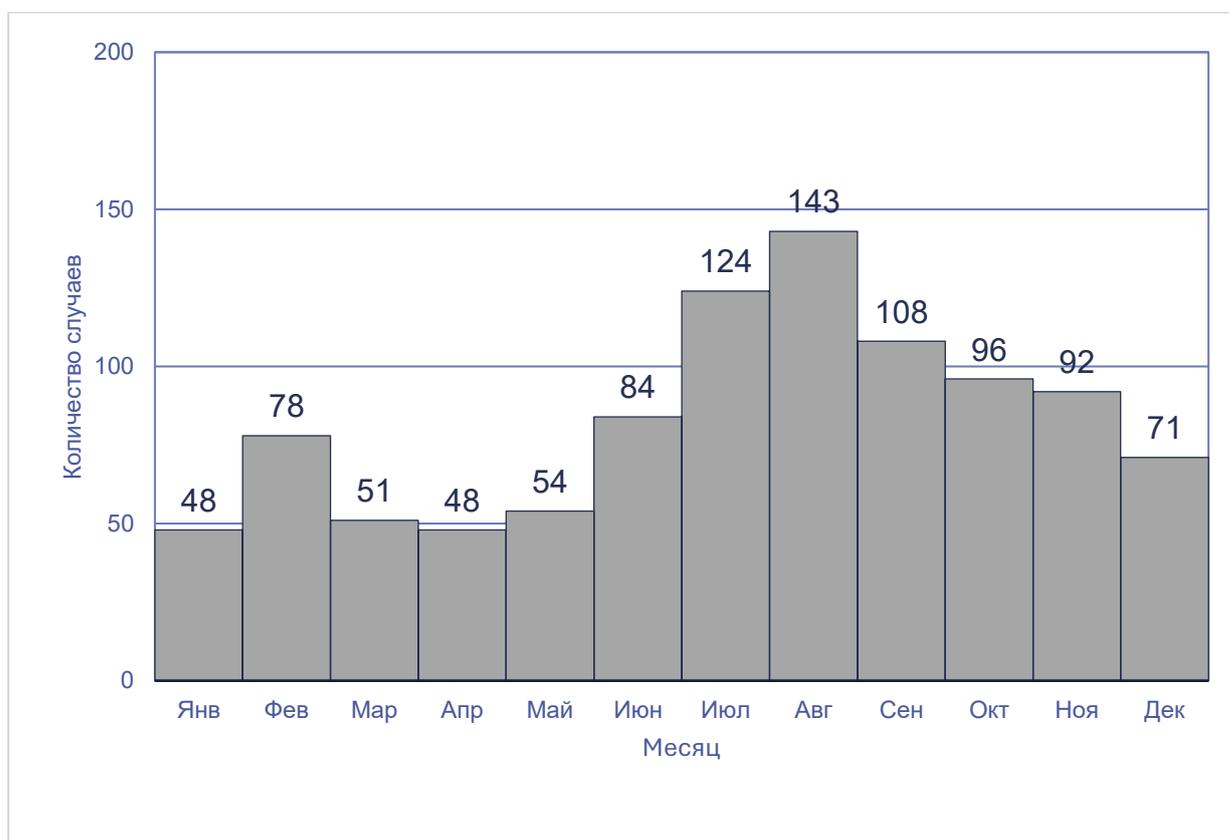


Рисунок 3.3 – межсезонная изменчивость повторяемости мезовихрей

Межгодовая изменчивость за период 2012–2022 гг. выявляет существенные флуктуации в интенсивности мезоциклогенеза. Минимальные показатели 2014 года (48 случаев) резко контрастируют с пиковыми значениями 2017 (134) и 2018

(121) годов. Столь значительный разрыв свидетельствует о зависимости региональных мезомасштабных процессов от макромасштабных климатических трендов. Аномально высокая повторяемость вихрей в 2017 году может интерпретироваться как индикатор усиления меридионального обмена в атмосфере, когда участвовавшие прорывы арктического воздуха над прогретым Черным морем создавали идеальные условия для «взрывного» формирования МАЦВ.

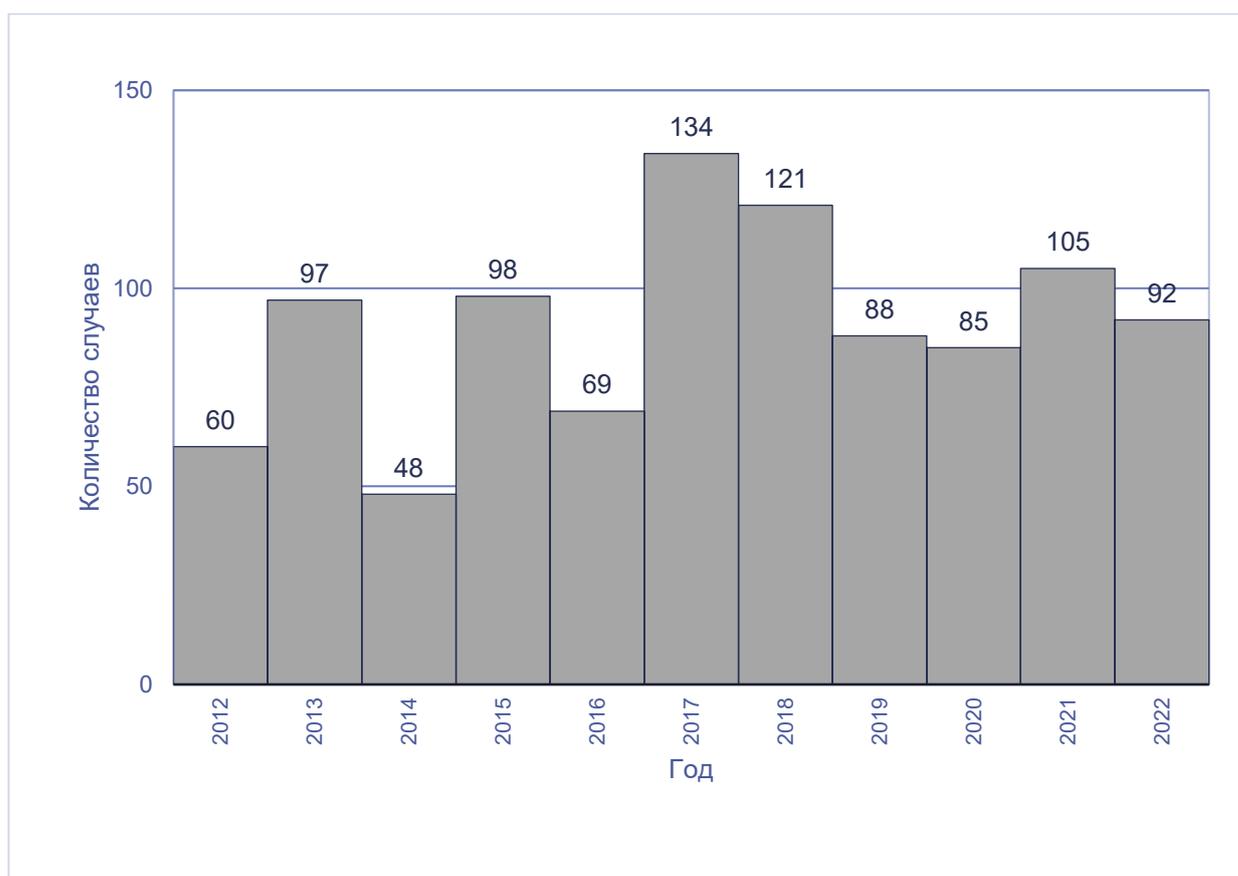
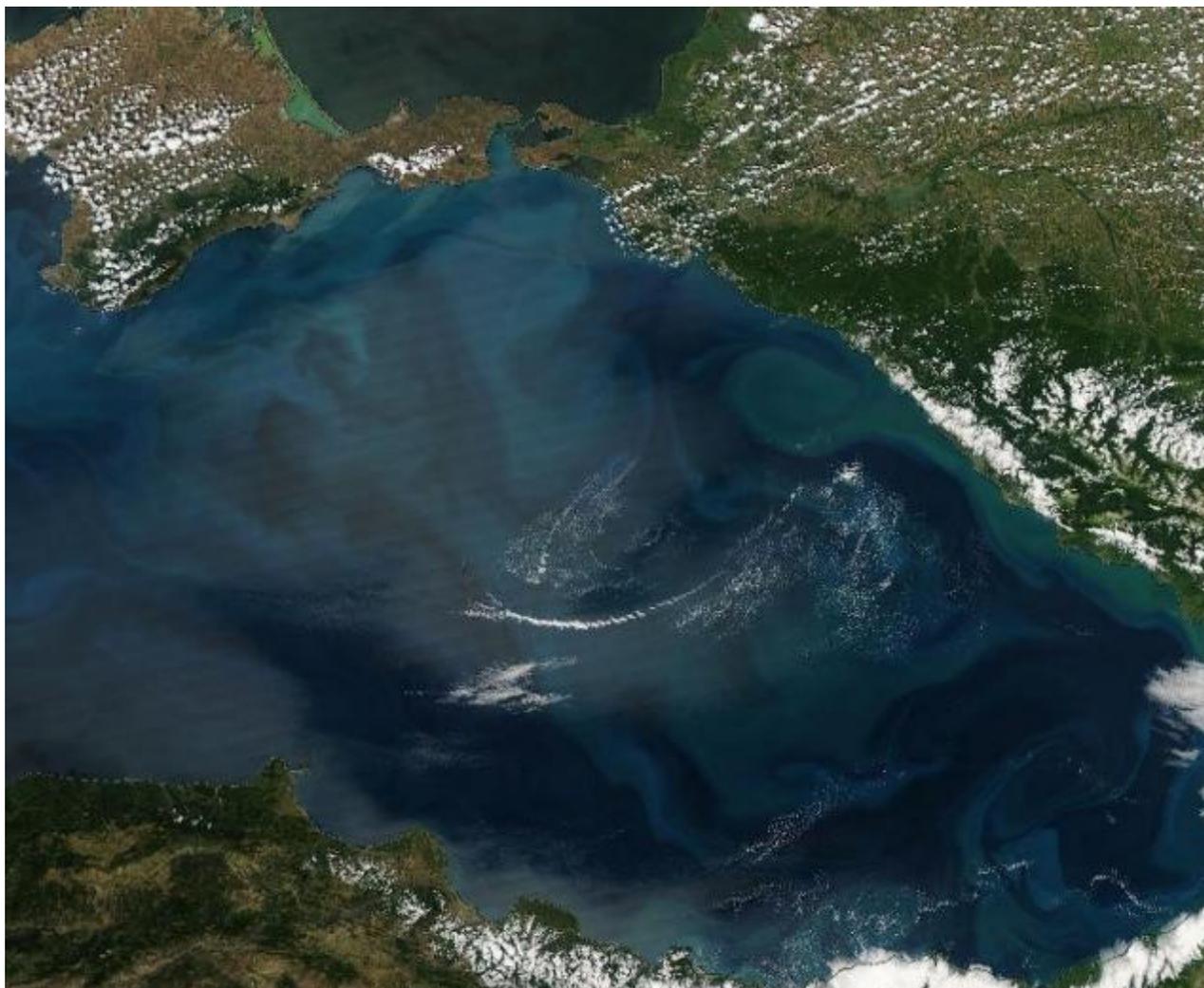


