



МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ  
ФЕДЕРАЦИИ

федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение  
высшего образования

«РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ  
ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Кафедра Комплексного управления прибрежными зонами

**ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА**  
(магистерская диссертация)

На тему Динамическая структура течений  
западной части Средиземного моря, включая  
зону Гибралтарского пролива

<b>Исполнитель</b>	Баёва Ксения Павловна (фамилия, имя, отчество)
<b>Руководитель</b>	кандидат географических наук, доцент кафедры комплексного управления прибрежными зонами (ученая степень, ученое звание)
	Плинк Николай Леонидович (фамилия, имя, отчество)

<b>«К защите допускаю» Заведующий кафедрой</b>	
	(подпись)
	кандидат географических наук, доцент кафедры комплексного управления прибрежными зонами (ученая степень, ученое звание)
	Плинк Николай Леонидович (фамилия, имя, отчество)

«\_\_» \_\_\_\_\_ 20\_\_ г.

Санкт–Петербург  
2019

## Содержание

Сокращения.....	4
Введение.....	5
1 Физико-географическое описание Средиземного моря.....	10
1.1 Географическое положение.....	10
1.2 Геология .....	11
1.3 Климат.....	12
1.4 Циркуляция вод .....	14
1.5 Водные массы Средиземного моря и районы их формирования.....	16
1.6 Региональные особенности циркуляции западной части Средиземного моря.....	18
1.7 Обзор литературы и анализ основных выводов, полученных в публикациях по изучению циркуляции вод в западной части Средиземного моря .....	23
2 Методы исследования и исходные данные .....	34
2.1 Исходные данные .....	34
2.2 Методы исследования.....	39
2.2.1 Преобразование и визуализация данных.....	39
3 Исследование динамической структуры течений западной части Средиземного моря, включая зону Гибралтарского пролива.....	43
3.1 Предварительный анализ и сравнение результатов использования региональных океанологических оперативных систем «Mediterranean Forecasting System» и «The operational IBI Ocean Analysis and Forecasting system».....	43
3.2 Формирование поля скорости течений в верхнем слое моря Альборан (западная часть Средиземного моря) .....	49
3.3 Анализ пространственно-временной изменчивости вихревых структур в западной части Средиземного моря, включая зону Гибралтарского пролива	

на основе совмещенных полей скорости поверхностных течений и поля уровня.....	52
3.4 Пространственно-временная изменчивость вихревых структур в западной части Средиземного моря, включая зону Гибралтарского пролива, с использованием диаграмм Хофмоллера.....	57
3.5 Диаграммы Хофмоллера для WAG и EAG по данным спутниковой альтиметрии.....	62
Заключение.....	64
Список использованных источников.....	67
Приложение А. Совмещенные поля уровня и скорости поверхностного течения, полученные в рамках использования Mediterranean Forecasting System.....	<b>Ошибка! Закладка не определена.</b>
Приложение Б. Совмещенные поля уровня и скорости поверхностного течения, полученные в рамках использования The operational IBI Ocean Analysis and Forecasting system.....	<b>Ошибка! Закладка не определена.</b>

## Сокращения

WAG – Western Alboran Gyre

EAG – Eastern Alboran Gyre

MS – Mediterranean Forecasting System

IBI - The operational IBI Ocean Analysis and Forecasting system

## Введение

Средиземное море и его побережье обладает выгодным географическим положением. Море является связующим звеном между странами Африки, Азии и Европы в экономической, политической и социокультурной сферах. Другими словами, море обладает важным стратегическим значением. Через Суэцкий канал осуществляется транспортировка нефти и нефтепродуктов из стран Персидского залива и Аравийского полуострова. Гибралтарский пролив, наряду с проливами Босфор и Дарданеллы, занимают исключительное место в морских перевозках. Таким образом, Средиземное море – это важный транспортный путь не только для стран, которые находятся на его побережье, но и для стран, находящимися далеко за пределами Средиземноморья, ведь через Гибралтарский пролив и Суэцкий канал осуществляется связь между Северной Атлантикой и Индийским океаном.

Западная часть Средиземного моря (море Альборан), включая зону Гибралтарского пролива подвержена активному использованию как самой акватории, так и прибрежной территории в различных видах человеческой деятельности: рекреация и туризм, морской транспорт, рыболовство и аквакультура. Все эти виды морской деятельности нуждаются в своевременном и оперативном получении регулярных данных о состоянии окружающей среды, об изменчивости гидрометеорологических характеристик, в частности, океанологических, происходящих в прибрежной зоне Средиземного моря под влиянием процессов с различным временным масштабом изменчивости. Этим занимается оперативная океанография, которая является одним из инструментов комплексного управления прибрежными зонами.

Исследование динамических процессов в океане является сложным

процессов, требующим развития теории в сочетании с получением обширного объема данных. Динамика течений – сложный процесс, который требует наличия правильного выбора данных, подлежащих исследованию. Существует две возможности для получения данных, которые можно применить для исследования данного процесса: первый вариант – использование натуральных наблюдений. Однако, в настоящее время получение данных натуральных наблюдений является проблематичной и достаточно дорогой процедурой. Зачастую, набор данных неполный, содержит пропуски во временных рядах, а так же, в ряде случаев, имеет ограниченный доступ. Второй вариант – использование данных региональных океанологических оперативных систем. Для данного района существуют две оперативные океанологические системы «Mediterranean Forecasting System» (MS) и «The operational IBI Ocean Analysis and Forecasting system» (IBI). Поэтому, в рамках данной работы появляется вопрос, о выборе наилучшей системы для исследования динамики течений.

Объединяя все вышесказанное, получается, что необходимо использовать достоверные, проверенные оперативные гидрометеорологические данные, которые в дальнейшем могут быть исследованы и проанализированы в рамках данной работы. Учитывая значительный интерес к развитию систем оперативной океанологии в России и за рубежом появляется необходимость решения не только теоретических вопросов, но и решения методической задачи, связанной с анализом сопоставимости данных, получаемых при использовании различных оперативных систем, что делает выполненные исследования *актуальной задачей*, направленной на развитие этого перспективного направления в океанологии.

*Научная новизна* исследования. Исследованиями процессов, происходящих в Средиземном море, начиная с 60х годов, преимущественно занимались иностранные исследователи. В наши дни существуют только небольшое количество совместных публикаций российских и зарубежных

ученых, а публикации на русском языке практически отсутствуют. Поэтому исследование динамики течений западной части Средиземного моря, включая зону Гибралтарского пролива может быть полезными для отечественной океанологии. К тому же, методы и алгоритмы, применяемые в данной работе, могут быть использованы в работах, изучающие подобные процессы, но в других регионах. Кроме того, следует отметить, что представленные в работе результаты исследований основываются на самых современных данных за период 2018 года и пока не имеют аналогов в литературе.

В данной работе *объектом* исследования является западная часть Средиземного моря (море Альборан), включая зону Гибралтарского пролива. Влияние пролива на формирование океанологических особенностей в исследуемом регионе велико: здесь происходит водообмен, который состоит из двух слоев, между атлантическими и средиземноморскими водами. Нижний слой состоит из соленых и плотных средиземноморских вод, а верхний, поверхностный, состоит из распресненных вод Атлантики [1]. Интенсивность водообмена через пролив в поверхностном слое моря Альборан может оказывать влияния на формирование и изменение характера циркуляции в верхнем слое моря Альборан [3,4]. Циркуляция в западной части Средиземного моря представлена двумя состояниями. Для первого характерно наличие западного и восточного вихря (WAG – Western Alboran Gyre, EAG - Eastern Alboran Gyre), а для второго отмечается наличие лишь одного вихря [4].

Предмет исследования – схемы циркуляции в поверхностном слое моря Альборан и Гибралтаре по данным двух оперативных систем

Цель работы – изучение динамической структуры течений в западной части Средиземного моря, включая зону Гибралтарского пролива с учетом исследование возможности применения данных двух оперативных систем «Mediterranean Forecasting System» (MS) и «The operational IBI Ocean Analysis and Forecasting system» (IBI) и выбор наилучшего массива данных,

для дальнейшего его использования.

Для достижения поставленной цели необходимо было выполнить следующие задачи:

1. Выполнить обзор литературы и анализ основных выводов, полученных в публикациях по изучению циркуляции вод в западной части Средиземного моря
2. Провести предварительный анализ и сравнение результатов использования региональных океанологических оперативных систем «Mediterranean Forecasting System» и «The operational IBI Ocean Analysis and Forecasting system»
3. Проанализировать формирование поля скорости течений в верхнем слое моря Альборан (западная часть Средиземного моря)
4. Провести анализ пространственно-временной изменчивости вихревых структур в западной части Средиземного моря, включая зону Гибралтарского пролива на основе совмещенных полей скорости поверхностных течений и поля уровня.
5. Изучить пространственно-временную изменчивость вихревых структур в западной части Средиземного моря, включая зону Гибралтарского пролива, с использованием диаграмм Хофмоллера

Завершающая часть исследований, выполненных в рамках подготовки выпускной квалификационной работы, проводилась в период прохождения стажировки на Факультете морских наук и охраны окружающей среды Университета Кадиса (Испания), организованной в рамках реализации Европейской программы Эразмус + КА 107. В ходе подготовки данной научной работы со стороны Факультета морских наук был обеспечен доступ к вычислительным ресурсам УКА, проведены консультации, предоставлены дополнительные материалы. В связи с этим автор выпускной работы выражает глубокую благодарность преподавателю кафедры прикладной

физики УКА Альфредо Искуиердо Гонсалез за содействие и помощь при выполнении исследований.

# 1 Физико-географическое описание Средиземного моря

## 1.1 Географическое положение

Средиземное море находится между Европой, Малой Азией и Африкой, расположено в средних широтах. По своему положению моря обычно подразделяют на средиземные, окраинные, межостровные и внутренние. Средиземное море по этой классификации можно отнести к средиземным, межматериковым морям. С Северной Атлантикой Средиземное море соединяется сравнительно узким и мелким Гибралтарским проливом (ширина пролива составляет 13 км в самой узкой его части). Пролив Дарданеллы соединяет Средиземное море с Мраморным морем, а затем через пролив Босфор с Черным и Азовским морями. Суэцкий канал соединяет Средиземное море с Красным морем.[5, 6]

Площадь Средиземного моря равна 2 965,5 тыс. км<sup>2</sup>, средняя глубина — 1 438 м, наибольшая глубина — 5 121м. Географическое положение Средиземного моря и основные моря и бассейны моря показаны на рис.1.1

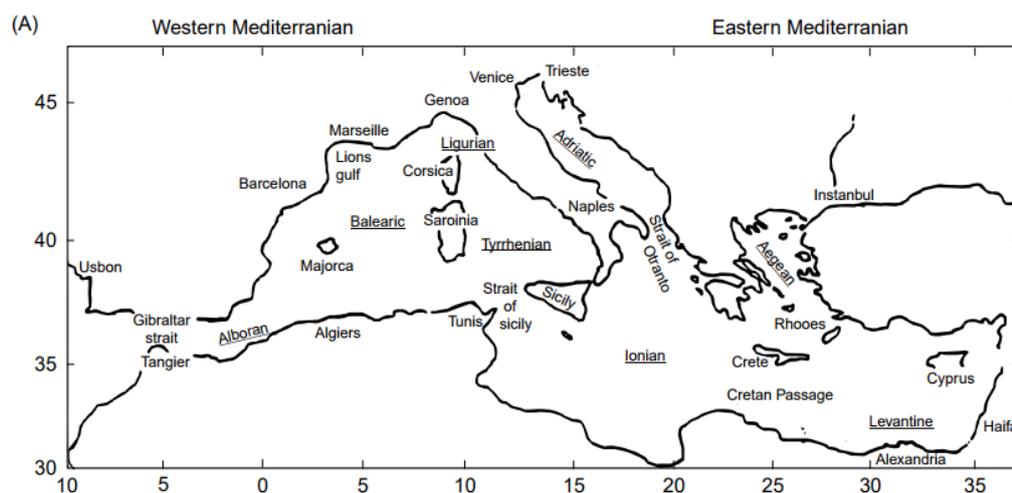


Рисунок 1.1 - Географическое положение Средиземного моря, основные моря и бассейны моря [6]

Море делится на два бассейна: западный и центрально-восточный. Границей раздела является условная линия, проходящая от Апеннинского полуострова, через остров Сицилия, Тунисский пролив (Stretto di Sicilia на итальянском) к мысу Кап-Бон на побережье Туниса (Африка). К восточному бассейну, как составные части Средиземного моря, относятся следующие моря: Адриатическое, Ионическое, Эгейское, Мраморное и Левантийское. Тирренское, Алборанское, Балеарское и Лигурийское моря относятся к западному бассейну Средиземноморья.[5]

Бассейн Альборанского моря находится к востоку от Гибралтара, между побережьями Испании и Марокко. Балеарский (иногда называемый Алжирский) бассейн, восточнее бассейна Альборан, расположен к западу от Сардинии и Корсики, простираясь от побережья Алжира до побережья Франции. Тирренский бассейн, часть Средиземного моря, известная как Тирренское море, лежит между Италией и островами Сардиния и Корсика. Лигурийское море расположено у побережья провинции Лигурия (северо-западная Италия), севернее о. Корсика [7].

## 1.2 Геология

Современное дно Средиземного моря и граничащие с морским побережьем горные системы являются тектонически активным морским регионом. Геологические особенности Средиземного моря определяются схождением и расхождением относительно стабильных континентальных плит Евразии и Африки в течение последних 44 миллионов лет. Интерпретация геологических данных предполагает, что в настоящее время существует множество основных зон столкновения между Африкой и Евразией, что приводит к вулканизму, образованию подводных гор и затоплению земель.

Побережья западного Средиземноморья подвергались неравномерному воздействию отложений и эрозии. Эти процессы вместе с вековыми колебаниями уровня моря, поднятием или опусканием берегов, привели к существенному разнообразию типов берегов. Так, например, Итальянский полуостров подвергся значительному подъему в постплиоценовые времена (то есть в течение последних 2,6 млн. лет), в результате чего на Адриатическом побережье были обнаружены более старые породы. Итальянское Адриатическое побережье является незатопленным. Гранитные берега северо-восточной Сардинии, где затонула поверхность земли, образуя вытянутые острова, параллельные побережью, представляют собой типичные подводные берега. Дельты рек Рона, По, Эбро и Нил являются хорошими примерами берегов, возникающих в результате отложения ила.

### 1.3 Климат

Средиземноморский климат характеризуется ветреной, мягкой, влажной зимой и относительно спокойным, жарким и сухим летом. Весна, однако, является переходным сезоном и является изменчивой. Осень относительно короткая.

Количество и распределение осадков в средиземноморских населенных пунктах являются переменными и непредсказуемыми. Вдоль побережья Северной Африки от Кабиса (Габес) в Тунисе до Египта выпадает чуть более 250 мм осадков в год, тогда как на побережье Хорватии есть места, где осадки достигают 2500 мм в год. Максимум осадков наблюдается в горных прибрежных районах [5,7]

#### *Ветровой режим.*

Воздушные массы приходят в Средиземное море через горные хребты, за исключением южных берегов к востоку от Туниса. Сильные ветры приводят к высоким показателям испарения летом и сезонному дефициту

воды в море, что определяет наличие специфических особенностей гидрологического режима Средиземного моря, связанного с формированием, так называемой, средиземноморской водной массы, характеризующейся повышенной соленостью [7]

Основные ветра, дующие над Средиземным морем: Мистраль (Mistral) - холодный, сухой северо-западный ветер - проходит через ущелья между Альпами и Пиренеями и нижнюю долину Роны; сильная северо-восточная бора проходит через ущелье Триеста. Леванте (Levante) - холодный восточный ветер и западный поньенте (Poniente) проходят через Гибралтарский пролив. Леванте дует со Средиземного моря, а поньенте с Атлантического океана. Причем, последний имеет различные особенности в различных районах. Считается, что это ветер холодный, но при прохождении им Иберийского плоскогорья, он набирает тепло и становится очень сухим, особенно в летние месяцы. Жаркие, сухие юго-восточные ветры, известные как сирокко, гибли (хиблех) или хамсин, часто дуют в Средиземноморский бассейн из Сахары и Аравийского полуострова. Эти ветры в значительной степени уменьшают тепло и влагу в поверхностных водах за счет испарения и последующего охлаждения, и эти более холодные, более плотные поверхностные воды опускаются. [5,7].