Рисунок 3.4 – межсезонная изменчивость повторяемости мезовихрей

Наблюдаемая динамика последних лет указывает на общую тенденцию к сохранению высокой частоты вихреобразования, что в условиях глобального потепления и роста температуры моря может привести к увеличению повторяемости экстремальных осадков на побережье.

3.2 Интерпретация типовых сценариев в фазах сезонных максимумов

Августовский пик активности, в ходе которого фиксируется максимальное количество вихрей открытого моря (свыше 40 случаев в месяц за период наблюдения) и «оторвавшихся» структур (до 80 случаев), является прямым следствием предельного прогрева экватории. В рассматриваемых кейсах температура поверхности моря (SST) достигает значений 26–28°C, что формирует мощный фоновый поток скрытой теплоты (Рисунок 3.5), (Рисунок 3.6).



a)

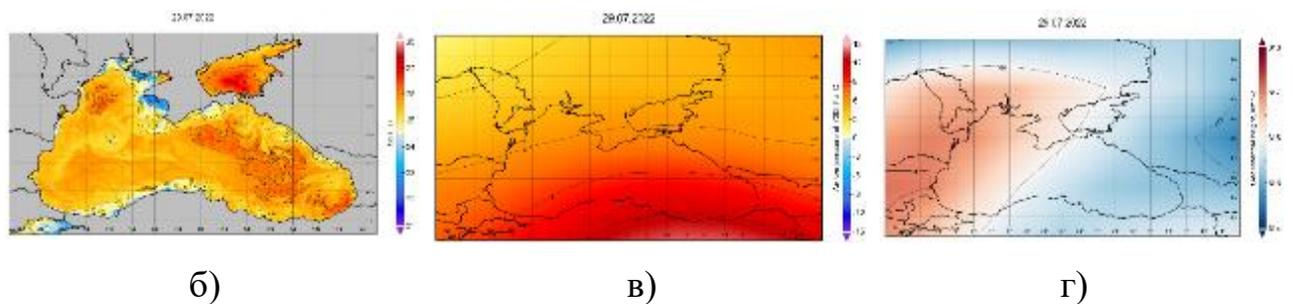
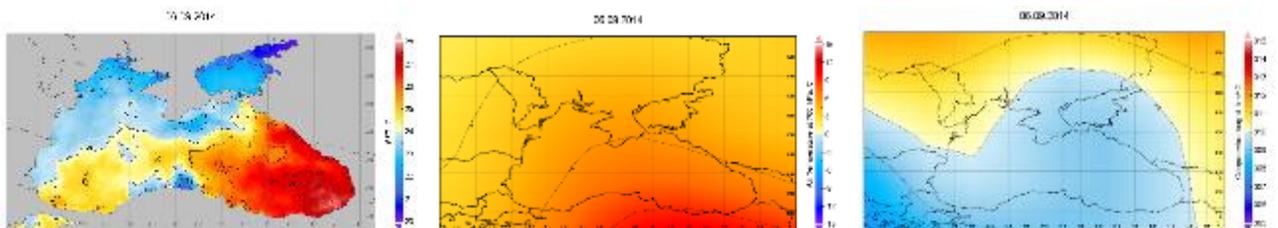


Рисунок 3.5 – МАЦВ оторвавшийся. а) Спутниковый снимок Terra 29.07.2022;
 б) Температура поверхности моря ($^{\circ}\text{C}$); в) Температура воздуха на уровне 700 гПа ($^{\circ}\text{C}$); г) Высота уровня 700 гПа, км^{-2}

Анализ спутниковых данных в эти периоды демонстрирует классическую морфологию мезоциклона: плотное облачное кольцо с признаками глубокой конвекции и выраженным центром вращения. Физическим детерминантом здесь выступает уровень 700 гПа. Совмещение приземного термического минимума давления с высотной холодной ложбиной инициирует режим интенсивной вертикальной неустойчивости. В таких условиях вихрь функционирует как автономная энергетическая ячейка: восходящие потоки переносят влагу к границе свободной атмосферы, где фазовые переходы высвобождают скрытую теплоту, «подкачивающую» систему изнутри. Для «оторвавшихся» вихрей этот момент становится критическим — именно избыток внутренней энергии позволяет им разорвать связь с береговой чертой и мигрировать в центральные районы моря, сохраняя организацию спирали в течение 36–48 часов.



а)



б)

в)

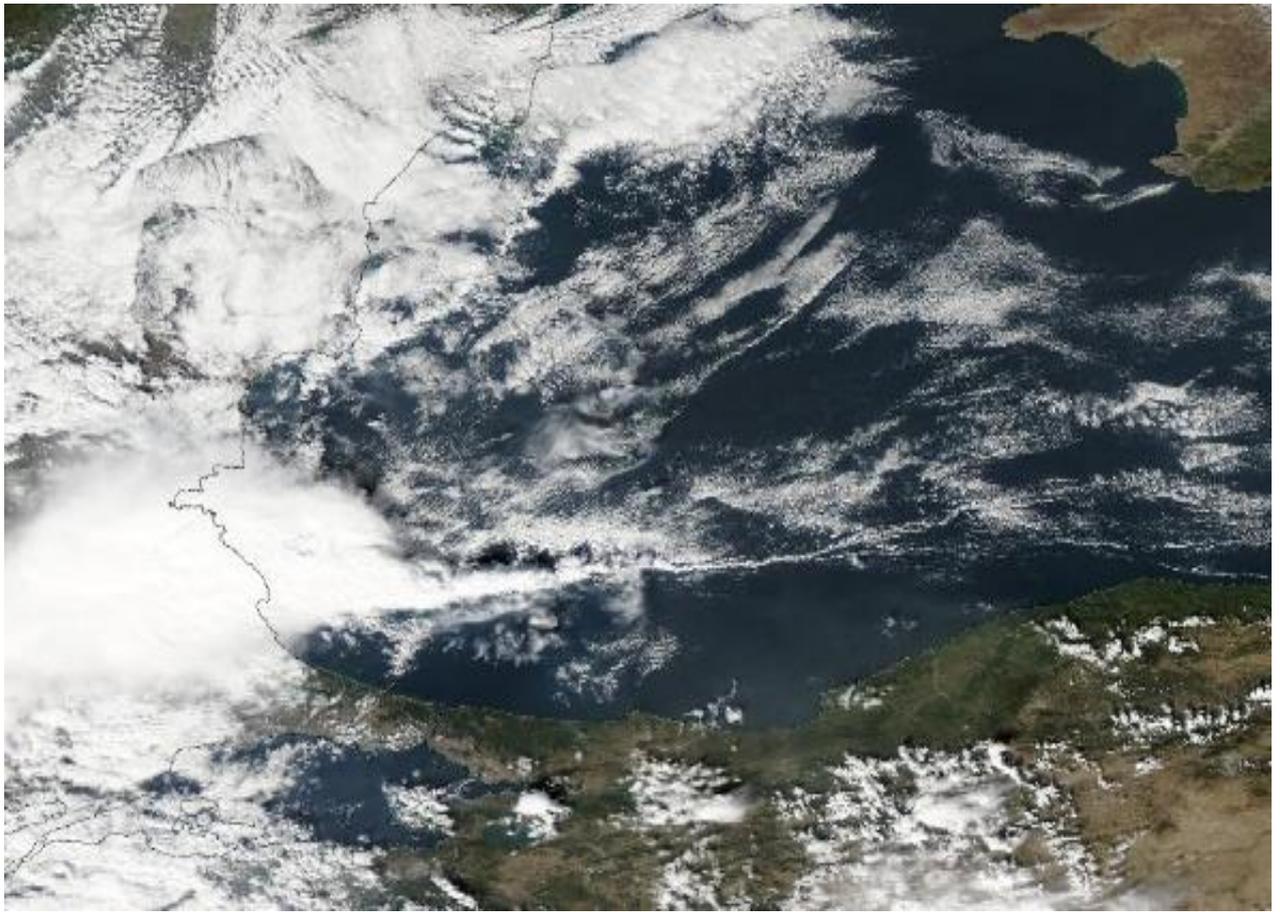
г)

Рисунок 3.6 – МАЦВ открытого моря. а) Спутниковый снимок Terra 06.09.2014;
 б) Температура поверхности моря ($^{\circ}\text{C}$); в) Температура воздуха на уровне 700 гПа ($^{\circ}\text{C}$); г) Высота уровня 700 гПа, км^{-2}

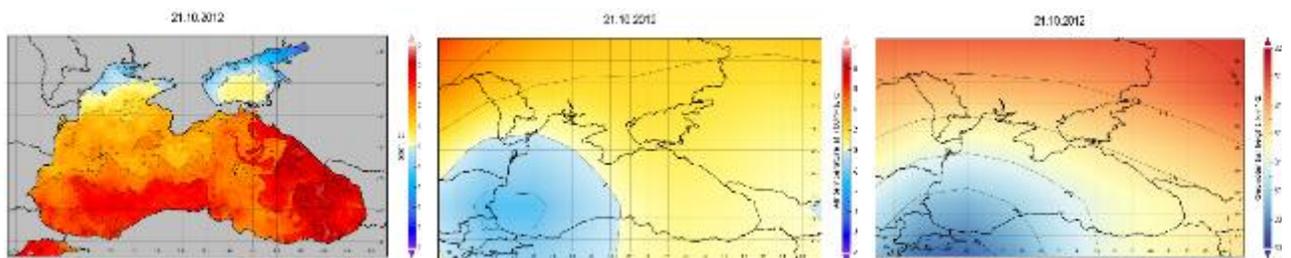
Юго-западный тип вихрей, хотя и является наименее многочисленным (6%), достигает своего максимума именно в феврале и марте. Этот период характеризуется наибольшими контрастами между остывающей сушей и еще

сохраняющим тепло морем. Анализ кейсов из НИР 2025 показывает, что генерация вихрей в западном секторе часто сопряжена с выходом средиземноморских возмущений, которые, попадая в замкнутую котловину Черного моря, трансформируются под влиянием локальных условий.

В отличие от «летних» собратьев, вихри юго-западного побережья и зимние восточные структуры имеют более выраженную бароклинную природу. Здесь ключевым фактором становится не только прогрев, но и динамическое обтекание рельефа (Балканских гор и Крымского полуострова). На спутниковых снимках это проявляется в виде менее массивных, но более «жестких» по структуре завитков, часто лишенных мощных конвективных башен, но обладающих высокой скоростью вращения в нижнем слое (Рисунок 3.7). Физика процесса подтверждается данными реанализа: изобарическая поверхность 700 гПа в эти моменты испытывает резкие деформации («просадки» геопотенциала), указывая на прохождение высотных барических ложбин, которые буквально «раскручивают» приземный слой воздуха.



а)



б)

в)

г)

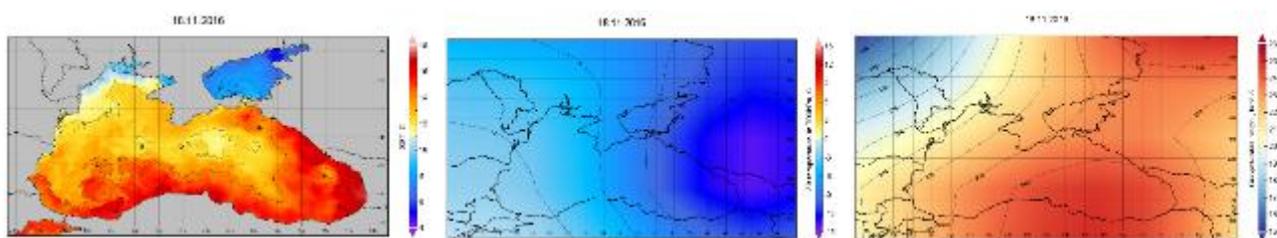
Рисунок 3.7 – МАЦВ западного побережья. а) Спутниковый снимок Terra 09.11.2020; б) Температура поверхности моря (°С); в) Температура воздуха на уровне 700 гПа (°С); г) Высота уровня 700 гПа, км⁻²

Вихри восточного побережья, составляющие 44% выборки, демонстрируют два пика — летний и зимний, что указывает на двойственную природу их генезиса. В летней фазе максимума (август) они развиваются по

комбинированному сценарию: орографическое возмущение за Кавказским хребтом накладывается на экстремальную неустойчивость прогретого моря.



а)



б)

в)

г)

Рисунок 3.8 – МАЦВ прибрежный. а) Спутниковый снимок Terra 18.11.2016; б) Температура поверхности моря ($^{\circ}\text{C}$); в) Температура воздуха на уровне 700 гПа ($^{\circ}\text{C}$); г) Высота уровня 700 гПа, км^{-2}

Анализ данных в эти моменты фиксирует специфическую картину: вихрь зарождается в узкой прибрежной полосе, где потоки, огибающие горы, сталкиваются с восходящими термическими токами от воды. Это создает зону сильной конвергенции ветра. В результате образуются малоподвижные, но крайне интенсивные мезоциклоны, которые нередко становятся причиной катастрофических осадков на побережье Сочи и Туапсе. Вертикальная связность в таких кейсах достигает своего предела — ось вихря практически перпендикулярна поверхности, что минимизирует потери энергии на трение и позволяет системе удерживаться в одной географической точке длительное время (Рисунок 3.8).

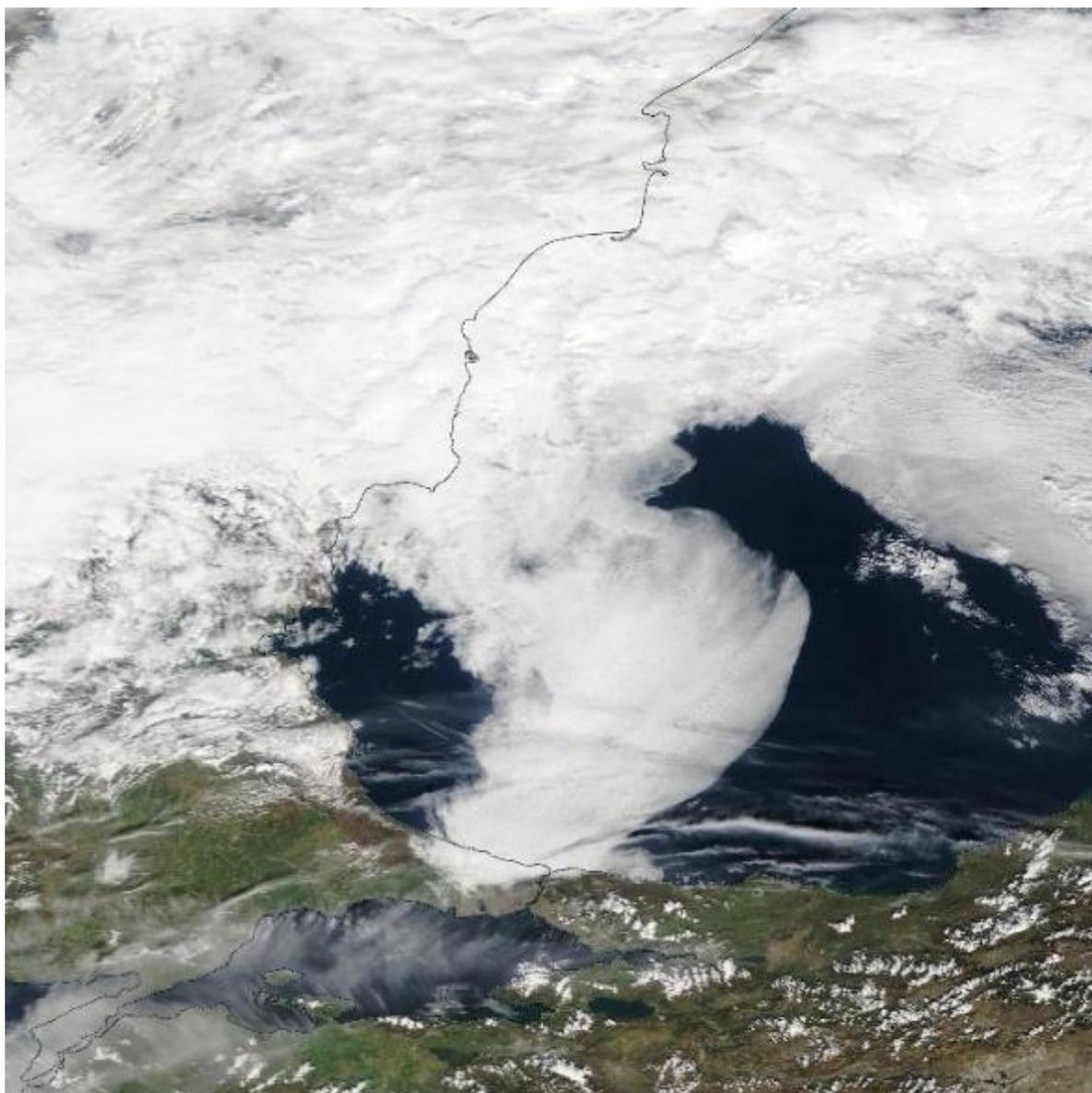
Обобщая анализ всех типов в периоды их максимумов, можно сделать вывод, что наличие «вертикального резонанса» является универсальным условием зрелости вихря. Независимо от сезона и типа, спутниковая визуализация фиксирует оформленную спираль только в те моменты, когда данные реанализа подтверждают существование замкнутой циркуляции или глубокой ложбины на уровне свободной атмосферы.

3.3 Интерпретация типовых сценариев в фазах сезонных минимумов

Анализ мезомасштабных вихрей в периоды их минимальной сезонной повторяемости позволяет окончательно верифицировать гипотезу о ведущей роли динамических факторов в свободной атмосфере. В это время теплозапас акватории минимален, что исключает возможность формирования вихрей исключительно за счет конвекции. Рассмотренные ниже кейсы демонстрируют, как бароклинная неустойчивость и орография компенсируют отсутствие термической поддержки со стороны моря.