Атмосферные условия над Средиземным морем во многом определяют происхождение процессов, протекающих в Средиземноморье. Преобладание испарения над осадками увеличивает соленость поступающей Атлантической воды из-за испарения поверхностных вод. В статье [8] проведен анализ влияния флуктуаций атмосферного давления над Лигурийским морем на динамику вод в Гибралтаре и море Альборан (западная часть Средиземного моря). Было выявлено, что уменьшение атмосферного давления над Лигурийским морем оказывает влияние на усиление поступления вод Атлантики через Гибралтар в средиземное море, а его повышение уменьшает интенсивность потока атлантических вод.

#### 1.4 Циркуляция вод

Как ранее было сказано, Средиземное море соединяется с Северной Атлантикой через Гибралтарский пролив, следовательно, море и океан постоянно обмениваются водами. Известно, что характерной чертой циркуляции вод в Гибралтарском проливе является её двухслойная структура. Согласно [8] взаимодействие океанологических и атмосферных процессов различных временных и пространственных масштабов в сочетании со сложным рельефом дна модифицирует двухслойную циркуляцию. Именно изучение главных механизмов, которые определяют водообмен через пролив и динамику вод, является основой для понимания условия формирования различных гидрохимических, гидрологических и биологических условий не только в Гибралтарском проливе, но и в западной части Средиземного моря.

Поступающие в поверхностном слое воды Атлантического океана продвигаются вдоль берегов Северной Африки, а затем растекаются по западной площади моря. Из-за влияния испарения и сухих воздушных масс из Европы, воды становятся холоднее и опускаются, при этом образуется определенная водная масса, характерная для запада Средиземного моря. Что касается восточной части моря, то североатлантическая вода так же проникает туда через Тунисский (Сицилийский) пролив и расходится на восток в сторону Левантийского моря, достигая о. Кипр, где в зимний период происходит погружение более соленых и холодных вод. Здесь, аналогично западной части моря, из-за испарения происходит охлаждение воды и увеличение её солёности с образованием восточной глубинной водной массы. Другая часть североатлантической воды через пролив Отранто поступает в Адриатическое море [5,6]

Вышеуказанная схема циркуляции вод в море описывала механизм притока океанической воды из Северной Атлантики. Так как отмечено, что солёность Средиземного моря со временем не увеличивается, можно сделать

вывод, что в итоге сформировавшаяся под воздействием притока атлантической воды глубинная водная масса должна, распространяясь по всему морю, но уже в придонном слое, вернуться в Северную Атлантику. Поскольку водообмен через Черноморские проливы в силу специфики рельефа дна весьма ограничен, основной отток средиземноморской воды происходит через Гибралтарский пролив, который, как уже отмечалось, характеризуется двухслойной структурой динамики вод. Механизм движения вод через Гибралтарский пролив отражен на рисунке 1.2 [9].

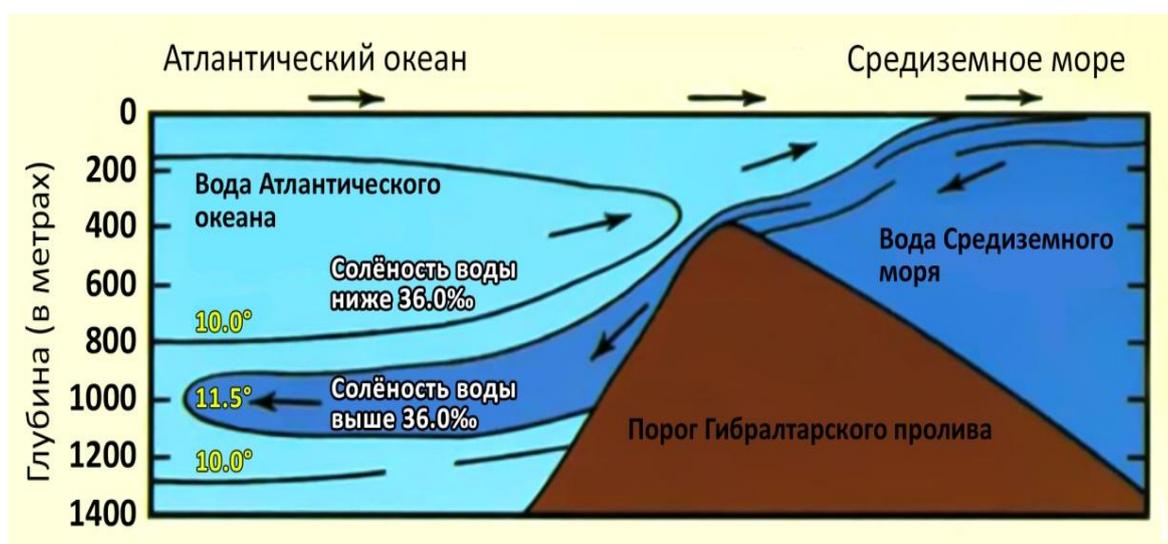


Рисунок 1.2. Схема притока и оттока Североатлантической воды через Гибралтарский пролив [9]

Морская вода, вытекающая из Средиземного моря, хоть и обладает более высокой по сравнению с Североатлантической водой температурой, но, тем не менее, является намного более соленой и плотной. Таким образом, после «переваливания» через порог средиземноморская вода стекает вниз по материковому склону, попадая в Атлантику. Только на глубине 1000 м морская вода встречается с Североатлантической водой такой же плотности. Далее наблюдается подъем вод Средиземного моря, образуется протяженный слой воды в Северной Атлантике.[6,7]

Таким образом, из вышесказанного, можно сделать общий вывод о схеме циркуляции вод в Средиземном море. В результате сильного испарения над морем более плотная и соленая вода опускается на глубину, а потом в виде возвратного течения вытекает через Гибралтарский пролив обратно в Атлантический океан. [10]

Получается, что Средиземное море обменивается водой, солью и теплом с северной частью Атлантического океана. В свою очередь известно, что Северная Атлантика играет важную роль в глобальной термохалинной циркуляции Мирового океана и выступает в качестве основного участка формирования глубинных и придонных водных масс, достигающих экваториальной зоны на юге и полярных районов на севере. Таким образом, соленые воды средиземноморского происхождения могут оказать существенное влияние на процессы формирования водных масс, а следовательно на изменчивость и даже устойчивость термохалинного равновесия. [6]

В статье [6] отмечено, что модель общей циркуляции в Средиземном море включает в себя три компонента:

- Взаимодействие системы Океан-Атмосфера
- Формирование и трансформация водных масс
- Элементы и структуры циркуляции

Больше всего внимания в исследовании уделялось элементам циркуляции и их изменчивости. Тем не менее, для того, чтобы описать циркуляцию, необходимо получить информацию не только о характеристиках водных масс Средиземного моря, но идентифицировать районы их образования.

### 1.5 Водные массы Средиземного моря и районы их формирования

Характеристики водных масс, формирующихся в Средиземном море, а также районы их происхождения были изучены в рамках эксперимента по

изучению западно-средиземноморской циркуляции (WMCE – Western Mediterranean Circulation Experiment). Целью данного эксперимента было исследовать временную и пространственную изменчивость циркуляции в западной части Средиземного моря, от пролива Сицилии до Гибралтара. Эксперимент проводился в период с ноября 1985 г. по март 1987 г.

Моделирование осуществлялось командами исследователей из разных стран, а именно, США, Франция, Италия. Специалисты США пользовались моделью высокого разрешения ( $5 \times 7,5$  км), вертикально интегрированная по слоям, т.е. одному слою соответствует одно смоделированное значение. Эта модель считалась простой численной моделью. Было рассмотрено, как по отдельности, так и в совокупности, влияние ветра, гидравлического воздействия через проливы, бароклинного и баротропного сдвигового потоков, топографии и плотности. Италия изучала физические процессы в проливах [11]. Район проведения эксперимента WMCE – Western Mediterranean Circulation Experiment показан на рисунке 1.3



Рисунок 1.3 – Район проведения эксперимента WMCE – Western Mediterranean Circulation Experiment [11]

Основные выводы этого исследования, включающие информацию о названии водной массы, её происхождении, и глубине залегания приведены в таблице 1.1.

Таблица 1.1 - Водные массы в западной части Средиземного моря и их примерная глубина залегания [11].

Название водной массы	Источник формирования	Соленость, ‰	Глубина залегания, м
Modified Atlantic Water (MAW)	Гибралтарский пролив	36.5-37.5	300
Levantine Intermediate water (LIW)	Сицилийский пролив	38.45-38.75	от 300-700
Western Mediterranean Deep Water (WMDW)*	Формирование в северо-восточной части Средиземного моря в зимний период	38.40-38.48	от 700-более 3000

\*температура водной массы: 12.75-12.90 °С

1.6 Региональные особенности циркуляции западной части Средиземного моря.

Наибольший интерес для исследования Средиземного моря представляет западная часть, включая зону Гибралтарская залива. Как указывалось выше, здесь происходит активный водообмен, который в значительной степени определяет гидрологические условия не только западной, но и восточной частях Средиземного моря.

В ходе исследования, выполненного в рамках подготовки данной выпускной работы, основное внимание будет уделено западной части

Средиземного моря, поэтому предварительно рассмотрим общие черты циркуляции в Алборанском море и Гибралтарском проливе.

*Гибралтарский пролив.* На водообмен в этой области в целом влияет превышение испарения над осадками. В статье Лакомбе и Ричеза [12] описывается Гибралтарский эксперимент, результатом которого послужили 3 выделенных типа колебаний (флуктуаций) течений: приливные, субинерционные и долгопериодные. Однако, эти флуктуации вызваны различными воздействующими механизмами.

Так приливные течения, в основном, вызваны воздействием Атлантического прилива [13]. Субинерционные течения своему происхождению обязаны метеорологическим силам и, в первую очередь, связаны с колебаниями атмосферного давления на территории всего Средиземного моря. Оба этих течения баротропны, но обладают важной бароклинной особенностью. Сезонные колебания отчетливо носят бароклинный характер. Сезонные изменения в поверхностном течении связаны с изменением глубины границы раздела. Частичное опускание WMDW через пролив может быть связано с метеорологическим воздействием [14].

*Алборанское море.* Это самое западное море в средиземноморском бассейне. Циркуляция и водные массы связаны с обменом через Гибралтар, который, в свою очередь, обусловлен превышением испарения над осадками и речным стоком в Средиземное море. Появляется термохалинная циркуляция: вода Атлантики течет по поверхности пролива в море Альборан, а более соленая и плотная вода из Средиземного моря течет в Атлантику, ниже поверхностного слоя. По мере продвижения Атлантического течения в Средиземное море, оно меняет свои свойства из-за потоков морского воздуха и перемешивания с водой Средиземноморья. Эти изменения начинаются в Альборане – его верхний слой заполнен распресненной водой из Атлантики, более или менее видоизменен и имеет переменную толщину, в зависимости от географического положения [15]. Эти причины обуславливают проявление

особой циркуляции в данном регионе, как было отмечено в [12, 16-18].

Классическая циркуляция для западной части Средиземного моря выглядит следующим образом: быстрое Атлантическое течение, окружающее и питающее два антициклонических вихря: западный альборанский вихрь и восточный альборский вихрь (WAG - The Western Alboran Gyre, EAG - The Eastern Alboran Gyre). Значительный термохалинный градиент связанный с Атлантическим течением делает оба вихря, видимыми на съемках поверхностной температуры. Однако, эта схема характеризуется высокой временной изменчивостью [15].

Как говорилось ранее, в разделе 1.5, эксперимент WMCE, еще в конце 80-х годов XX века, позволил выявить генеральную циркуляцию с большим масштабом изменчивости, которая была вызвана комбинацией факторов и временным масштабом. Были определены факторы, влияющие на циркуляцию, которые были спорными, но, тем не менее, специалисты выдвигали теории, что их влияния существенно и имеет место быть. К этим факторам относятся:

- термохалинная структура;
- атмосферное давление;
- ветер;
- топография;
- водообмен между проливами Сицилии и Гибралтаром.

Циркуляция глубинных водных масс, в основном, определяется топографией различных морских бассейнов. Несмотря на этот факт, существуют очевидные признаки того, что сезонные изменения поверхностной циркуляции происходят из-за изменения объема вод Средиземного моря. Так, согласно эксперименту WMCE в нижних слоях моря происходит периодическое накопление или отток водных масс WMDW и LIW, что в конечном итоге влияет на циркуляцию на поверхности [11].

Еще в 1989 году в статье [19] было упомянуто, что определение наличия двухвихревой структуры в западной части Средиземного моря является

сложной процедурой для реализации на одномерных моделях. Однако, используемая в этом исследовании двухслойная модель показывает, что поведение двух вихрей может зависеть от силы вертикального сдвига между MAW и LIW. Тогда будут возможны два варианта:

1. Если сдвиг слабый или движение во втором слое отсутствует, то проявляется только один западный вихрь WAG;
2. Если происходит увеличение потока во втором слое, то присутствуют два вихря (западный WAG и восточный EAG).

В дополнение к вышесказанному, с помощью натуральных, авиационных и, в большей степени спутниковых данных отмечалось, что два антициклонических вихря (WAG и EAG) на поверхности моря Альборан зависят от поведения модифицированной водной массы MAW [9]. Схематическое расположение вихрей показано на рисунке 1.3.

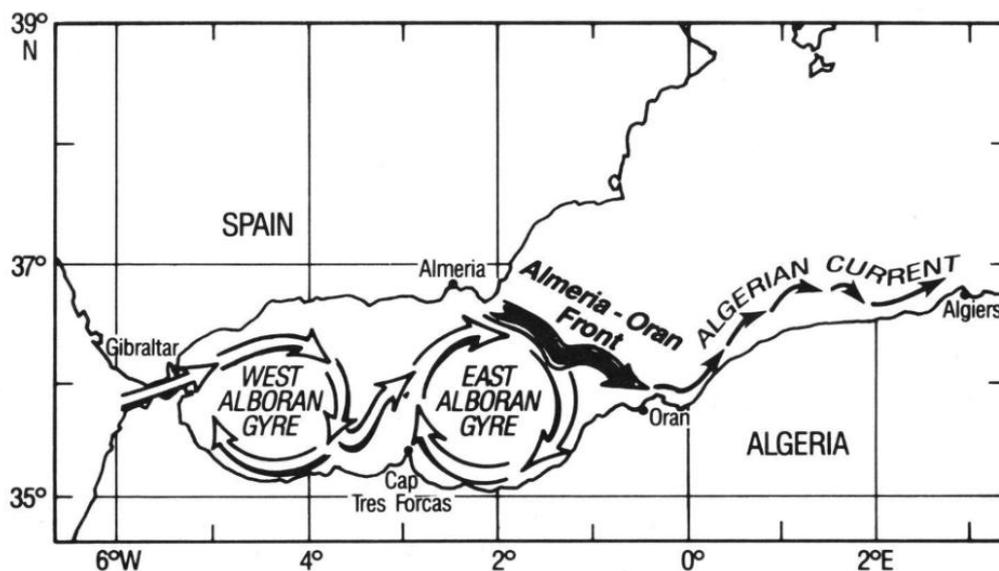


Рисунок 1.3. Схема циркуляции в Альборанском море [11]

Как видно из рисунка 1.3, фронт Альмерия – Оран располагается на востоке Восточного Альборанского Вихря. Можно даже сказать, что он является восточной границей Альборанского моря. Более того, этот фронт так же является западной частью более соленых поверхностных вод центра

Средиземного моря. Все это будет вносить определенный вклад в циркуляцию Алборанского моря.