Характерным примером западного типа в условиях весеннего минимума является вихрь от 12 марта 2016 года (Рисунок 3.9). Несмотря на то, что в этот период разность температур между водой и воздухом сокращается, спутниковая визуализация фиксирует четкую облачную спираль у западного побережья.

Физика процесса здесь обусловлена выносом холодных воздушных масс с Балканского полуострова, которые при столкновении с относительно более теплой морской поверхностью инициируют завихренность. Решающим фактором «выживания» данной структуры стала глубокая высотная ложбина на уровне 700 гПа, которая обеспечила вертикальную связность системы и позволила ей существовать в условиях крайне ограниченного притока явного тепла от моря.



a)

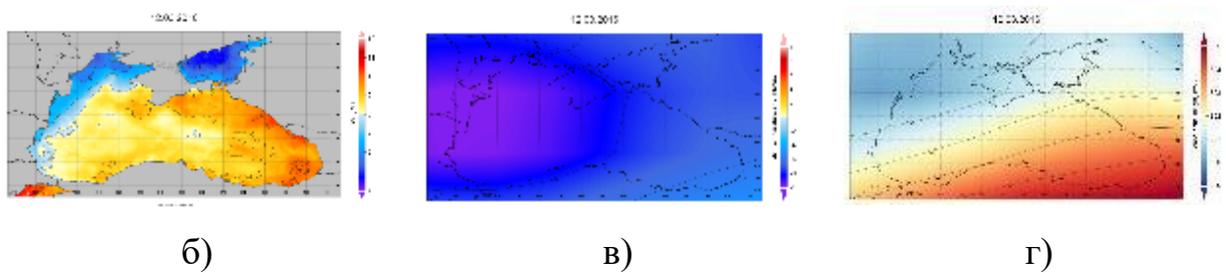
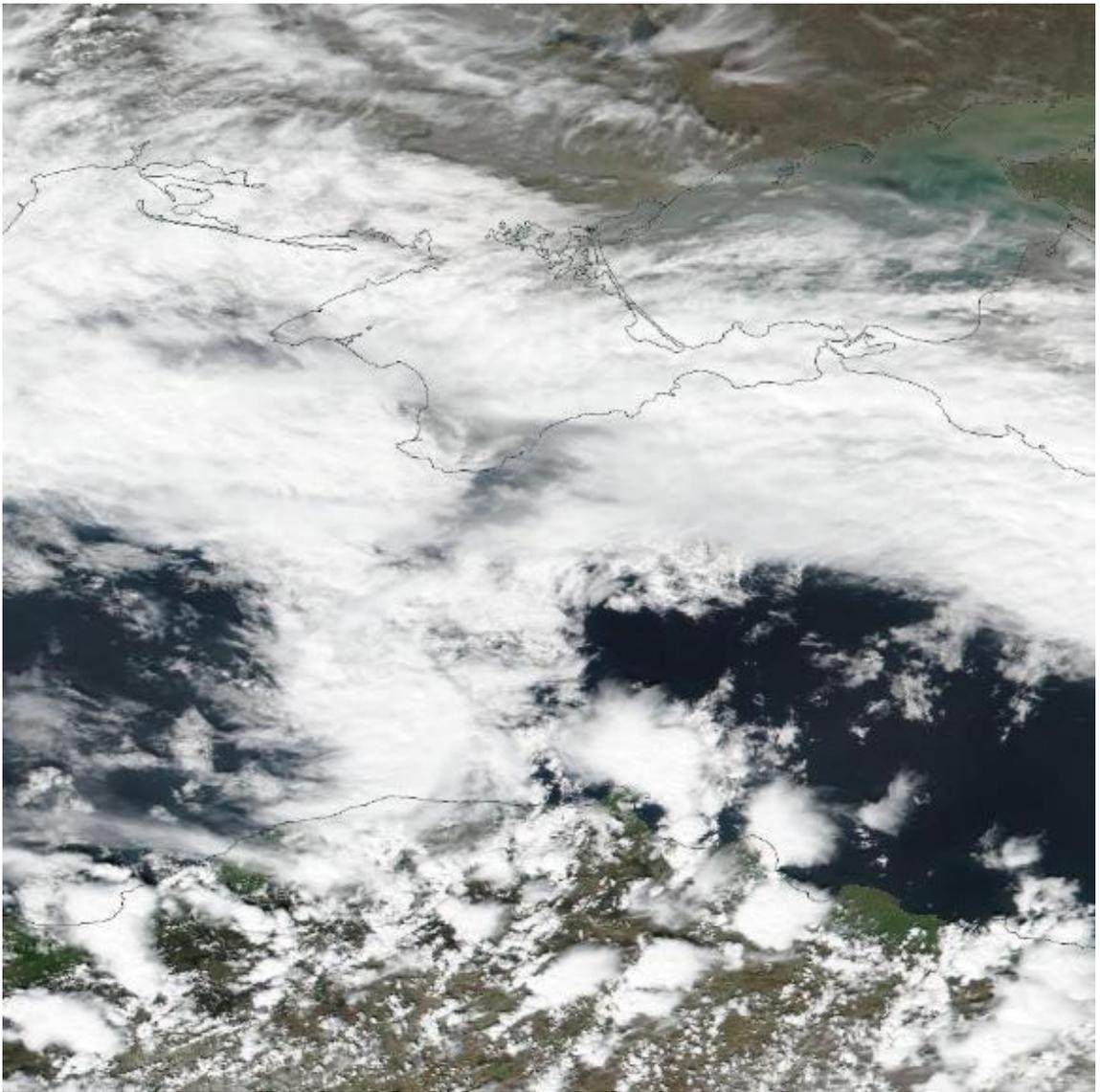
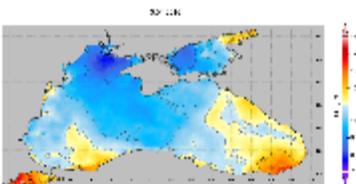


Рисунок 3.9 – МАЦВ западный. а) Спутниковый снимок Terra 12.03.2016; б) Температура поверхности моря ($^{\circ}\text{C}$); в) Температура воздуха на уровне 700 гПа ($^{\circ}\text{C}$); г) Высота уровня 700 гПа, км^{-2}

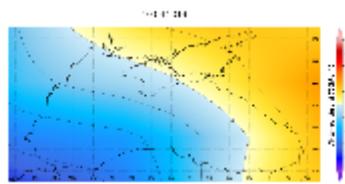
Случай вихря открытого моря от 10 апреля 2016 года демонстрирует специфику циклогенеза в центральной части акватории при минимальном прогреве (Рисунок 3.10). В отличие от мощных летних систем, данный мезоциклон обладает менее плотной облачной структурой, однако сохраняет классический спиралевидный рисунок. Анализ сопряженных данных реанализа показывает, что инициация вращения в открытом море весной возможна только при прохождении интенсивных высотных возмущений. Здесь уровень 700 гПа выступает единственным источником энергии: «просадка» геопотенциала над центральными районами моря провоцирует подъем воздушных масс, формируя вихрь за счет динамической подкачки из средней тропосферы, а не за счет испарения с поверхности.



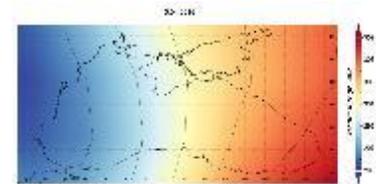
а)



б)



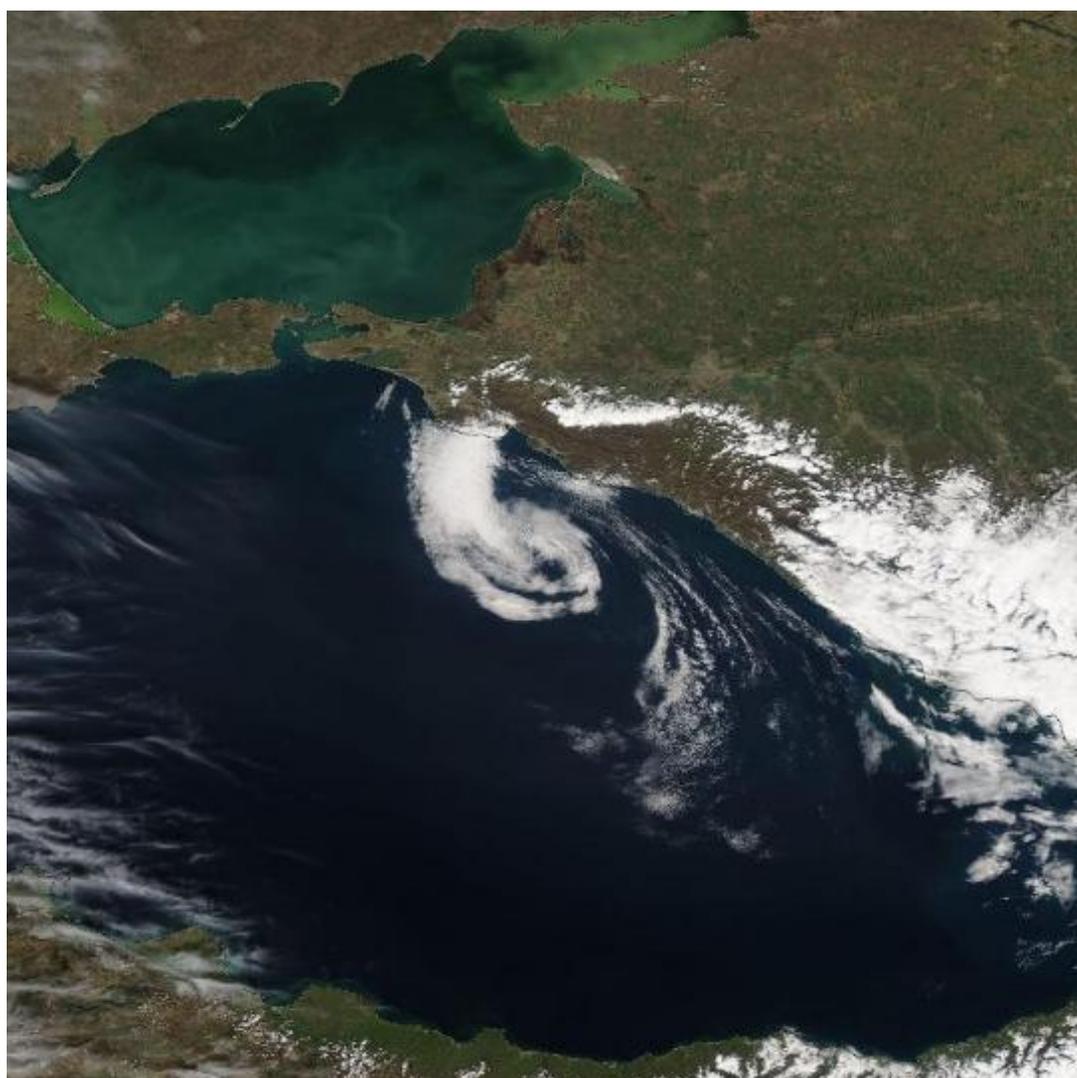
в)



г)

Рисунок 3.10 – МАЦВ открытого моря. а) Спутниковый снимок Terra 10.04.2016; б) Температура поверхности моря (°C); в) Температура воздуха на уровне 700 гПа (°C); г) Высота уровня 700 гПа, км⁻²

Прибрежный восточный вихрь, зафиксированный 4 апреля 2020 года, наглядно иллюстрирует доминирующее влияние орографии в переходный период (Рисунок 3.11). В условиях, когда термическая конвекция еще подавлена, решающее значение приобретает механическое обтекание Кавказского хребта. Спутниковые данные Suomi NPP подтверждают локализацию вихря в непосредственной близости от горного барьера. Генезис данной структуры объясняется формированием динамической зоны конвергенции за хребтом, которая при поддержке мезомасштабного понижения давления на высоте трансформируется в устойчивую облачную ячейку. Это подтверждает, что для прибрежных типов МАЦВ орографический триггер остается первичным даже в фазе сезонного минимума активности.



a)

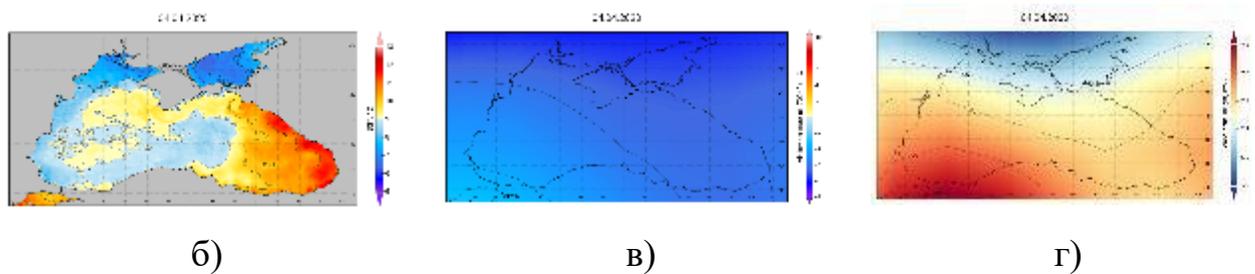
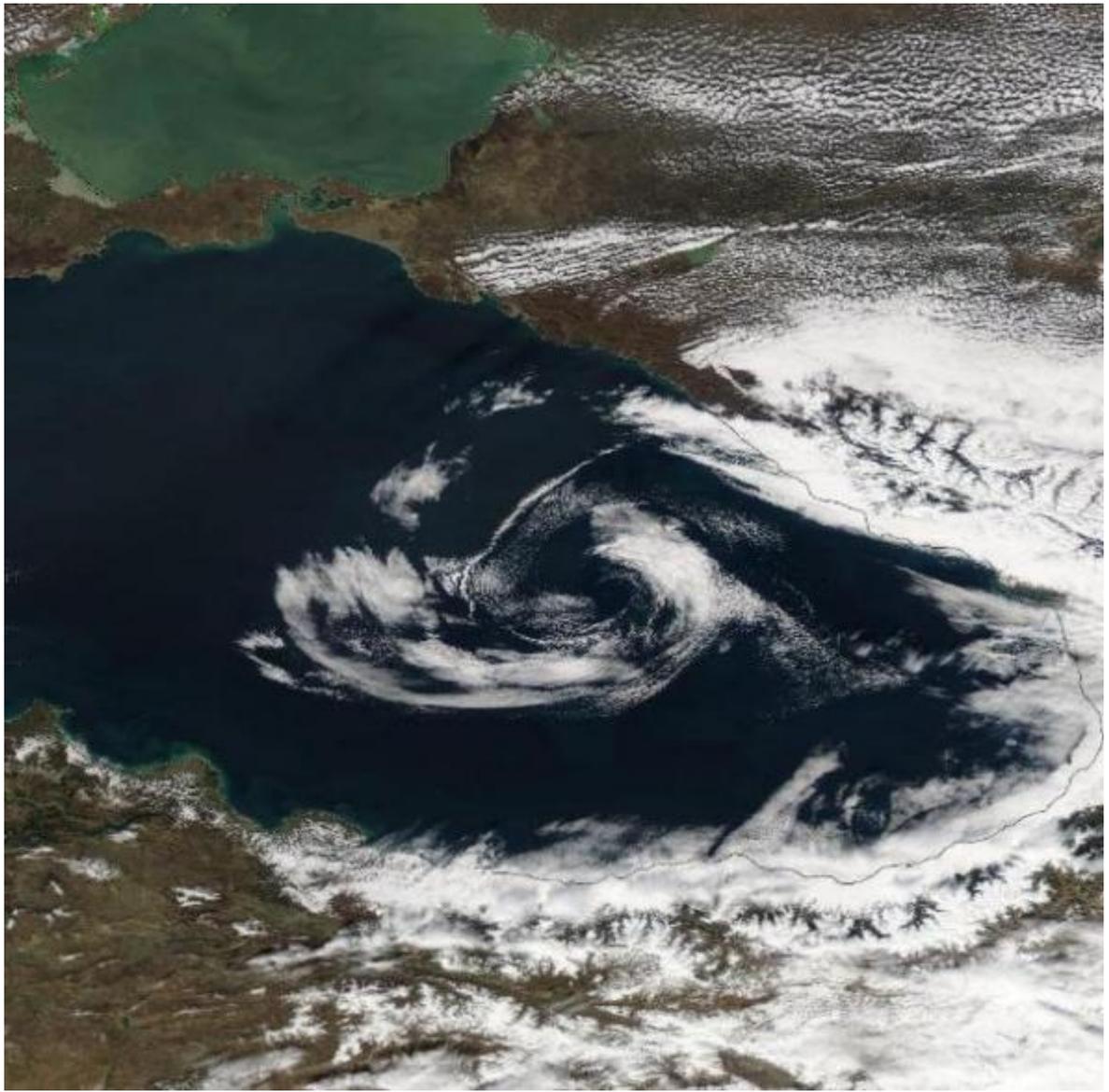
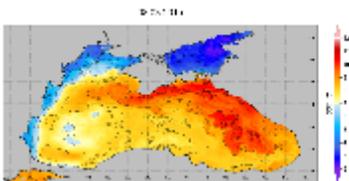


Рисунок 3.11 – МАЦВ прибрежный. а) Спутниковый снимок Suomi NPP 04.04.2020; б) Температура поверхности моря (°С); в) Температура воздуха на уровне 700 гПа (°С); г) Высота уровня 700 гПа, км⁻²

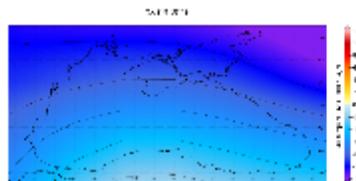
Завершает анализ кейс кавказского «оторвавшегося» вихря от 8 марта 2015 года (Рисунок 3.12). Процесс отделения вихря от береговой черты в начале весны является энергетически сложным процессом, так как требует значительного импульса для преодоления силы трения и перехода к дрейфу. Визуализация по данным Aqua показывает момент миграции структуры вглубь акватории. Успешный «отрыв» системы в этом случае стал возможен благодаря пространственному совмещению приземного вихря с подвижной высотной ложбиной. Данный пример доказывает, что мобильность МАЦВ в холодное время года полностью определяется ведущим потоком в свободной атмосфере: вихрь перемещается как единая вертикальная колонна вслед за областью низкого геопотенциала на уровне 700 гПа.