Стоит отметить, что двухвихревая циркуляция доминирует над поверхностной циркуляцией моря. Однако, при проведении этого пятимесячного эксперимента был период в течение 9 суток когда оба вихря отсутствовали. В это время поток вод из Атлантики резко сменил свое направление и развернулся к югу, после того как покинул пролив [20]. Так же отмечалось, что в случаях, которые продолжались несколько недель, также отсутствовал один из вихрей

Согласно [15] двухвихревая циркуляция обычно исчезает после миграционного события, происходящего в конце лета или осенью. WAG не сразу замещается вновь образовавшимся антициклоном, вместо этого происходит механизм «слияния-миграции» с Восточным Альборанским вихрь, который в конечном итоге заставляет последний двигаться на запад и формировать ситуацию с одним вихрем на поверхности моря. Образование второго EAG отмечалось весной-ранним летом и положило начало новому стабильному периоду системы «два вихря».

Эти появления или исчезновения вихрей вызывают огромный интерес до сих пор [21]. Более того изучение данного региона было актуальным, начиная с середины 70-х годов двадцатого века. Тем не менее, следует признать, что до сих пор полной завершённой концепции формирования вихревой циркуляции в море Альборан пока не разработано.

В следующем разделе подробнее рассмотрим хронологию опубликованных работ, связанных с изучением пространственно-временной изменчивости циркуляции западной части Средиземного моря. Подготовка такого обзора, на наш взгляд, имеет самостоятельный интерес, поскольку отражает не только текущее состояние изученности данного вопроса, но и позволяет проследить процесс выявления причинно-следственных связей, характеризующих разномасштабные процессы взаимодействия океана и атмосферы, суммировать имеющиеся результаты и выводы, связанные с

отдельными особенностями циркуляции, временной изменчивости ее вихревой структуры.

## 1.7 Обзор литературы и анализ основных выводов, полученных в публикациях по изучению циркуляции вод в западной части Средиземного моря

Хронологически публикации можно разделить на две условные группы (ранние и современные), основанные на доминировании в использовании различных методов наблюдений и обработки данных.

*Ранние исследования* базировались, в основном, на гидрологических исследованиях (синоптические данные). Временная изменчивость практически не изучалась. Тем не менее, сравнения между различными рейсами и исследованиями свидетельствовали о существовании временной изменчивости проявления схемы циркуляции, характерной для данного региона. Сведения о ранних исследованиях представлены в таблице 1.2

Таблица 1.2 – Краткая характеристика ранних исследований циркуляции в западной части Средиземного моря

Исследователь/автор работы	Год выпуска статьи	Результаты исследования
Lanoix	1974 г.	<p>Данные, которые использовались для проведения исследования, были получены в результате рейса в августе 1962 года.</p> <p>Атлантическое течение окружало WAG и затем втекало в восточный бассейн близко в африканскому берегу. Большая площадь циклонической активности сконцентрирована в восточном бассейне Средиземного моря [22].</p>
Cano Cano and Gill	1977-1978 гг. 1984 г.	<p>Наблюдаемая ситуация была подобной той, которую получил Lanoix.</p> <p>Cano определил, что в августе 1976 года оба вихря (WAG, EAG) присутствовали и были хорошо развиты [23-25]</p>

Продолжение таблицы 1.2

Исследователь/автор работы	Год выпуска статьи	Результаты исследования
Cheney, Doblak	1982 г.	<p>В этой работе была предпринята первая попытка исследовать временную изменчивость.</p> <p>Авторы сравнили 2 рейса (данные наблюдений были получены с самолета и судна), которые длились 10 дней каждый.</p> <p>Результаты исследования по первому рейсу: WAG перемещался на восток; а второй, меньший, антициклонический вихрь, был ограничен африканским побережьем. (юго-восток Сеуты).</p> <p>Исследование данных, полученных при втором рейсе, дало представление о следующей ситуации: WAG был хорошо развит и обнаружен на своем обычном месте.</p> <p>Авторы, опираясь на работу Стерон, [27] опубликованную еще в 1965 году соглашаются, что аномальная ситуация в течении первого рейса объясняется уменьшением атмосферного давления над западной частью СМ, а также западными ветрами в Гибралтаре [26].</p>

Продолжение таблицы 1.2

Исследователь/автор работы	Год выпуска статьи	Результаты исследования
Parilla	1984 г.	<p>WAG был в той же ситуации, что и в исследованиях Cheney, Doblar.</p> <p>Также было отмечено значительное понижение атмосферного давления в западной части Средиземного моря до рейса, что, в свою очередь, могло повлиять на формирование аномальных ситуаций. Получается, что данная работа подтвердила результаты предыдущего исследования [28]</p>
Perkins	1990 г	<p>В этой статье упоминается о более значительном южном перемещении Атлантического струи в сентябре 1982 года.</p> <p>В этом случае, струя течет близко к африканскому берегу, когда только выходит из Гибралтара. Об этом эпизоде сообщили измерения течений (in situ) и спутниковые снимки температуры поверхности океана SST [29]</p>

Анализируя выводы исследователей, получили две различных гипотезы, объясняющих причины формирования, а также расположение вихревых структур в море Альборан:

Первая гипотеза - объединяя выводы Crepon, Cheney and Doblar, Parilla [27, 26, 28] по исследованиям, получили, что понижение атмосферного давления над западной частью Средиземного моря способствует образованию более быстрого и сильного притока из Атлантики. В этом случае, Атлантическая струя (Atlantic Jet) перемещается на юг, продвигая WAG на восток.

Вторая гипотеза была сформирована на основе исследования [29]. Автор также считал, что изменения в перемещении вихрей WAG и EAG обусловлены изменчивостью атлантического притока, вызванного метеорологическим форсингом. Однако, в этом случае предлагаемое объяснение будет другим: низкое давление над Азорскими островами вызвало даунвеллинг в Кадисском заливе и, как следствие, увеличение положительной завихренности. в Атлантическом притоке.

Согласно информации, указанной в таблице можно выделить несколько общих особенностей, которые будут полезны для нашего исследования: WAG является квазистационарной особенностью циркуляции моря Алборан. В то время как, EAG является более неустойчивой [30]. Из анализа большого набора изображений SST, охватывающих 1982 и 1986 годы (и два месяца 1985 года), [31] пришли к выводу, что оба круговорота имеют одинаковую изменчивость во времени. Но каков масштаб этой изменчивости на тот момент был не понятен, поэтому исследования продолжились.

*Современные исследования.* К ним относятся исследования, основанные на использовании методов дистанционного зондирования, которые позволяют изучать очень низкочастотную изменчивость в виде сезонных циклов.

Сведения о исследованиях и основные выводы по ним сведены в таблицу 1.3.

Таблица 1.3 – Краткая характеристика последующих исследований циркуляции в западной части Средиземного моря

Исследователь/автор работы	Год выпуска статьи	Результаты исследования
Parada and Cantón	1998 г	<p>Авторы пришли к выводу, используя анализ SST изображений за 1993 год, что WAG является более устойчивой структурой, а EAG более изменчив.</p> <p>Согласно [32] наибольшая вероятность формирования WAG летом, когда Атлантический поток выше. А двухвихревая система не представлена за зиму 1993 года, когда Атлантический приток минимален [33].</p>
García-Górriz and Carr	1999 г.	<p>В этой работе также использовались SST изображения для изучения временной изменчивости Алборанского моря, но они не фокусировались на различных схемах циркуляции. Было обнаружено, что сезонный цикл температур между морем Алборан и Атлантическим океаном различен: теплее летом, холоднее зимой [34].</p>

Продолжение таблицы 1.3

Исследователь/автор работы	Год выпуска статьи	Результаты исследования
Vázquez-Cuervo et al.	1996 г.	Использовали данные альтиметрии за 1992-93 гг. Изучали циркуляцию моря Алборан [35].
Bormans and Garrett	1989 г.	Связывали присутствие WAG с изменчивостью Атлантической струи через Гибралтар. Был выявлен главный параметр для формирования WAG – соотношение между инерционным радиусом притока Атлантики и радиусом топографической кривизны в восточной части Гибралтара. Если параметр $>1$ , то Атлантический поток разовьет WAG. Если параметр $<1$ , то поток протекает вдоль африканского побережья [36].



Продолжение таблицы 1.3

Исследователь/автор работы	Год выпуска статьи	Результаты исследования
Vargas-Yanez et al.	2002 г.	<p>На основе ранних работ и полученных результатов, выяснили, что двухвихревая система в море Альборан выступает в качестве доминирующей схемы циркуляции в летний период.</p> <p>В верхнем слое солености и зональной скорости присутствуют годовые и полугодовые циклы, характеризующиеся минимумом весной и осенью и максимумом летом и зимой.</p> <p>Для изучения циклов пользовались большим набором изображений поверхностной температуры. Возникновение минимума весной и осенью связано с перемещением WAG на восток. Зимний и летний максимум вызван Атлантическим течением, протекающим на юге Альборанских островов.</p> <p>Предполагают, что сезонный цикл, описанный в этой работе, вероятнее всего, принадлежит верхнему слою моря Альборан [15].</p>

Продолжение таблицы 1.3

Исследователь/автор работы	Год выпуска статьи	Результаты исследования
Peliz et al.	2013 г.	<p>Согласно этой работе, циркуляция в западной части Средиземного моря зависит от масштаба изменчивости атлантического потока временной масштаб изменчивости может варьироваться от приливного до субинерционного, сезонного и межгодового. В большинстве случаев схема циркуляции проявляется в виде двух состояний. Первое проявляется в 48% случаев и заключается в наличии WAG и EAG – двух антициклонических вихря; второе составляет 24 % случаев, и в это случает в море Алборан присутствует только один антициклонический вихрь – EAG [4].</p>

Итак, основные выводы:

1. В море Алборан наблюдается и годовая и межгодовая изменчивость циркуляции и связана она с Атлантическим потоком через Гибралтарский пролив.
2. Проявляется изменчивость циркуляции во времени: как при сезонных, так и на более коротких временных масштабах.

3. Метеорологический форсинг, в частности, направление и интенсивность ветра над Гибралтарским проливом, а также атмосферное давление над Средиземным морем, оказывает влияние на присутствие или отсутствие двухвихревой системы циркуляции в море Альборан.

## 2 Методы исследования и исходные данные

### 2.1 Исходные данные

В качестве основных источников получения исходных данных были использованы результаты ретроспективного моделирования, выполненного на основе двух гидродинамических моделей, внедренных в практику региональной оперативной океанологии: The operational IBI (Iberian Biscay Irish) Ocean Analysis and Forecasting system. и Mediterranean Forecasting System. Применяемый набор данных включал в себя: возмущение уровня моря (SSH), данные составляющих поверхностных течений.

Для оценки влияния метеорологического форсинга на формирование циркуляции в море Альборан были взяты данные розы ветров в исследуемом регионе

Для сравнения модельных данных SSH с натурными использовались значения ADT, взятые с портала AVISO+

#### *Данные SSH*

Источник данных: Copernicus Marine Environment Monitoring Service (CMEMS), который является одним из сервисов европейской программы Copernicus. Эта программа обладает огромным количеством данных наблюдений, предоставляя открытый доступ к интересующим пользователей данным через интерактивный каталог.

Copernicus Marine Environment Monitoring Service (CMEMS) – Служба мониторинга морской среды, предоставляет регулярную справочную информацию о состоянии, изменчивости и динамике океанических и морских экосистем для Мирового океана и региональных европейских морей. Наблюдения и прогнозы, которые предоставляются службой, могут быть применены в различных секторах морской деятельности: морская

безопасность, морские ресурсы, прибрежная и морская среда, а также прогнозирование погоды и климата [37]

*Продукт модели для региона Средиземного моря (Оперативная система Mediterranean Forecasting system )*

В данной работе использовались данные SSH (возмущения уровня моря), которые получены Центром мониторинга и прогнозирования Средиземного моря (Mediterranean Monitoring and Forecasting Centre - MED-MFC) и являются оперативным продуктом Средиземноморской системы прогнозирования – «Mediterranean Forecasting System». Физический компонент представляет собой систему моделирования связанных гидродинамических волн, которая реализуется по всему Средиземноморскому бассейну.

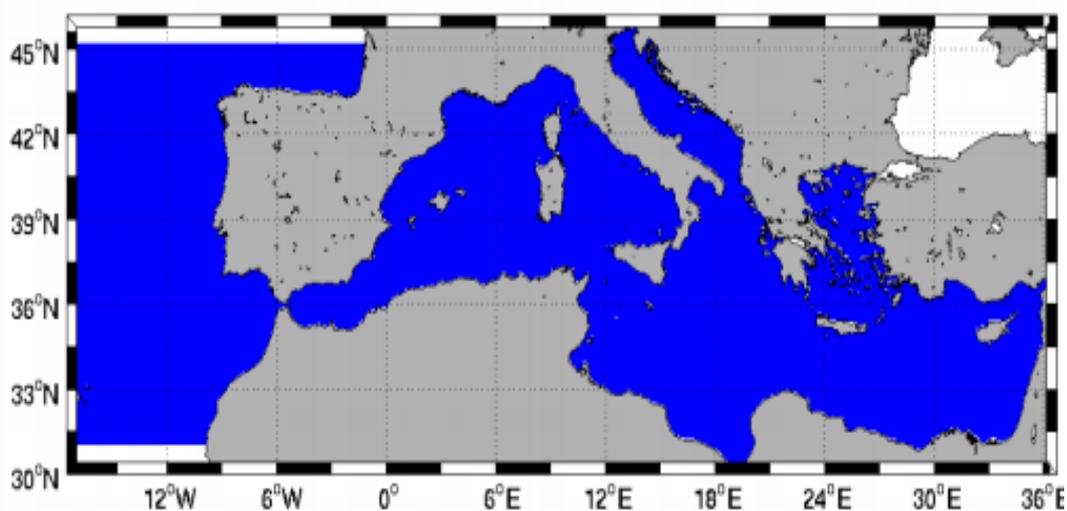


Рисунок 2.1 – Пространственное покрытие данных оперативной системы «Mediterranean Forecasting System»[38]

Гидродинамика обеспечивается моделью NEMO v3.6 (Nucleous for European Modelling of the Ocean). Модель охватывает все Средиземное море, а также простирается в Атлантику, чтобы лучше изучить обмены с

Атлантическим океаном в Гибралтарском проливе. Волновая составляющая обеспечивается WaveWatch-III; Решения модели корректируются с помощью вариационной схемы усвоения данных (3DVAR) вертикальных профилей температуры и солёности и вдоль спутниковых наблюдений за аномалией уровня моря [38, 39]

Тип данных: ежедневные прогностические значения SSH с пространственным разрешением сетки  $1/24^\circ \times 1/24^\circ$  (около 4 км)

Период исследования: 1 января 2018 – 1 января 2019 гг.

*Продукт модели для региона Иберийско-Бийскайско-Ирландских региональных морей (Оперативная модель «The operational IBI (Iberian Biscay Irish) Ocean Analysis and Forecasting system» )*

Используемые данные SSH предоставлены Центром мониторинга и прогнозирования Иберийско-Бийскайско-Ирландских морей. CMEMS IBI-FC (Iberia-Biscay-Ireland Monitoring and Forecasting Centre) и являются оперативным продуктом системы «The operational IBI (Iberian Biscay Irish) Ocean Analysis and Forecasting system».