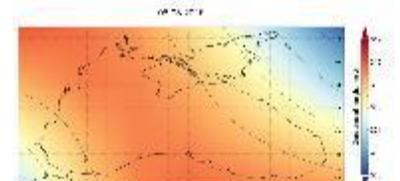
а)



б)



в)



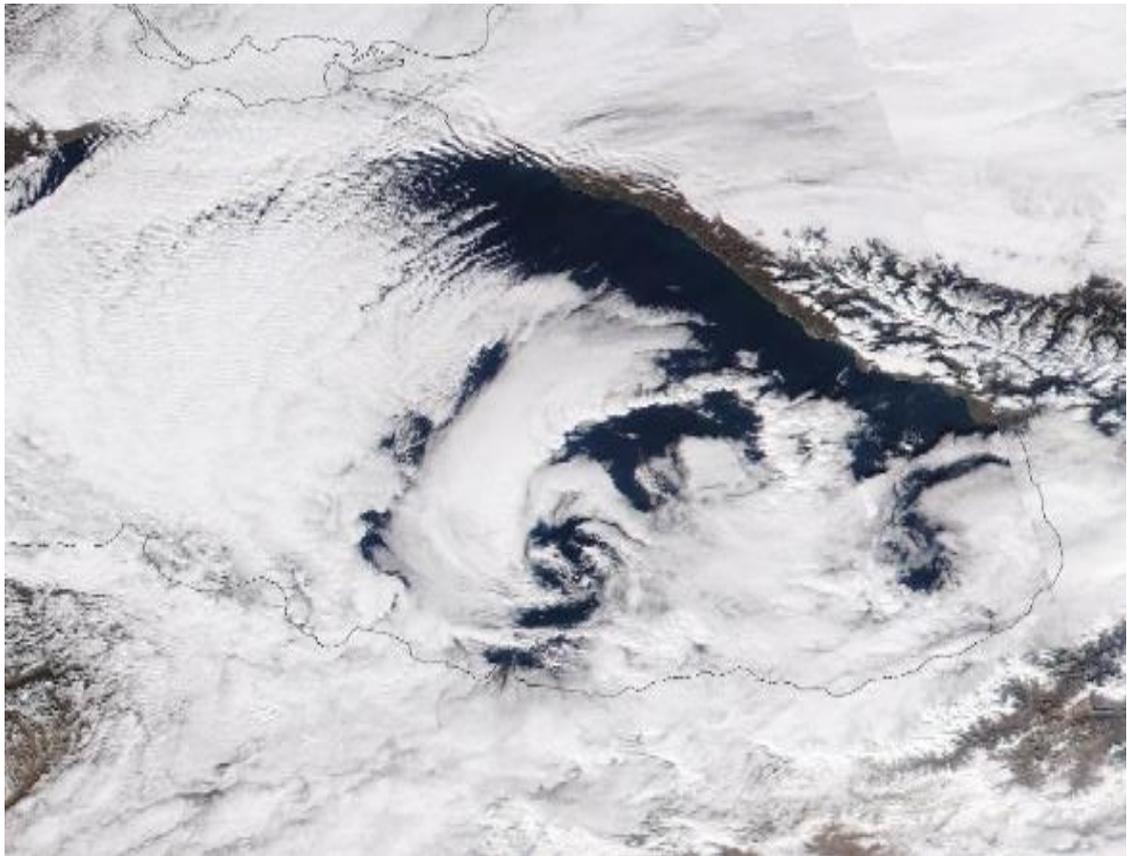
г)

Рисунок 3.12 – МАЦВ оторвавшийся. а) Спутниковый снимок Aqua 08.03.2015;
 б) Температура поверхности моря ($^{\circ}\text{C}$); в) Температура воздуха на уровне 700 гПа ($^{\circ}\text{C}$); г) Высота уровня 700 гПа, км^{-2}

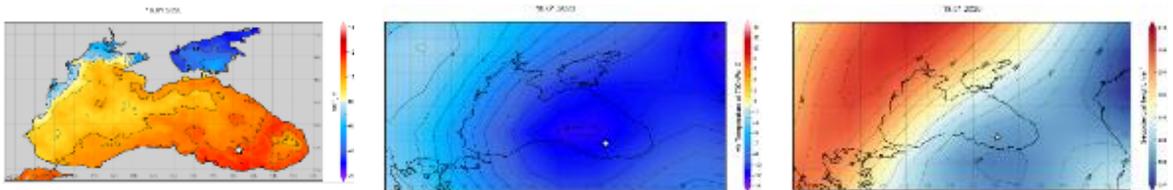
3.4 Верификация механизмов вихреобразования на основе репрезентативной выборки 2020 года

Завершающим этапом анализа пространственно-временной изменчивости является детальное рассмотрение кейсов 2020 года. Необходимость обращения к этому периоду продиктована результатами статистической обработки всего десятилетнего массива: при среднем значении около 90 случаев в год, показатель 2020 года (85 единиц) максимально приближен к медиане выборки. Это позволяет классифицировать данный год как репрезентативный период, отражающий фоновое состояние мезомасштабной циркуляции в современных климатических условиях акватории, что крайне важно для проверки универсальности выявленных закономерностей.

Особое внимание в анализе 2020 года уделено динамике «оторвавшихся» вихрей, чей механизм развития наиболее полно прослеживается на примере случая от 18 января (Рисунок 3.13). В данном случае спутниковая визуализация фиксирует процесс отделения вихревой структуры от Кавказского побережья. Физическим триггером здесь выступает не столько прогрев поверхности, сколько динамическое возмущение в свободной атмосфере. Совмещение приземного центра с выраженной ложбиной на уровне 700 гПа обеспечило системе необходимый запас кинетической энергии для перехода к автономному дрейфу в зимних условиях. Это подтверждает, что связь с высотными барическими структурами является определяющей для мобильных систем даже в холодное время года.



а)



б)

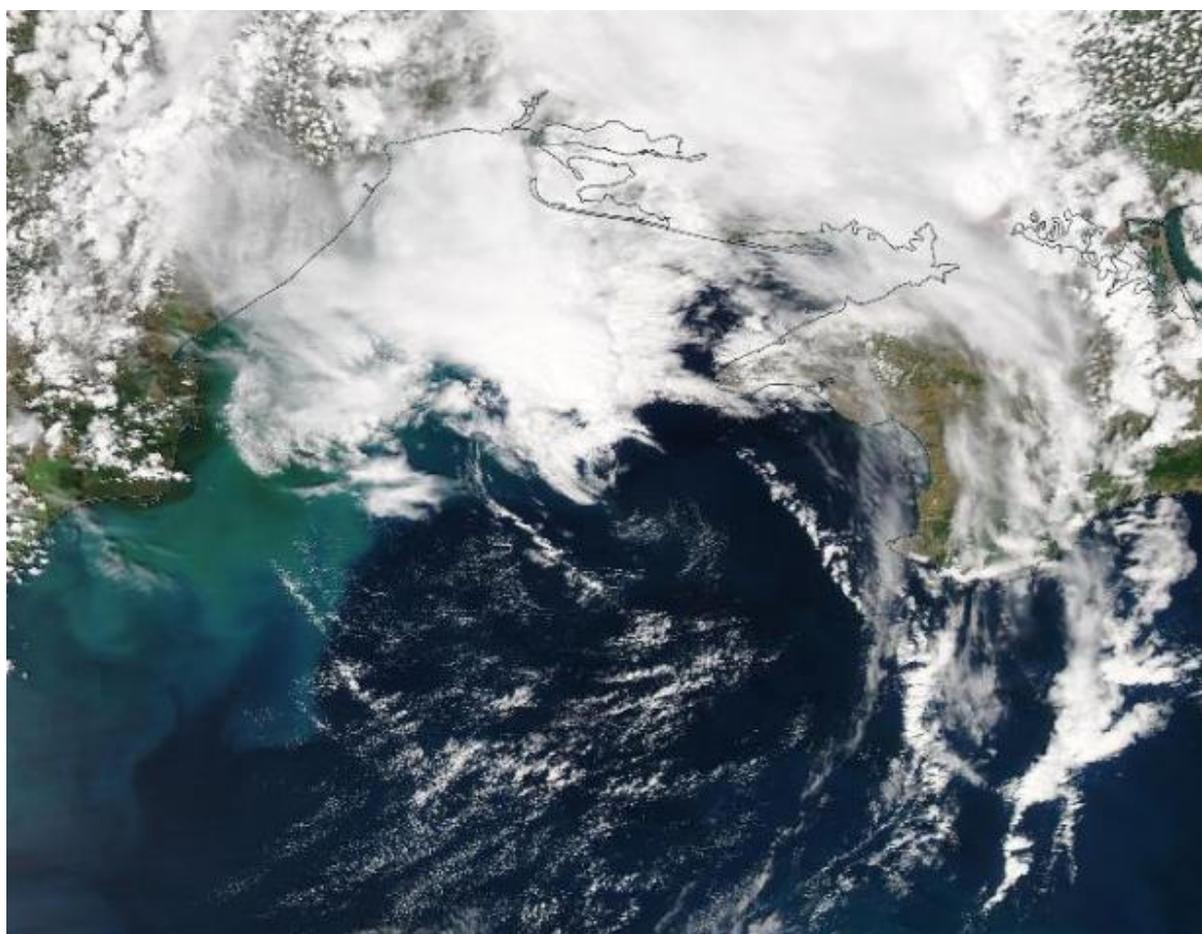
в)

г)

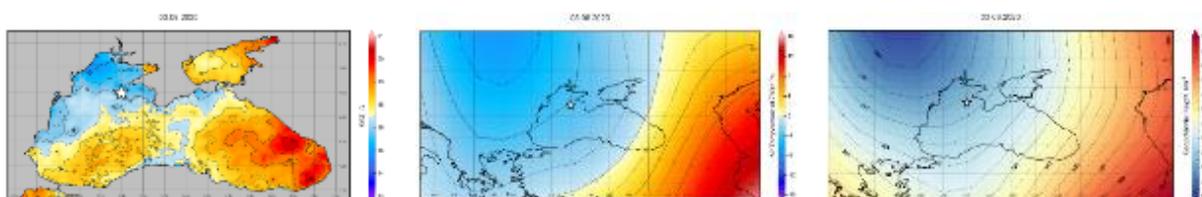
Рисунок 3.13 – МАЦВ оторвавшийся. а) Спутниковый снимок Terra 18.01.2020; б) Температура поверхности моря ($^{\circ}\text{C}$); в) Температура воздуха на уровне 700 гПа ($^{\circ}\text{C}$); г) Высота уровня 700 гПа, км^{-2}

В отличие от зимнего динамического сценария, вихрь открытого моря, зафиксированный 6 июня, демонстрирует классическую летнюю термодинамику (Рисунок 3.14). Несмотря на то, что июнь не является пиковым месяцем, на спутниковых снимках MODIS отчетливо прослеживается формирование облачной спирали в центральной части акватории. Анализ данных реанализа для этого случая выявляет характерную «просадку» геопотенциала 700 гПа точно над

облачным центром, что в сочетании с начавшимся летним прогревом воды инициирует режим конвективной неустойчивости.