Система прогнозирования океана IBI MFC в настоящее время (в эксплуатационной версии CMEMS V4) основана на применении модели NEMO-v3.6, управляемой высокочастотным метеорологическим и океанографическим воздействием [40]

Модель NEMO [41] решает трехмерные конечно-разностные примитивные уравнения. Конфигурация модели NEMO охватывает весь регион IBI Начиная с выпуска CMEMS V4 (апрель 2018 г.), IBI считает с помощью системы ассимиляции данных, и еженедельно выполняется региональный анализ. Совокупность этого аналитического решения IBI считается лучшим продуктом IBI за всю историю.

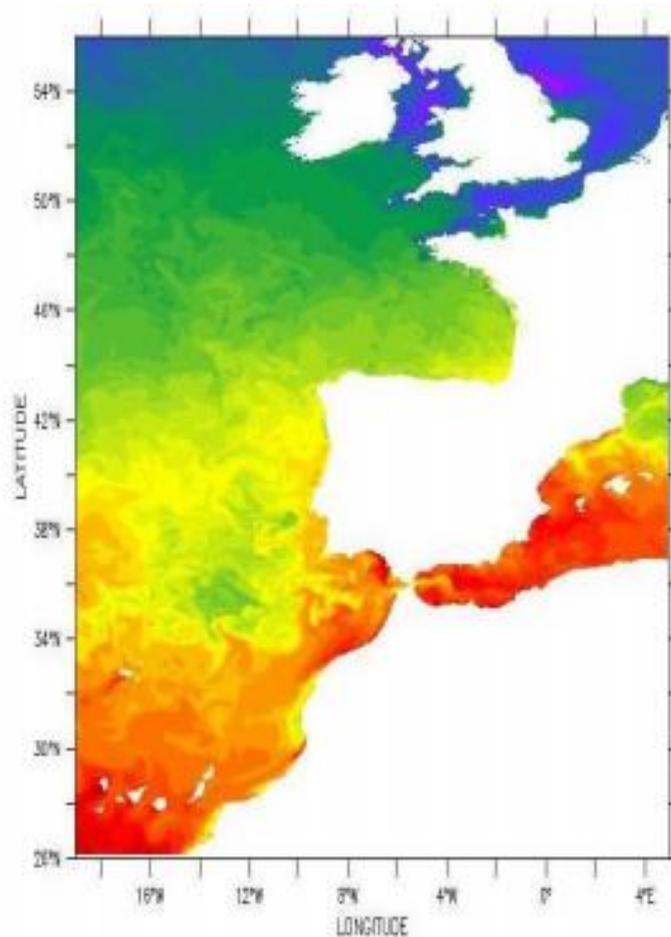


Рисунок 2.2 – Пространственное покрытие данных оперативной системы «The operational IBI (Iberian Biscay Irish) Ocean Analysis and Forecasting system» [40]

Тип данных: ежедневные прогностические значения SSH с пространственным разрешением сетки  $1/36^\circ \times 1/36^\circ$  (около 3 км). Период исследования: 1 января 2018 – 1 января 2019 гг.

#### *Данные составляющих поверхностных течений*

Аналогично данным SSH, использовались ежедневные данные о составляющих поверхностных течений для регионов Iberia-Biscay-Ireland Regional Seas и Mediterranean Sea. Основные свойства этих оперативных систем описаны выше.

Тип данных: ежедневные прогностические значения составляющих

поверхностных течений с пространственным разрешением сетки  $1/36^\circ \times 1/36^\circ$  (около 3 км) для продуктов «The operational IBI Ocean Analysis and Forecasting system», и  $1/24^\circ \times 1/24^\circ$  для продуктов «Mediterranean Forecasting System»

Период исследования: 1 января 2018 – 1 января 2019 гг.

#### *Данные скорости ветра*

Для оценки влияния метеорологического форсинга на поведение циркуляции в море Альборан были взяты данные розы ветров с 1958- 2019 гг. в исследуемом регионе. Для этого пользовались данные ресурса Puertos del Estado (Испания).

Ресурс Puertos del Estado разрабатывает и поддерживает системы измерения и прогнозирования морской среды с основной целью обеспечения Испанской портовой системы необходимыми океанографическими метеорологическими данными для ее проектирования и эксплуатации, что сокращает расходы и повышает эффективность, устойчивость и безопасность портовых операций.

Преимущества этой деятельности не ограничиваются только портовой средой, но также стремятся стать услугой, открытой для общества и других учреждений. Это обеспечивается в основном через веб-сайт Puertos del Estado.

Система состоит из измерительных сетей (буи, мареографы и высокочастотные радары), служб прогнозирования (волны, уровень моря, течения и температура воды) и климатических установок, которые описывают как морской климат в настоящее время, так и его сценарии перемен в будущем[42].

#### *Данные альтиметрии*

Данные абсолютной динамической топографии ADT (м), которые были получены из базы данных продуктов спутниковой альтиметрии AVISO+

(Archiving, Validation and Interpretation of Satellite Oceanographic data), использовались для сравнения с модельными данными SSH.

В этой базе данных содержатся данные, статьи, новости и инструменты, которые помогут открыть или улучшить навыки в области альтиметрии по четырем ключевым темам: океан, побережье, гидрология и лед. Альтиметрия - это метод измерения высоты. Спутниковая альтиметрия измеряет время, необходимое радиолокационному импульсу для прохождения от спутниковой антенны к поверхности и обратно к спутниковому приемнику. В сочетании с точными данными о местонахождении спутников альтиметрические измерения дают высоту поверхности моря. Портал AVISO+ предоставляет пользователям оперативные и демонстрационные продукты спутниковой альтиметрии [43].

Тип данных: ежедневные данные наблюдений значений ADT с пространственным разрешением сетки  $0.125^{\circ} \times 0.125^{\circ}$

Период исследования: 1 января 2018 – 30 сентября 2019 гг. Для дальнейшей работы над исследованием необходимо было преобразовать данные. Итак, ежедневные данные были осреднены за пять суток для каждого набора данных, так как временной масштаб динамических процессов в исследуемой части обладает субинерциональным характером. Продолжительность явлений субинерционального временного масштаба от 2 до 10 дней. Если бы использовались среднемесячные значения, то проследить сезонный ход положения вихрей WAG и EAG было бы практически невозможно, так как осреднение считается грубым.

## 2.2 Методы исследования

### 2.2.1 Преобразование и визуализация данных

Для работы с данными использовалась операционная система UbuntuOcean, основанная на ядре Linux. Эта система содержит в себе

необходимые программы и инструменты для преобразования и визуализации океанографических данных (см. таблицу 2.1), которые помогли выполнению исследований и способствовали проведению анализу.

Таблица 2.1 - Программы и инструменты операционной системы UbuntuOcean

Название программы, инструмента	Назначение	Поддерживаемый формат данных
CDO	Преобразование	GRIB, netCDF
NCVIEW	Визуализация	netCDF
Ferret (Pyferret)	Преобразование и визуализация	netCDF

CDO - Climate Data Operators. Является открытым ресурсом, который работает в командной строке Linux. Разработан Метеорологическим институтом Макса Планка. Это набор операторов для действий и анализа погоды и океано-метеорологических данных [44]

NCVIEW - это визуальный браузер для файлов формата netCDF. Используется для быстрого и легкого просмотра файлов. Есть возможность просматривать простые анимации данных, различные измерения, фактические значения данных, а также изменять цветовые карты, инвертировать данные [45]

Ferret(Pyferret) - это интерактивная компьютерная среда

визуализации и анализа, разработанная для удовлетворения потребностей океанографов и метеорологов, анализирующих большие и сложные наборы данных. PyFerret - это обновление до Ferret, которое запускает существующие скрипты Ferret и включает все функции Ferret с обновленными графическими возможностями и дополнительными функциями анализа. Кроме того, модуль Pyferret предоставляет функции Python, поэтому пользователи Python могут легко использовать возможности Ferret для извлечения, обработки, визуализации и сохранения данных.

Ferret был разработан Проектом Thermal Modeling and Analysis Project (ТМАР) в Сиэтле для анализа выходных данных его численных моделей океана и сравнения их с данными наблюдений. Полностью документированные графики создаются с помощью одной команды. Ferret широко используется в океанографическом сообществе для анализа данных и создания качественной графики при отображении набора данных [46].

### 2.2.2 Пространственно-временные диаграмм Хофмоллера

Диаграмма Хофмоллера была впервые использована Еместом Хофмоллером, шведским метеорологом, в 1949 г. Он оценил её важность для пространственно-временного анализа в своей работе [49]. Эти диаграммы используются для визуализации данных и обнаружения изменений как во времени, так и в пространстве. Возможны два основных варианта построения диаграммы: по осям откладываются время и широта или время и долгота, причем значение некоторого поля представлено цветом или штриховкой. Диаграммы Хофмоллера также используются для построения графика временной зависимости вертикальных профилей скалярных величин, таких как температура, плотность или концентрации компонентов в атмосфере или океане[47, 48]

*Алгоритм построения диаграммы Хофмоллера для модельных значений SSH*

*и натурных данных ADT*

### Шаг 1.

Устанавливаем границы области, где хотим проследить пространственно-временную изменчивость: от  $35^\circ$  северной широты до  $37^\circ$  северной широты, при этом значения долготы фиксируем для WAG это  $4^\circ$  западной долготы, для EAG  $-2^\circ$  западной долготы.

### Шаг 2

Начиная с 1 января, значения SSH и ADT осреднили с частотой раз в 5 суток

### Шаг 3

Затем мы повторили Шаг 2 для каждого пятисуточного интервала в году (получилось 74 значения). Данные каждого интервала - это один столбец на диаграмме Хофмеллера. С помощью диаграммы была оценена интенсивность поведения вихревых структур в западной части Средиземного моря за 2019 год.

### 3 Исследование динамической структуры течений западной части Средиземного моря, включая зону Гибралтарского пролива

#### 3.1 Предварительный анализ и сравнение результатов использования региональных океанологических оперативных систем «Mediterranean Forecasting System» и «The operational IBI Ocean Analysis and Forecasting system»

Прежде, чем приступать к анализу динамики, необходимо было разобраться, на основе каких данных можно было это выполнить. Как было упомянуто ранее, одним из этапов исследования является оценка сопоставимости результатов, которые получаются при использовании двух различных региональных океанологических оперативных систем: «Mediterranean Forecasting System» (MS) и «The operational IBI Ocean Analysis and Forecasting system» (IBI)

Следует отметить, что указанные региональные оперативные системы разрабатывались независимо друг от друга, поэтому используемые в этих региональных системах гидродинамические модели не являются полными аналогами друг друга. Исходные уравнения отличаются рядом принятых допущений. Гидродинамические модели имеют различное пространственное и временное разрешение, что определяет различие в детализации как исходных полей (морфометрия, параметры атмосферы и т.п.), так полей получаемых в результате моделирования. Оперативные системы покрывают различные, хотя и перекрывающиеся области, отличаются процедурами ассимиляции данных. Поскольку обе океанологические оперативные системы используются в оперативной деятельности, возникает очевидный вопрос: какую модель следует использовать для дальнейших исследований в рамках данной работы. Эта задача имеет вспомогательный, методический

характер, поэтому в рамках данной работы не ставилась задача детального сравнения результатов ретроспективного анализа распределения океанологических параметров в заданной расчетной области. Для сравнения сопоставимости двух региональных оперативных систем было предложено использовать в качестве интегрального показателя сравнение сезонного хода среднего по площади значения уровня. Район исследования, являющийся общим для обеих систем, показан на рис 3.1. Осреднение уровня по площади позволяет уменьшить роль целого ряда факторов, которые могут являться причинами несовпадения результатов, например, таких как детализация исходных полей, влияние граничных условий, процесс ассимиляции данных и других. Выбор в качестве интегральной характеристики характеристик уровня обусловлено двумя причинами. Во-первых, поля уровня будут использованы в дальнейшем при анализе динамики циркуляции и, во-вторых, изменение уровня может быть сопоставлено с данными спутниковой альтиметрии. Таким образом, использование такой интегральной характеристики позволяет рассмотреть процесс не в деталях, а в целом и обнаружить общие его черты или различия.

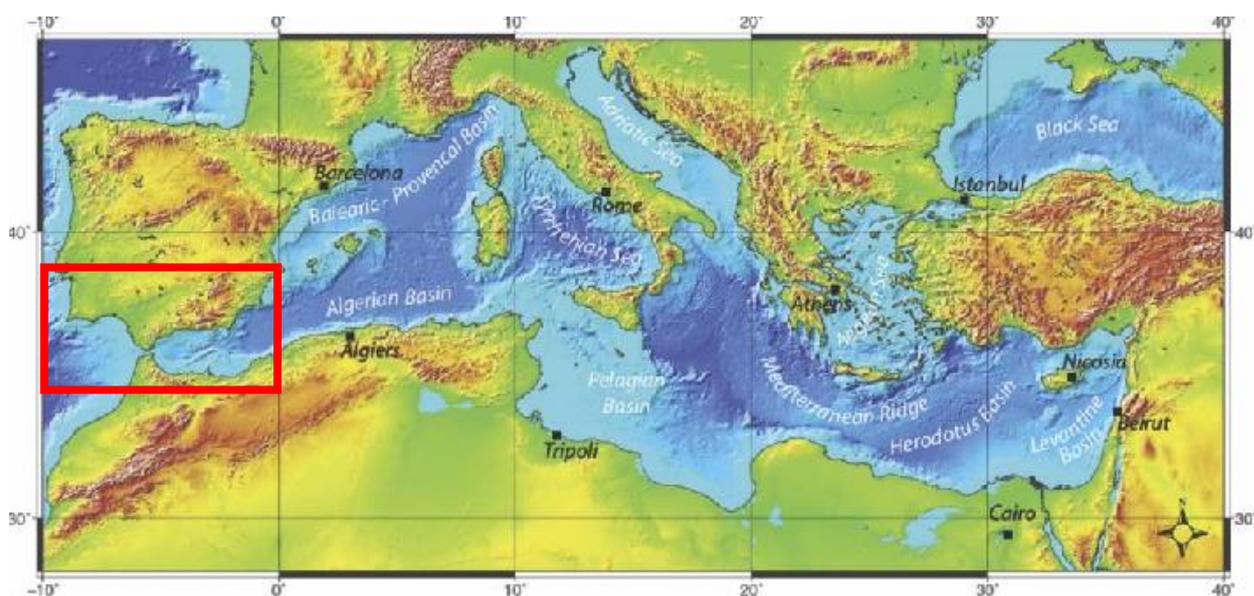


Рисунок 3.1 – Карта Средиземного моря с районами исследования [50]

На рисунке 3.1 красное поле показывает область, которая включает как Средиземноморскую, так и Атлантическую части зоны Гибралтарского пролива и используется для сопоставления результатов двух различных региональных оперативных систем («Mediterranean Forecasting System» и «The operational IBI Ocean Analysis and Forecasting system»). Здесь анализировались не только характеристики уровня, но и характеристики поверхностной циркуляции. Для анализа данных ретроспективного анализа в обоих случаях использовался период с 1 января 2018 года по 1 января 2019 г.

Рассмотрим внутригодовую изменчивость среднего по площади уровня, полученного с использованием оперативных систем «Mediterranean Forecasting System» (MS) (рис 3.2 (а)) и «The operational IBI Ocean Analysis and Forecasting system» (IBI) (рис 3.2 (б)).

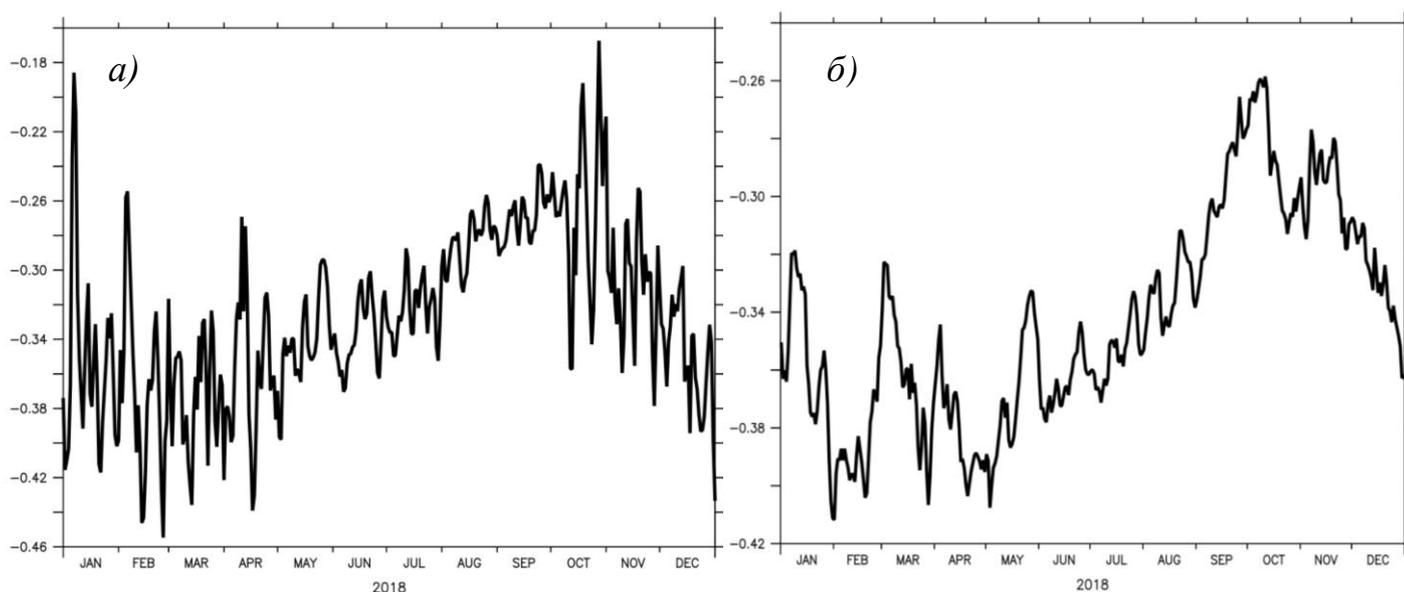


Рисунок 3.2 – Временной ход среднего значения уровня по площади по данным оперативных систем Mediterranean Forecasting System (а) и The operational IBI Ocean Analysis and Forecasting system (б)

Как следует из рисунка, в принципе, модели работают правильно,

среднее по площади значения уровня отрицательное, что связано с общим перекосом уровня между Атлантикой и акваторией Средиземного моря. Однако, между результатами, полученных с помощью разных моделей, имеются очевидные различия. Из рисунка 3.2 видно, что для первой оперативной системы характерна возможность воспроизведения более частой изменчивости исследуемого параметра (SSH), а для второй - менее. Если модели показали отличные друг от друга результаты, тогда, возникает проблема в выборе используемых данных для исследования, которая требует решения. Для этого необходимо было попытаться преобразовать исходные данные, так чтобы при рассмотрении результатов, можно было выделить общие черты, если таковые имеются. Для этого полученные ряды были сглажены путём проведения процедуры простого скользящего осреднения с шириной окна 5 и 10 суток. Весовые коэффициенты при осреднении слагаемых ряда принимались равными единице. Значения простого скользящего среднего, полученного с шириной окна 5 суток, показано на рисунке 3.3, с шириной окна 10 суток – на рисунке 3.4. Черным цветом на графиках показаны исходные ряды, цветом отмечены те же ряды, но подверженные процедуре скользящего осреднения. Как и следовало ожидать, сглаженные ряды дают более сходную картину, характеризующуюся максимальными (до  $-0.40\text{м}$ ) – отклонениями уровня в весенне-зимний период (январь-май, с минимумом в феврале) и минимальными (до  $-0.30\text{м}$ ) отклонениями в осеннее - зимний период (октябрь-декабрь, с максимумом в октябре). Характер максимального и минимального отклонения уровня схож для обеих оперативных систем.

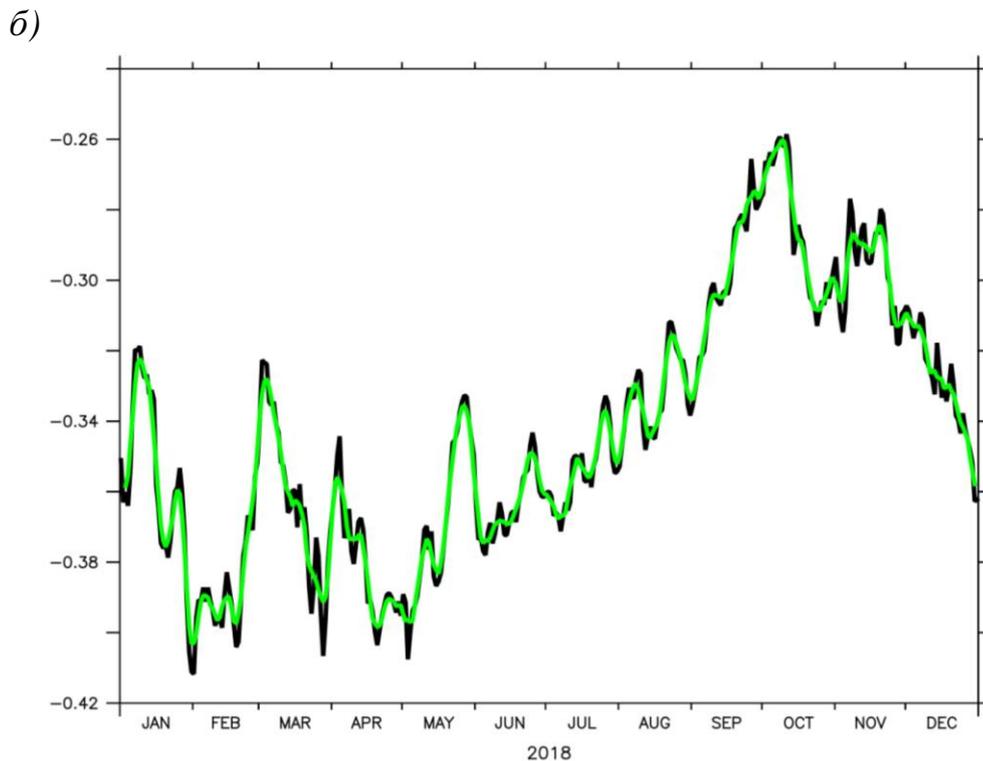
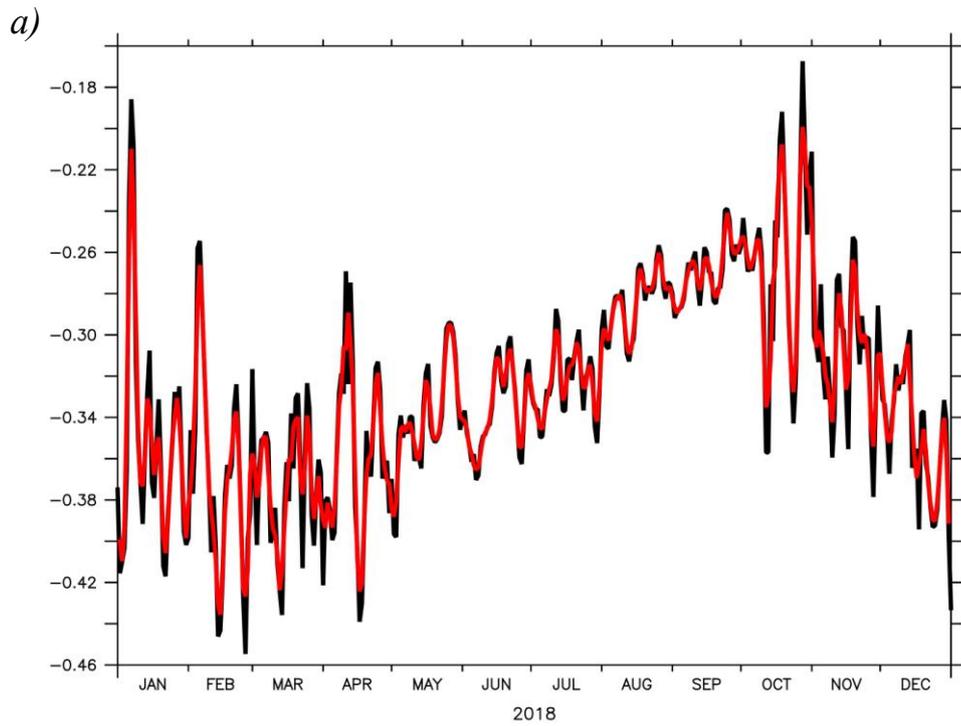


Рисунок 3.3 – Временной ход среднего значения уровня по площади и его скользящее среднее (5 суток) по данным оперативных систем Mediterranean Forecasting System (a) и The operational IBI Ocean Analysis and Forecasting system (б)

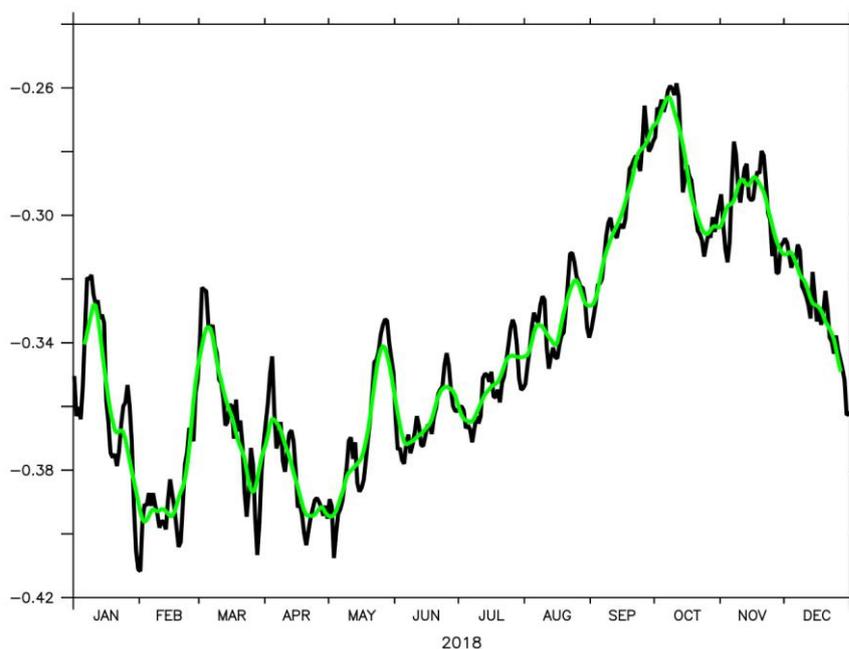
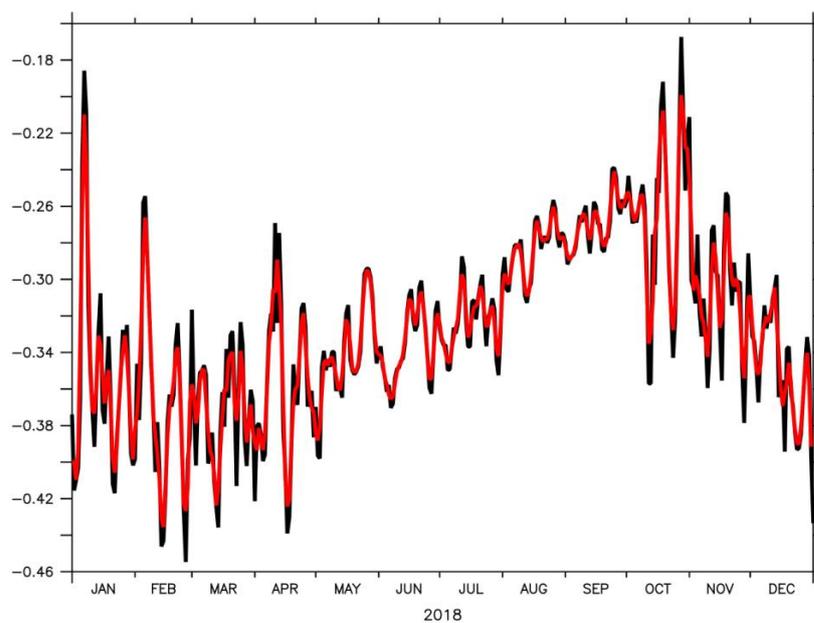


Рисунок 3.4 - Временной ход среднего значения уровня по площади и его скользящее среднее (10 суток) по данным оперативных систем Mediterranean Forecasting System (а) и The operational IBI Ocean Analysis and Forecasting system (б)

Следует отметить, что, несмотря на сглаживание, модель MS позволяет воспроизводить процессы мезомасштабного характера, тогда как модель IBI более подходит для воспроизведения процессов сезонной и межгодовой изменчивости. В силу неоднозначности выбора в дальнейшем для изучения вихревой циркуляции в западной части Средиземного моря были использованы данные обеих гидродинамических моделей.

### 3.2 Формирование поля скорости течений в верхнем слое моря Альборан (западная часть Средиземного моря)

Как уже отмечалось ранее, характерной чертой западной части Средиземного моря является наличие квазистационарной вихревой структуры. Наличие и динамика изменения этой структуры существенно влияет на формирование полей поверхностного течения Альборанского моря. В общем случае поверхностная циркуляция может быть представлена в виде трех составляющих: баротропной, бароклинной и ветровой составляющих. Оценим роль этих факторов с использованием данных оперативных океанологических моделей. При этом в силу отмеченных выше причин будем использовать данные обеих оперативных океанологических систем. Для анализа были использованы данные полученные за период с 1 января 2018 года по 1 января 2019 года. Следует отметить, что, судя по обзору литературных источников, анализ положения наличия и динамики вихревых образований по данным 2018 года пока другими авторами не проводился.

С использованием данных океанологических оперативных моделей MS и IBI на первом этапе для каждого пятого дня месяца 2018 года были построены осредненные за пять дней поля поверхностных течений, совмещенные с полем отклонения уровня моря (SSH). Рельеф свободной поверхности может быть использован для идентификации положения

квазистационарных вихрей. Наклоны уровня, определяемые формой рельефа свободной поверхности, определяют наличие баротропной составляющей в поле течений. Как известно, баротропные течения проявляющейся во всей толще воды и тем более в ее поверхностном слое, находящемся выше придонного слоя трения. Осредненные за каждые пять дней 2018 года.совмещенные поля поверхностных скоростей и уровневой поверхности представлены в Приложениях А и Б.

Результаты были получены для обеих оперативных систем с целью, определить проявление вихревой циркуляции (одновихревой или двухвихревой) в море Альборан, попытаться качественно оценить перемещение вихревых образований и их зависимость от интенсивности течения в Гибралтарском проливе, а также качественно сопоставить результаты, полученные одной моделью с результатами другой.