а)



б)

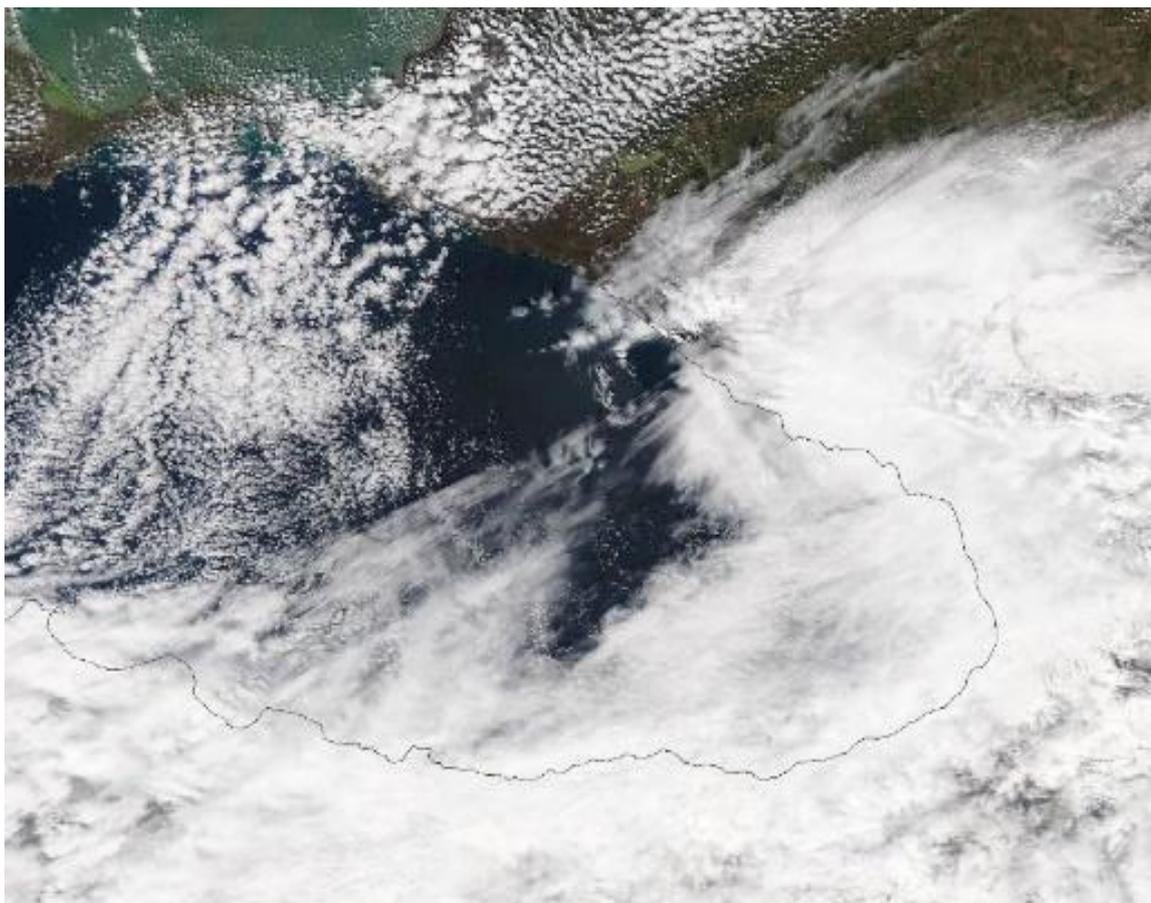
в)

г)

Рисунок 3.14 – МАЦВ открытого моря. а) – спутниковый снимок Terra 03.06.2020; б) Температура поверхности моря ($^{\circ}\text{C}$); в) Температура воздуха на уровне 700 гПа ($^{\circ}\text{C}$); г) Высота уровня 700 гПа, км^{-2}

Специфика формирования прибрежных структур в переходный период наиболее отчетливо прослеживается на примере от 16 марта. Данный вихрь,

локализованный в непосредственной близости от береговой черты, иллюстрирует доминирующую роль орографического фактора в условиях относительно холодного моря (Рисунок 3.15). В отличие от летних систем, его генерация была вызвана деформацией воздушного потока при обтекании прибрежных возвышенностей, что подтверждается конфигурацией облачных гряд на спутниковых снимках. Несмотря на слабую конвективную составляющую, на уровне 700 гПа в этот момент фиксировалось локальное возмущение геопотенциала, которое выступило динамическим триггером, позволившем замкнуть циркуляцию в приземном слое. Этот случай доказывает, что в репрезентативный год даже при дефиците тепла от морской поверхности, сочетание рельефа и высотной неустойчивости остается достаточным условием для возникновения компактных мезомасштабных циклонов.



a)

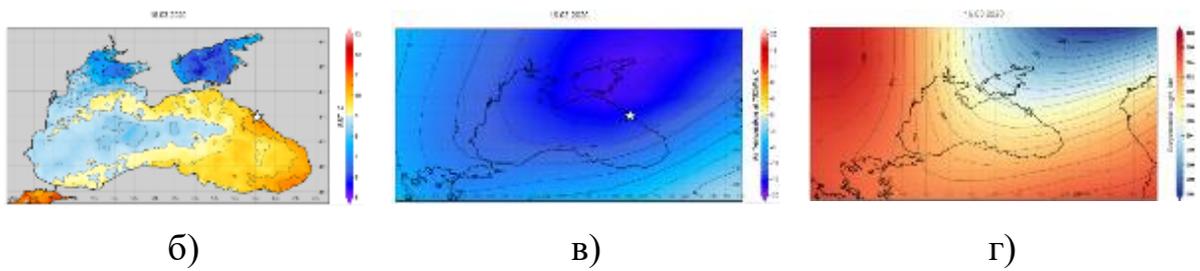
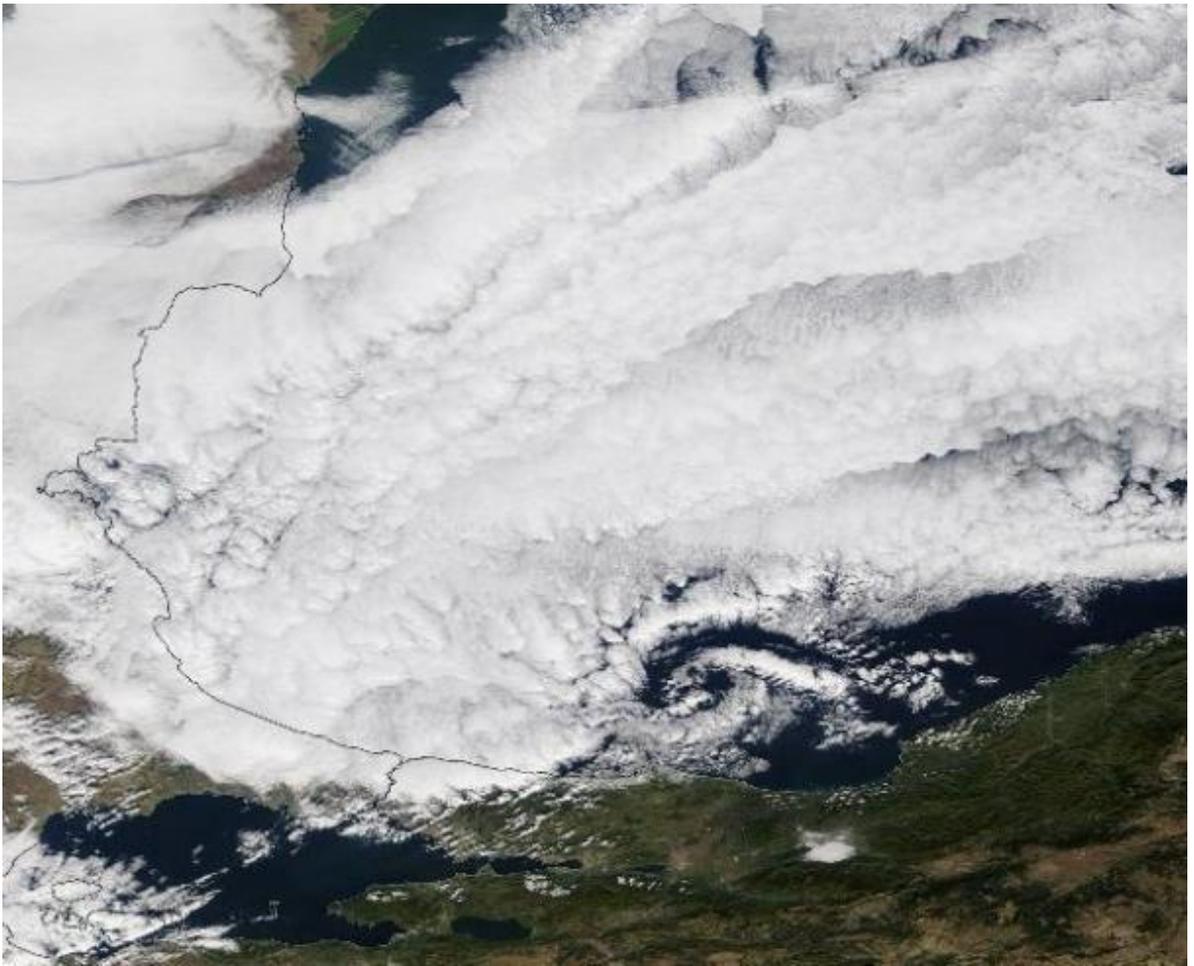
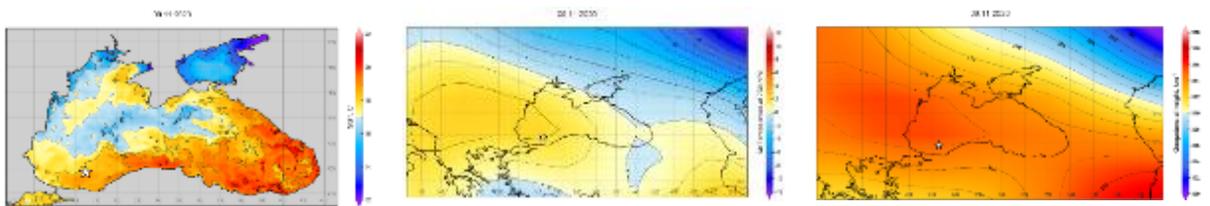