Первоначально ежедневные данные возмущения уровня SSH были сглажены с использованием простого скользящего среднего с окном, равным пяти суткам. Согласно [4, 8] в данном регионе субинерциальный временной масштаб лучше всего отражает период существования вихревых структур, то есть изменения в их поведении будут лучше заметны при временной изменчивости от несколько дней до недель. Как следует из анализа построенных совмещенных полей, схема поверхностных течений очень хорошо совпадает с полем уровня. В зонах относительного повышения уровня наблюдается ярко выраженная антициклоническая завихренность, в зонах понижения уровня – циклоническая. Такая четкая связь между скоростью поверхностного течения и уровнем прослеживается для каждого месяца в течение всего годового цикла. Наличие такой явной связи, которая подтверждается использованием обеих оперативных систем, позволяет предположить о существенной роли баротропных процессов на формирование циркуляции в поверхностном слое западной части Средиземного моря. Как было отмечено в разделе 1.7, существенная роль атмосферного давления на формирование вихрей была отмечена рядом

авторов.

Поскольку мы рассматриваем поверхностный слой моря естественно предположить влияние ветра, оказывающего прямое влекущее воздействие на морскую поверхность. Используя данные ресурса Puertos del Estado (Испания) получили розу ветров, представленную на рисунке 3.4. Из данного рисунка следует, что на территории исследуемого региона, уже на протяжении 60 лет, преобладающим направлением ветра является восточное или западное. Однако, если ветер практически имеет только два направления, а образование вихревых структур все равно происходит, получается, что ветровая составляющая для формирования субинерционной циркуляции не является определяющей. Можем предположить, что вихри формируются в результате бароклинных и баротропных процессов и слабо зависят от ветровой циркуляции, которая как бы «проваливается» при месячном осреднении. Таким образом, есть предположение о большем влиянии иных процессов на циркуляцию.

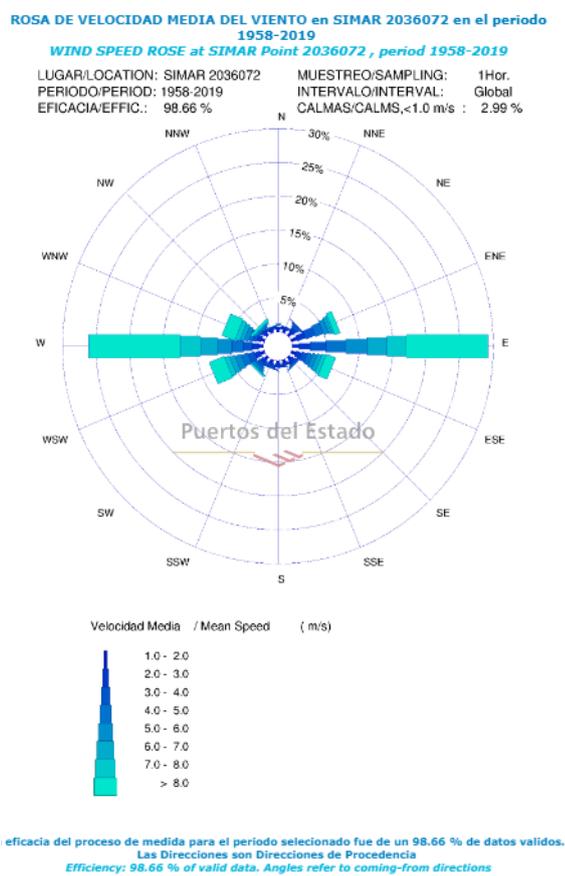


Рисунок 3.4 – Роза ветров для исследуемой территории по данным

оперативного испанского ресурса Puertos del Estado [42]

И это подтверждает то, что образование вихря это не локальный процесс (например, циклоническая активность), а глобальный.

На образование вихрей в большей степени может влиять изменение интенсивности водообмена через Гибралтар, которое может быть вызвано в том числе и воздействием ветра. В результате воздействия ветра, в зависимости от его направления, может происходить увеличение или уменьшения поступления в поверхностном слое более распресненной атлантической водной массы. Это в свою очередь приводит к смещению к северу или к югу, так называемой Атлантической струи (Atlantic Jet) – потока атлантической воды, проникающей из Гибралтарского пролива в море Альборан.

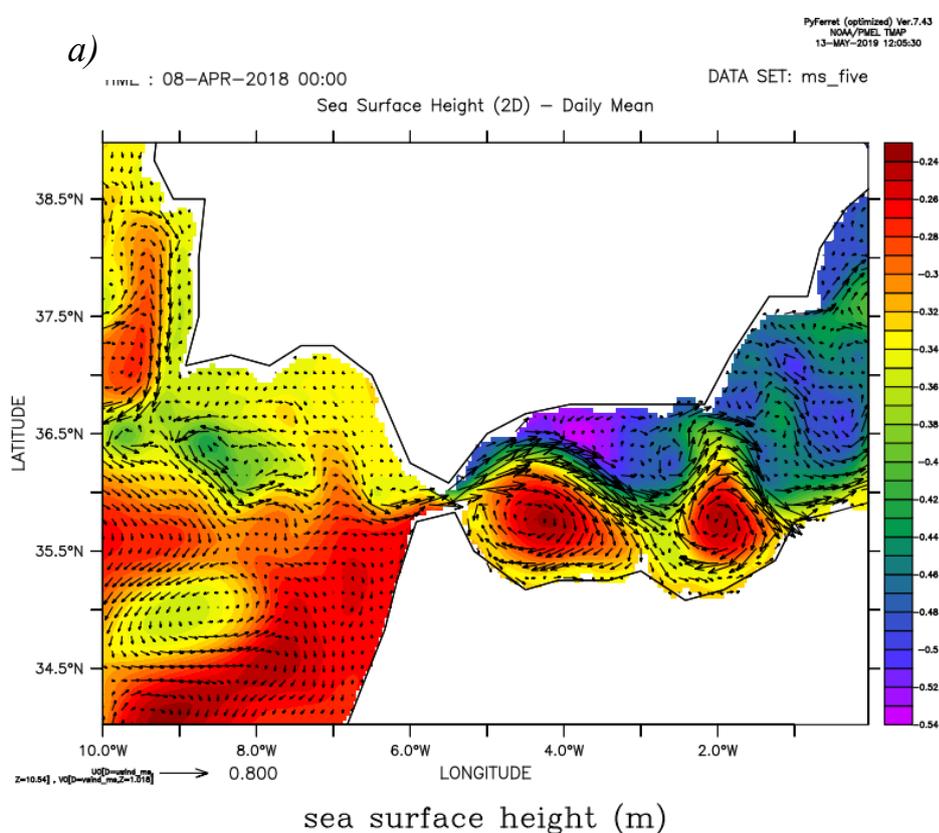
Это показательно, что мы берем поверхностные течения, где вклад ветра должен быть значителен, а поскольку дрейфовое течение затухает с глубиной, то поэтому, очевидно, что если бы мы взяли данные о течениях на других горизонтах, то картина бы не менялась. Таким образом, можно предположить, что непосредственное (влекущее) воздействие ветра слабо влияет на формирование вихрей. Однако опосредованная роль ветрового воздействия, связанная с изменением притока атлантической воды через Гибралтарский пролив и, как следствие, усиление или ослабление бароклинности является весьма существенной.

3.3 Анализ пространственно-временной изменчивости вихревых структур в западной части Средиземного моря, включая зону Гибралтарского пролива на основе совмещенных полей скорости поверхностных течений и поля уровня.

Далее нашей задачей было качественно описать поля поверхностных течений и возмущения уровня моря. Каждая оперативная модель рассматривалась отдельно, чтобы было проще обнаружить общие черты моделей, или, наоборот, их различия, а так же проанализировать

пространственную изменчивость вихревых структур в море Альборан. Все соответствующие поля приведены в приложениях А и Б. В этом разделе мы приведем для примера только наиболее типичные рисунки, иллюстрирующие то или иное состояние вихревой системы моря Альборан.

Сначала обратимся к данным, полученных на основе использования океанологической оперативной системы «Mediterranean Forecasting System». Совмещенные среднемесячные поля скорости поверхностного течения и уровня за апрель и декабрь представлены на рисунке 3.5.



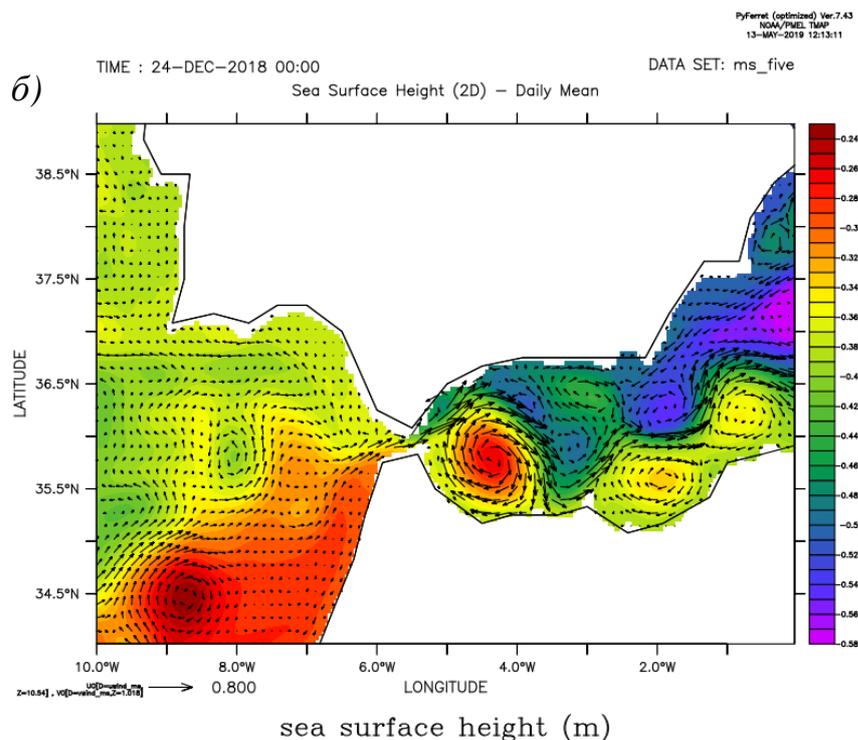


Рисунок 3.5 – Совмещенные поля скорости поверхностного течения и уровня по данным оперативной системы «Mediterranean Forecasting System» за апрель 2019 г. (а) и за декабрь (б)

Для этой оперативной системы двухвихревая циркуляция наиболее ярко выражена в начале апреля, а один вихрь проявляется в конце декабря. Похожая ситуация отмечалась в [4], где говорилось что двухвихревая система начинает исчезать поздним летом-осенью. Потом происходит механизм перемещения и слияния WAG с EAG, данный механизм заставляет EAG перемещаться на запад и после чего на поверхности моря Альборан устанавливается один вихрь. С конца весны и начала лета образуется новая двухвихревая схема, в статье это объяснялось генерацией EAG. Однако, ситуация в статье и в нашей работе не полностью совпадает, так как на протяжении 2018 года по данным полей течений и уровня сложно отследить явную закономерность в образовании вихревых структур. Их сезонная изменчивость за данный год слаба.

Полученные с использованием данным оперативной системы «The operational IBI Ocean Analysis and Forecasting system» совмещенные поля

скорости поверхностного течения и уровня за апрель и январь (осредненные за пять суток) представлены на рисунке 3.6 (а), 3.6 (б) соответственно.

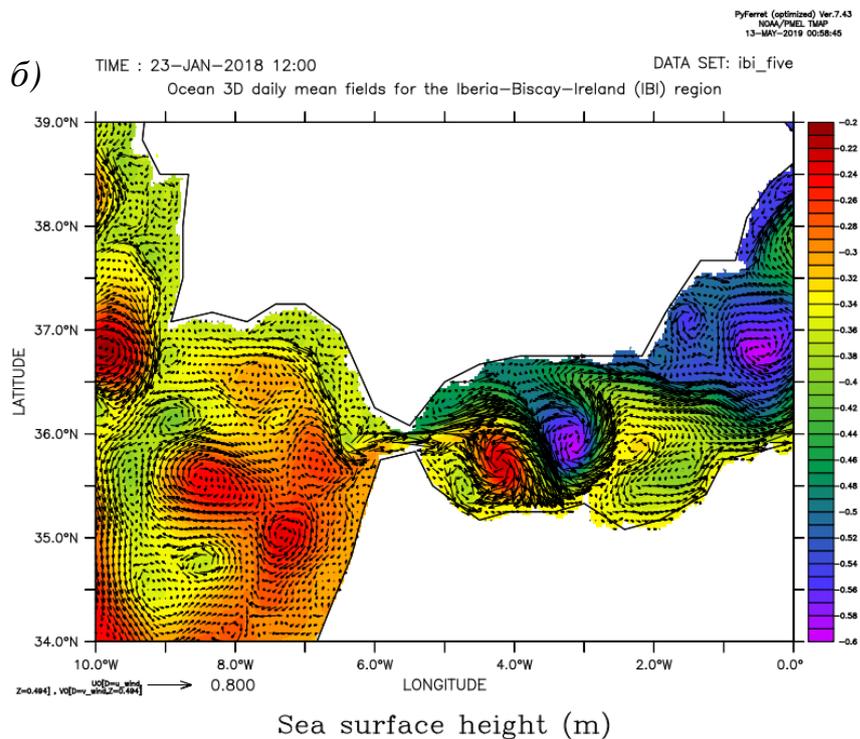
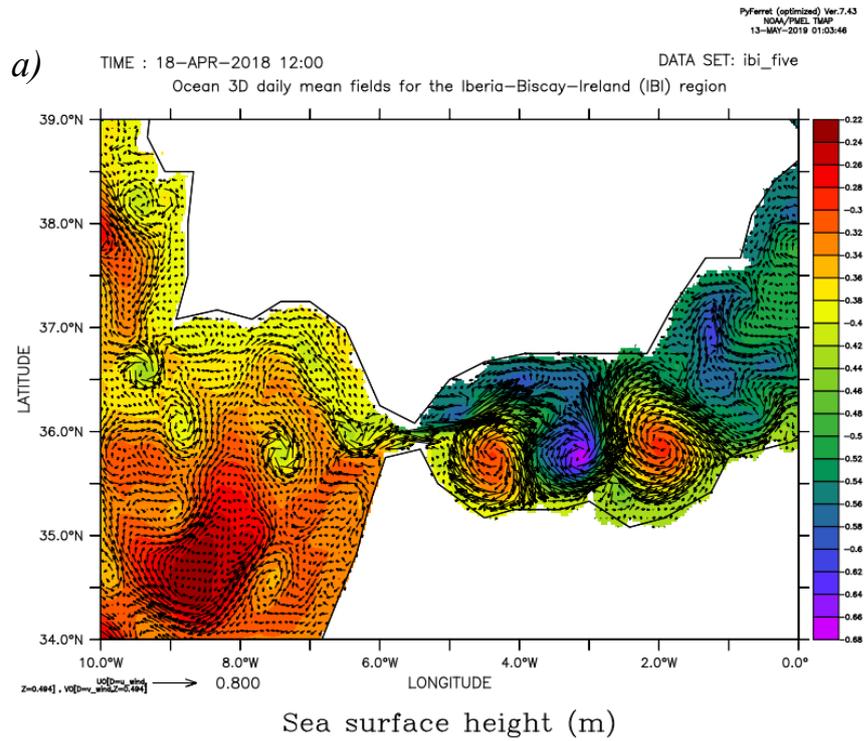


Рисунок 3.6 – Совмещенные поля скорости поверхностного течения и уровня по данным оперативной системы «The operational IBI Ocean Analysis and Forecasting system» за апрель 2019 г. (а) и за декабрь (б)

Для оперативной системы *The operational IBI Ocean Analysis and Forecasting system* двухвихревая циркуляция наиболее ярко выражена во второй половине апреля, а один вихрь проявляется в начале 2018 года, 23 января.