Рисунок 3.15 – МАЦВ прибрежный. а) – спутниковый снимок Terra 16.03.2020;
 б) Температура поверхности моря (°C); в) Температура воздуха на уровне 700
 гПа (°C); г) Высота уровня 700 гПа, км⁻²

Дополнительную пространственную целостность картине выбранного года придают кейсы западного сектора (Рисунок 3.16). Юго-западные вихри этого периода наглядно иллюстрируют бароклинный механизм зарождения, возникающий при выносе континентальных воздушных масс на относительно теплую морскую поверхность в районе Босфора. Тот факт, что морфология вихрей всех типов — от зимних «оторвавшихся» до летних систем открытого моря в этот статистически «средний» год полностью соответствует закономерностям, выявленным для экстремальных пиков, доказывает фундаментальный характер связи между геопотенциалом и процессом вихреобразования в Черноморском регионе.



а)



б)

в)

г)

Рисунок 3.16 – МАЦВ западный. а) – спутниковый снимок Terra 09.11.2020; б) Температура поверхности моря ($^{\circ}\text{C}$); в) Температура воздуха на уровне 700 гПа ($^{\circ}\text{C}$); г) Высота уровня 700 гПа, км^{-2}

Заключение

Комплексное исследование мезомасштабных атмосферных циклонических вихрей над акваторией Черного моря за период 2012–2022 гг. позволило сформировать целостное представление о динамике этих систем на основе интеграции данных спутникового зондирования и мезосиноптического реанализа. В результате систематизации верифицированных случаев мезоциклогенеза была выявлена строгая пространственно-временная неоднородность их распределения. Статистический анализ подтвердил доминирующую роль восточного сектора акватории, где орографическое влияние Кавказского хребта выступает ключевым фактором формирования почти половины всех зафиксированных структур. Наблюдаемая межгодовая изменчивость, выраженная в значительных колебаниях повторяемости, свидетельствует о прямой зависимости региональных процессов от макромасштабных климатических трендов и интенсивности меридионального обмена в атмосфере.

Установлено, что сезонный цикл активности вихрей подчиняется двум различным физическим режимам, определяющим природу вихреобразования. В летний период определяющее значение имеет термодинамическая неустойчивость прогретого моря, тогда как зимние всплески активности инициируются преимущественно динамическими факторами – температурными контрастами между сушей и морем в сочетании с механическим обтеканием берегового рельефа. Важнейшим научным результатом работы стала верификация роли уровня 700 гПа как универсального индикатора состояния атмосферного столба. Сравнительный анализ экстремальных максимумов, межсезонных минимумов и репрезентативных данных 2020 года показал, что возникновение устойчивой облачной спирали любого типа МАЦВ возможно только при достижении вертикального резонанса, когда приземное возмущение пространственно совпадает с высотной ложбиной или центром низкого геопотенциала.

Исследование переходных периодов в марте и апреле доказало, что даже при минимальном теплозапасе акватории динамическая «подкачка» из средней тропосферы способна компенсировать дефицит конвективной энергии, поддерживая жизнеспособность вихрей. Морфологический анализ позволил также типизировать поведение мобильных систем, доказав, что процесс отделения вихря от береговой черты и его дальнейшая миграция полностью детерминированы ведущим потоком на высоте около 3 км. Это подтверждает необходимость объемного анализа атмосферных полей для адекватного мониторинга мезомасштабной циркуляции.

Сформированный в ходе работы десятилетний архив и выявленные связи между спутниковыми изображениями и полями геопотенциала 700 гПа имеют существенную практическую ценность. Полученные выводы могут быть интегрированы в региональные прогностические схемы для повышения точности прогноза опасных метеорологических явлений, генетически связанных с МАЦВ.

Список использованных источников

1. *В.В. Ефимов, М.В. Шокуров, Д.А. Яровая, D. Hein.* Статистика мезомасштабных циклонических вихрей над Черным морем. Морской гидрофизический журнал, 2009, 15с.
2. *В. А. Иванов, В.Н. Белокопытов.* Океанография Черного моря. – НАН Украины, Морской гидрофизический институт. – Севастополь, 2011, –210 с.
3. *Д.А. Яровая, М.В. Шокуров.* Мезомасштабные циклонические вихри, возникающие над Черным морем вблизи Кавказского побережья. – Морской гидрофизический журнал. – 2012. – С. 14–30.
4. *К.А.Коротенко, А.А.Осадчиев.* Мезомасштабные вихри в Черном море: численное моделирование и спутниковые наблюдения. – Презентация. – XVIII Всероссийская Конференция «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса». – 2020.
5. *А.Г. Зацепин, В.В. Кременецкий, С.В. Станичный, В.М. Бурдюгов.* Бассейновая циркуляция и мезомасштабная динамика черного моря под ветровым воздействием. – Современные проблемы динамики океана и атмосферы. Сборник статей, посвященный 100-летию со дня рождения проф. П.С. Линейкина. Москва: Гидрометцентр России. – 2010. – С. 347–368.
6. *А.И. Гинзбург, А.Г. Костяной, Н.А. Шеремет, С.А. Лебедев.* Изменчивость температуры поверхности и уровня Черного, Мраморного и Эгейского морей по спутниковым измерениям. Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. Сборник научных статей. Выпуск 6. Том I. – С. 349–358.
7. *Зацепин А.Г.* Гидродинамика Черного моря: бассейновая циркуляция, мезомасштабные и субмезомасштабные вихри. – Презентация. – Институт океанологии им. П.П. Ширшова РАН, Москва. – 2014.
8. *D. Tang.* Remote Sensing of the Changing Oceans. Chinese Academy of Sciences, Guangzhou, China (Ed.). – 2011. VIII, 449 с.

9. *Ефимов В. В., Шокуров М. В., Яровая Д. А.* Статистика мезомасштабных циклонических вихрей над Черным морем. Морской гидрофизический журнал. – 2011. – № 3. – С. 31–43.
10. *В. А. Иванов, В.Н. Белокопытов.* Океанография Черного моря. – НАН Украины, Морской гидрофизический институт. – Севастополь, 2011, –210 с.
11. *Orlanski I.* A rational subdivision of scales for atmospheric processes // Bulletin of the American Meteorological Society. — 1975. — Vol. 56. — № 5. — С. 527–530.
12. *В.О. Лопуха, Н.В. Федосеева.* Анализ облачности мезомасштабных полярных вихрей по мультиспектральным спутниковым данным. – Труды Военно-космической академии имени А.Ф.Можайского. – 2018. – № 662. – С. 172-175.
13. *Nolan T. Atkins and Michael St.Laurent.* Bow Echo Mesovortices. Part II: Their Genesis. Monthly weather review, volume 137, Lyndon State College, Lyndonville, Vermont. – 2008. – С. 1514–1532.
14. *Lori Perkins, Greg Shirah, Alex Kekesi, James W. Williams, Scott Braun, Owen Kelley.* A Hurricane Model. Scientific Visualization Studio. – 2008.
15. *А.А. Спрыгин, М.И. Прохареня.* Диагноз и прогноз конвективных структур с опасными явлениями по данным моделирования и дистанционного зондирования над территорией Беларуси и Центральной России. Гидрометеорологические исследования и прогнозы. 2018. № 3(369). С. 6-22.
16. *А.А. Спрыгин.* Параметры долгоживущих мощных конвективных структур на Европейской территории России и сопредельных территориях и возможности унификации их прогноза. Гидрометеорологические исследования и прогнозы. 2020. № 1 (375). С. 21-47
17. *Onur Halis, Barbaros Gönençgil, Zahide Acar.* An atmospheric approach to the flood disaster in the Western 1 Black Sea region (Turkey) on 10-12 August 2021. Natural Hazards and Earth System Sciences. – 2022.
18. *Mouhammed Fall, Abdou L. Dieng, Laurence Eymard, Gaëlle De Coëtlogon, Saidou M. Sall, Youssouph Sane.* Atmospheric Dynamics of Extreme Precipitation over the West African Sahel. American Journal of Climate Change, 2025, 14(1), 119-145.

19. MODIS Atmosphere: Images: L1B Granules (nasa.gov). [Электронный ресурс]
URL: https://modis-images.gsfc.nasa.gov/IMAGES/02_1km_main.html
20. Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer. [Электронный ресурс] URL:
<https://modis.gsfc.nasa.gov/>
21. Visible Infrared Imaging Radiometer Suite. [Электронный ресурс] URL:
<https://www.earthdata.nasa.gov/data/instruments/viirs>
22. Sensor Scanner in Remote Sensing. [Электронный ресурс] URL:
<https://gisrsstudy.com/sensor-scanner/>
23. AIRS Project Instrument Suite. [Электронный ресурс] URL:
<https://airs.jpl.nasa.gov/mission/airs-project-instrument-suite/eos-aqua-satellite/>