Таким образом, сопоставление полей поверхностной скорости и уровня показало существование в течение 2018 года одно-двухвихревой структуры моря Альборан. Расположение двух антициклонических вихрей находятся примерно в тех же местах на обеих картах. Получилось, что в некоторые месяцы четко выделяются зоны WAG и EAG. С центром вихрей в точке с координатами примерно  $2^{\circ} \text{ W } 36^{\circ} \text{ N}$  для EAG и  $4^{\circ} \text{ W } 36^{\circ} \text{ N}$  для WAG.

Опираясь на изображения полей (Приложения А-Б), можно заключить, что проявление вихрей не носит ярко-выраженный сезонный характер. Можно предположить, что сохранению двухвихревой структуры в летнее время способствует обострение фронтальной зоны Альмерия – Оран, за счет повышения солености, вызванного осолонением морской воды за счет увеличения испарения в летний период. Обострение фронтальной зоны, как бы запирает оба вихря в море Альборан (рис 3.5(а), 3.6(а)). При этом к концу этого периода может отмечаться тенденция к усилению восточного вихря и ослаблению западного (рис 3.6 (а)). Ослабление общей завихренности и отсутствие явно выраженного восточного вихря наблюдается в феврале, а также в середине/конце апреля. В этот период происходит ослабление фронтального раздела и появляется тенденция к перемещению восточного вихря на восток в центральную часть Средиземного моря (рис 3.5 (б), 3.6(б)).

Основываясь на данных 2018 года можно сделать предположение о возможности рассмотрения в море Альборан не двух, а трехвихревой структуры, состоящей из двух антициклонических вихрей (WAG с EAG) и одного циклонического. Причем диполь, состоящий из WAG и циклонического вихря, является более устойчивым, поскольку второй антициклонический вихрь (EAG) периодически может «исчезать». На наличие связи между притоком атлантической воды через Гибралтарский

пролив и развитием циклонической циркуляции в Альборанском море было указано в работе [8]. С учетом полученных в данной работе результатов можно предложить следующий механизм формирования завихренности поля скорости поверхностного течения в море Альборан. Интенсивность западного антициклонического вихря будет определяться интенсивность поступления атлантической воды. При ослаблении Атлантическая струя будет отклоняться к югу, способствуя формированию WAG и усилению циклонической циркуляции, которая в свою очередь будет вытеснять восточный антициклонический вихрь. При усилении Атлантической струи, она будет отклоняться к северу, приводить к смещению циклонического вихря к побережью Испании, тем самым уменьшая его интенсивность, что будет способствовать формированию и сохранению на некоторое время восточного антициклонического вихря.

Для более детального исследования анализа динамики вихревых образований был предложен алгоритм рассмотрения пространственно-временной изменчивость вихревых структур с использованием диаграмм Хофмоллера. При этом также были использованы обеих оперативных систем.

3.4 Пространственно-временная изменчивость вихревых структур в западной части Средиземного моря, включая зону Гибралтарского пролива, с использованием диаграмм Хофмоллера

При анализе осредненных за пять дней полей уровня западной части Средиземного моря, включая зону Гибралтара, были выявлены зоны примерного расположения западного и восточного вихрей восточного и вихрей моря Альборан. WAG и EAG. (см. подраздел 3.3 1).

*Данные оперативной системы «The operational IBI Ocean Analysis and Forecasting system»*

Чтобы рассмотреть поведение вихревых структур (WAG и EAG) в

течение 2018 года были построены диаграммы Хофмоллера с фиксированным значением долготы 4° W для западного вихря (WAG) и 2° W для восточного вихря (EAG). На рисунке 3.7 можно видеть, как меняется положение западного вихря (WAG) с севера на юг вдоль выбранной долготы, по оси x откладывается время, по оси y – широта.

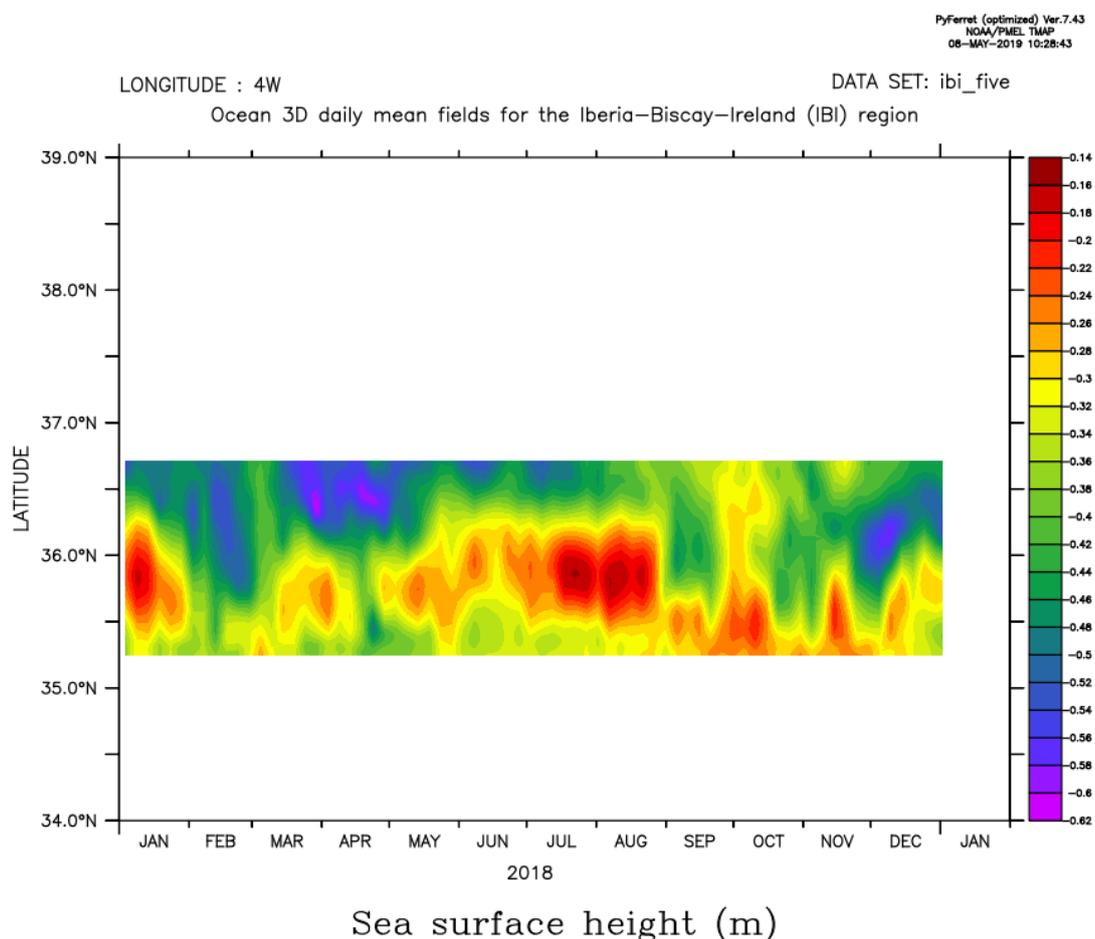


Рисунок 3.7 – Диаграмма Хофмоллера для WAG по данным оперативной системы «The operational IBI Ocean Analysis and Forecasting system»

Из рисунка 3.7 очевидно, что западный вихрь (WAG) был ярко выражен в следующие месяцы 2018 года: январь, июль и август. При этом, весной и осенью вихрь был слабо выражен и отсутствовал в феврале. Что касается восточного вихря (EAG) как следует из рисунка 3.8, то его присутствие отмечалось в марте, апреле, в ноябре и с июля по сентябрь 2018 года. В конце октября EAG ослабевал, а с середины января по середину



регионального домена Mediterranean Sea.

Итак, было рассмотрено поведение западного вихря WAG. Из рисунка 3.9 видно, что эти данные не отражают картину так детально, как система ИВІ. Присутствие западного вихря WAG отмечалось только в январе и в поздней осени. Отметим, что с мая по октябрь WAG присутствовал, но он обладал слабо выраженным характером. Весной вихрь также проявлялся слабо, предположительно, полностью отсутствовал с середины апреля до середины мая. Ближе к зиме проявление WAG опять становилось слабым.

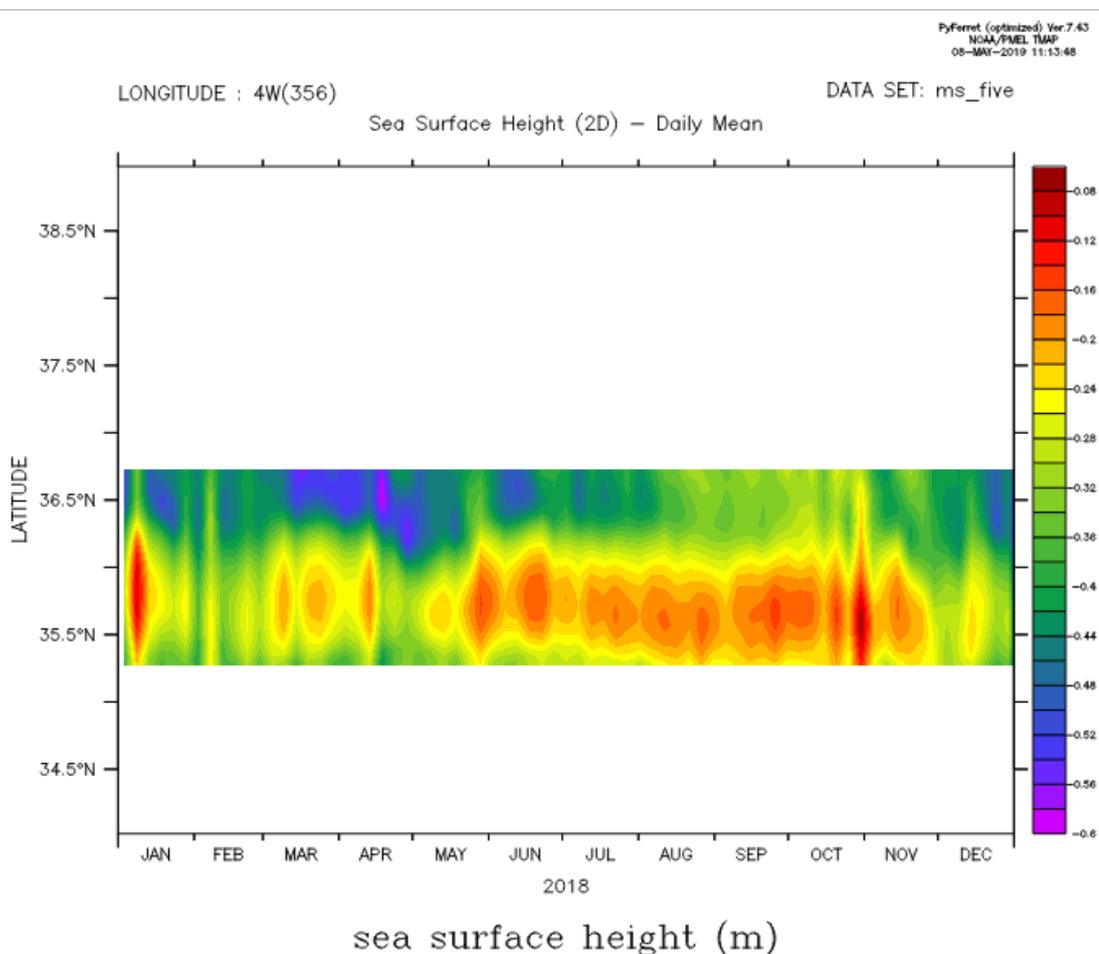


Рисунок 3.9 – Диаграмма Хофмоллера для WAG по данным оперативной системы «Mediterranean Forecasting System»

Восточный вихрь EAG в Алборанском море (см. рисунок 3.10) ярко выражен в январе и поздней осени. И также был выражен с июня по

сентябрь с максимумом в августе 2018 года. Отмечалось присутствие EAG весной.

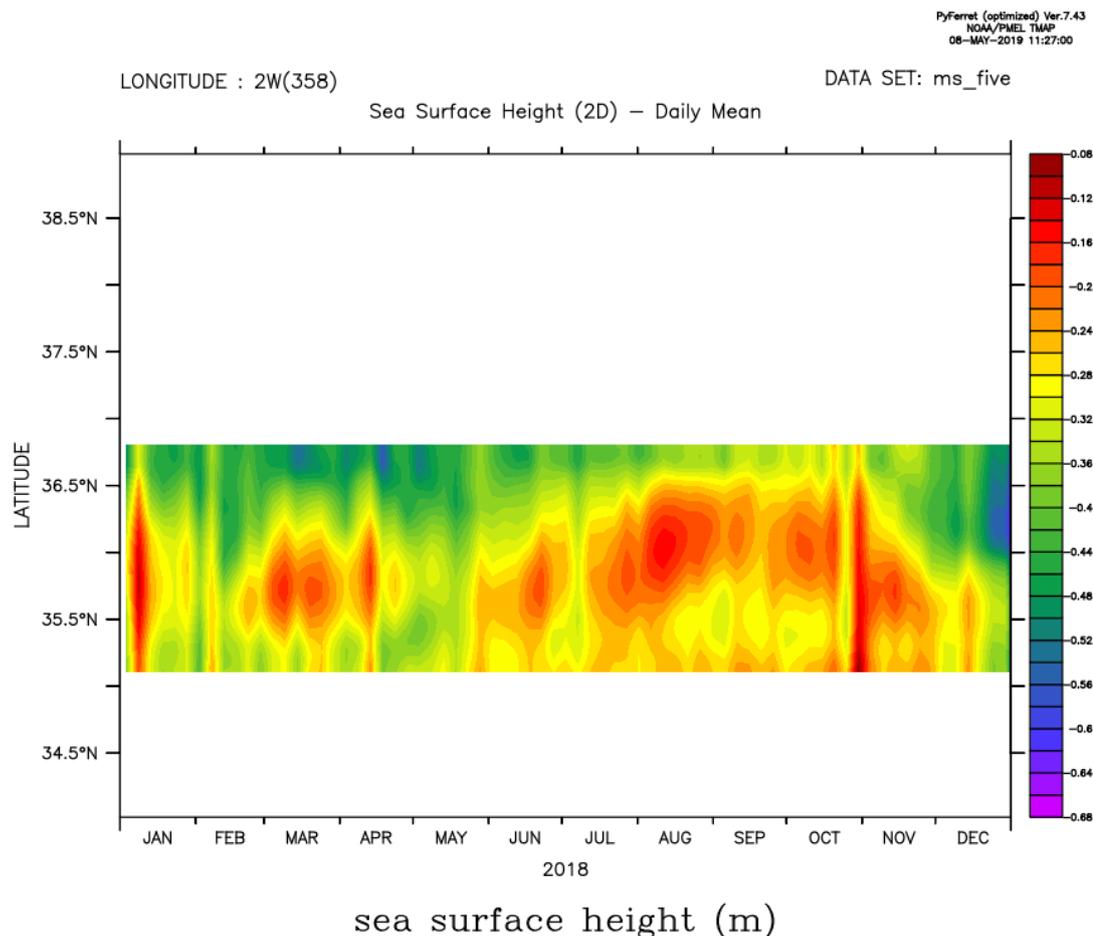


Рисунок 3.10 – Диаграмма Хофмоллера для EAG по данным оперативной системы «Mediterranean Forecasting System»

При сравнении расположения обеих вихрей, по данным оперативной системы «Mediterranean Forecasting System», получилось, что WAG и EAG присутствовали в один и тот же период, т.е. по данным этой оперативной системы выходит, что, в течение всего периода исследования, практически всегда присутствовала двухвихревая структура циркуляции.

При сравнении данных двух оперативных систем, выяснили, что модели показали разные результаты. В связи с этим, было принято решение проверить модельные данные оперативных океанологических систем с данными спутниковой альтиметрии, и проделать, используя тот же самый

алгоритм построения диаграмм Хофмоллера.

### 3.5 Диаграммы Хофмоллера для WAG и EAG по данным спутниковой альтиметрии

Данные спутниковой альтиметрии были получены с сайта AVISO+. Использовались данные абсолютной динамической топографии. Одним из недостатков использованных спутниковых данных является то, что они неполные и охватывают период только до конца сентября 2018 года.

Результаты построения диаграмм Хофмоллера с использованием данных абсолютной динамической топографии ADT представлены на рисунках 3.11 и 3.12. Двухвихревая структура моря Альборан по данным альтиметрии в рассматриваемый период проявлялась в летний сезон, преимущественно в августе и начале сентября 2018 года.

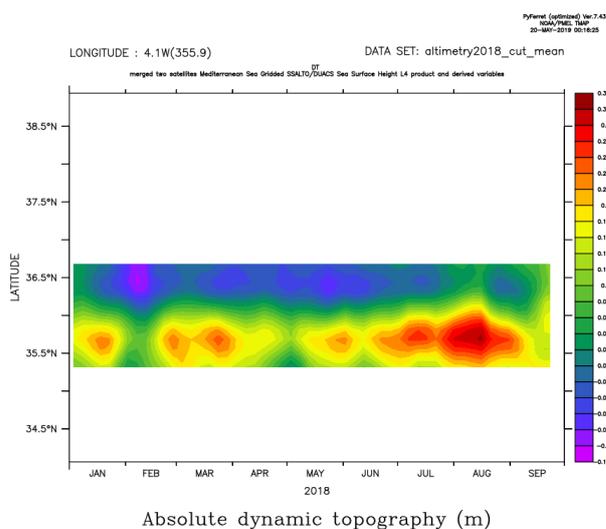


Рисунок 3.11 – Диаграмма Хофмоллера для WAG согласно данным альтиметрии

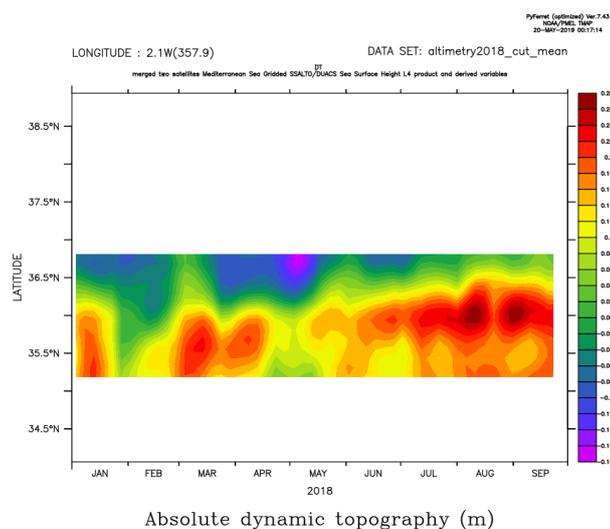


Рисунок 3.12 – Диаграмма Хофмоллера для EAG согласно данным альтиметрии

При сравнении диаграмм Хофмоллера для модельных данных SHH с данными абсолютной динамической топографии ADT при совпадении общих тенденций отмечены некоторые различия. Совпадение между натурными спутниковыми данными и данными ИВІ оказалось лучше по сравнению с данными системы MS. Модельные данные ИВІ достаточно хорошо совпадают с наблюдениям. Что касается данных системы Mediterranean Forecasting System, то визуально видно, что проявления антициклонической активности различны. Таким образом, в целом можно сделать вывод, что данные полученные с помощью данных различных систем оперативной океанологии могут быть использованы для анализа динамической структуры поверхностных течений в море Альборан. Полученные результаты соответствуют натурным условиям и позволяют проследить динамику вихреобразования и пространственно-временную изменчивость поля скорости в поверхностном слое моря Альборан. Причем при анализе некоторое предпочтение следует отдавать выводам, полученным с помощью гидродинамической модели, используемой в оперативной системе ИВІ.

## Заключение

На основе проведенного исследования можно сделать следующие выводы:

1. Проведен литературный обзор имеющихся статей и публикаций по исследованиям процессов циркуляции вод в западной части Средиземного моря. На основании этого обзора был получен ряд обобщающих выводов, которые формируют общее представление об особенностях циркуляции в исследуемом регионе:

— В море Алборан наблюдается и годовая и межгодовая изменчивость циркуляции и связана она с Атлантическим потоком через Гибралтарский пролив.

— Проявляется изменчивость циркуляции во времени: как при сезонных, так и на более коротких временных масштабах.

— Метеорологический форсинг, в частности, направление и интенсивность ветра над Гибралтарским проливом, а также атмосферное давление над Средиземным морем, оказывает влияние на присутствие или отсутствие двухвихревой системы циркуляции в море Альборан.

2. При предварительном анализе и сравнении внутригодовой изменчивости среднего по площади уровня, полученного с использованием региональных океанологических оперативных систем «Mediterranean Forecasting System» и «The operational IBI Ocean Analysis and Forecasting system» было выявлено, что, в целом, модели правильно воспроизводят основные черты сезонного изменения уровня.. Однако, между результатами, полученных с помощью разных моделей, имеются очевидные различия. Сглаживание рядов путем проведения процедуры скользящего среднего улучшило совпадение. Более того, было выдвинуто предположение о том, что модель MS позволяет воспроизводить процессы мезомасштабного

характера, тогда как модель IVI более подходит для воспроизведения процессов сезонной и межгодовой изменчивости.

3. При анализе формирования поля скорости течений в верхнем слое моря Альборан (западная часть Средиземного моря) выяснилось, что непосредственное (влекущее) воздействие ветра слабо влияет на формирование вихрей. Однако опосредованная роль ветрового воздействия, связанная с изменением притока атлантической воды через Гибралтарский пролив и, как следствие, усиление или ослабление бароклинности является весьма существенной.

4. По данным 2018 года впервые проанализирована пространственно-временная изменчивость вихревых структур в западной части Средиземного моря, включая зону Гибралтарского пролива на основе совмещенных полей скорости поверхностных течений и поля уровня. На этом этапе был предложен механизм формирования завихренности поля скорости поверхностного течения в море Альборан. Интенсивность западного антициклонического вихря будет определяться интенсивность поступления атлантической воды. При ослаблении Атлантическая струя будет отклоняться к югу, способствуя формированию WAG и усилению циклонической циркуляции, которая в свою очередь будет вытеснять восточный антициклонический вихрь. При усилении Атлантической струи, она будет отклоняться к северу, приводить к смещению циклонического вихря к побережью Испании, тем самым уменьшая его интенсивность, что будет способствовать формированию и сохранению на некоторое время восточного антициклонического вихря.

5. При сравнении диаграмм Хофмоллера для модельных данных о рельефе свободной поверхности SHH с данными абсолютной динамической топографии ADT, при совпадении общих тенденций, отмечены некоторые различия. Совпадение между натурными спутниковыми данными и данными IVI оказалось лучше по сравнению с данными системы MS. Модельные данные IVI достаточно хорошо совпадают с наблюдениям.

В результате, можно сделать вывод, что данные полученные с помощью различных систем оперативной океанографии могут быть использованы для анализа динамической структуры поверхностных течений в море Альборан. Полученные результаты соответствуют натурным условиям и позволяют проследить динамику вихреобразования и пространственно-временную изменчивость поля скорости в поверхностном слое моря Альборан. Причем при анализе некоторое предпочтение следует отдавать выводам, полученным с помощью гидродинамической модели, используемой в оперативной системе ИВІ.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

- 1 Millot C. Another description of the Mediterranean Sea outflow. *Progress in Oceanography*. 2009, 82(2), 101—124 p.
- 2 Speich S., Madec G., Crepon M. A strait outflow circulation process study: the case of the Alboran Sea. *Journal of Physical Oceanography*. 1996, 26(3), 320—340
- 3 Viúdez A., Pinot J. M., Haney R. L. On the upper layer circulation in the Alboran Sea. *Journal of Geophysical Research*. 1998, 103(C10), 21653—21666.
- 4 Peliz A., Boutov D., Teles-Machado A. The Alboran Sea mesoscale in a long term high resolution simulation: statistical analysis. *Ocean Model*. 2013, 72, 32—52
- 5 Средиземное море // *Моря и океаны* [Электронный ресурс] URL: <http://oceangid.blogspot.ru/2013/04/sredizemnoe-more.html> (дата обращения: 7.12.2017).
- 6 Robinson A.R, Leslie W *Mediterranean Sea Circulation* // *Ocean Currents*. - 2001. - №12. - С. 1-19.
- 7 *Mediterranean Sea* // *ENCYCLOPÆDIA BRITANNICA* [Электронный ресурс] URL: <https://www.britannica.com/place/Mediterranean-Sea> (дата обращения: 25.04.2019).
- 8 Дастис К., Искуердо А., Бруно М., Рейес Э., Софьина Е. В., Плинк Н. Л. Влияние флуктуаций атмосферного давления над Лигурийским морем на мезомасштабную динамику вод в Гибралтарском проливе и море Альборан // *Фундаментальная и прикладная гидрофизика*. 2018. Т. 11, № 1. С. 28—39.
9. Характеристика Средиземного моря // *earth06.narod.ru* URL: [http://earth06.narod.ru/a\\_ocean/6-2.htm](http://earth06.narod.ru/a_ocean/6-2.htm) (дата обращения: 19.11.2017).
10. Морозов Е.Г Внутренние приливы и течения в Гибралтарском и Бабель-Мандебском проливах // *Фундаментальная и Прикладная Гидрофизика*. -

2015. - №3. - C. 80-84.

11. Muench R.D. WMCE Western Mediterranean Circulation Experiment: A Preliminary Review of Results // *The Oceanography Report*. - 1989. - №31. - pp. 10-15.
12. Lacombe, H., and C. Richez, The regime of the Strait of Gibraltar, in *The Hydrodynamics of Semi-Enclosed Seas*, edited by J. C.J. Nihoul, pp. 13-73, Elsevier, New York, 1982.
13. Candela, J., C. D. Winant, and H. Bryden, Notes on the baroclinic tide in the Strait of Gibraltar, WMCE special issue, /. *Geophys. Res.*, in press, 1989a.
14. Borman, M., C. Garrett, and K. R. Thompson, Seasonal variability of the surface inflow through the Strait of Gibraltar, *Oceanol. Acta*, 9, 403, 1986.
15. M. Vargas-Yáñez et al., About the seasonal variability of the Alboran Sea circulation / *Journal of Marine Systems* 35 (2002), pp. 229–248
16. Farmer D. M., Armi L. The flow of Atlantic water through the Strait of Gibraltar. *Progress in Oceanography*. 1988, 21, 1—105.
17. Bryden H. L., Kinder T. H. Steady two-layer exchange through the Strait of Gibraltar. *Deep Sea Research Part A. Oceanographic Research Papers*. 1991, 38, S445—S463.
18. Tsimplis M. N., Bryden H. L. Estimation of the transports through the Strait of Gibraltar. *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers*. 2000, 47(12), 2219—2242.
19. Heburn , G., and P. E. La Violette, Related variations in the structure of the anticyclonic gyres found in the Alboran Sea, WMCEspecial issue,/. *Geophys. Res.*, in press, 1989.
20. Perkins, H., T. Kinder, and P. E. La Violette, The Mediterranean inflow, WMCE special issue,/. *Geophys. Res.*, in press, 1989.
21. Heburn, G., and P. E. La Violette, Related variations in the structure of the anticyclonic gyres found in the Alboran Sea, WMCE special issue,/. *Geophys. Res.*, in press, 1989
22. Lanoix, F., 1974. *Projet Alboran. Etude hydrologique et dynamique de la*

Mer d'Alboran. NATO Tech. Rep. 66. Brussels, 39 pp.

23. Cano, N., 1977. Resultados de la campaña Alborán 73. Bol. Inst.Esp. Oceanogr. Tomo I, 103 – 176.

24. Cano, N., 1978. Resultados de la campaña Alborán 76. Bol. Inst.Esp. Oceanogr., 3 – 50.

25. Cano, N., Gil, J., 1984. Campaña hidrográfica Alborán 78. Bol. Inst.Esp. Oceanogr. 1 (2), 114 – 125.

26. Cheney, R.E., Doblar, R.A., 1982. Structure and variability of the Alborán Sea frontal system. J. Geophys. Res. 87 (C1), 585 – 594.

27. Crepon, M., 1965. Influence de la pression atmospherique sur le niveau moyen de la Mediterranee Occidentale et sur le flux atravers le detroit de Gibraltar. Cah. Oceanogr. 1 (7), 15 – 32.

28. Parrilla, G., 1984. Mar de Alborán . Situación del giro anticiclónico en Abril de 1980. Bol. Inst. Esp. Oceanogr. 1 (2), 106 – 113.

29. Perkins, H., Kinder, T.H., La Violette, P.E., 1990. The Atlantic inflow in the northwestern Alborán Sea. J. Phys. Oceanogr. 20,242 – 263.

30. Lafuente, J.G., Cano, N., Vargas, M., Rubín, J.P., Hernández-Guerra, A.,1998. Evolution of the Alborán Sea hydrographic structures during July 1993. Deep-Sea Res. 45 (1), 39 – 65.

31. Heburn, G.W., La Violette, P.E., 1990. Variations in the structure of the anticyclonic gyres found in the Alborán Sea . J. Geophys. Res. 95 (C2), 1599 – 1613.

32. Ovchinnikov, I.M., 1974. On the water balance of the Mediterranean Sea. Oceanology 14, 198 – 202.

33. Parada, M., Canto'n, M., 1998a. Sea surface temperature variability in the Alborán Sea from satellite data. Int. J. Remote Sens. 19 (13), 2439 – 2450.

34. García-Grriz, E., Carr, M., 1999. The climatological annual cycle of satellite-derived phytoplankton pigments in the Alboran Sea. Geophys. Res. Lett. 26 (19), 2985 – 2988.

35. Vázquez-Cuervo, J., Font, J., Martínez-Benjamin, J.J., 1996. Observations

on the circulation in the Alboran Sea using ERSI altimetry and sea surface temperature data. *J. Phys. Oceanogr.* 26 (8), 1426 – 1439.

36. Bormans, M., Garrett, C., 1989. A simple criterion for gyre formation by the surface outflow from a strait, with application to the Alboran Sea. *J. Geophys. Res.* 94 (C9), 12637 – 12644.

37. ABOUT YOUR COPERNICUS MARINE SERVICE // Copernicus. The European Earth Observation Programme [Электронный ресурс] URL: <http://marine.copernicus.eu/about-us/about-your-copernicus-marine-service/> (дата обращения: 28.04 2019)

38. PRODUCT USER MANUAL For Mediterranean Sea Physical Analysis and Forecasting Product [Электронный ресурс] // URL: <http://resources.marine.copernicus.eu/documents/PUM/CMEMS-MED-PUM-006-013.pdf> (дата обращения: 15.04.2019).

39. Quality information document. Mediterranean Sea Production Centre [Электронный ресурс] // URL: <http://resources.marine.copernicus.eu/documents/QUID/CMEMS-MED-QUID-006-013.pdf> (дата обращения: 16.04.2019).

40. PRODUCT USER MANUAL Atlantic -Iberian Biscay Irish- Ocean Physics Analysis and Forecast Product [Электронный ресурс] // URL: <http://resources.marine.copernicus.eu/documents/PUM/CMEMS-IBI-PUM-005-001.pdf> (дата обращения: 29.04.2019).

41. Quality information document. Atlantic -Iberian Biscay Irish- IBI Production Centre [Электронный ресурс] // URL: <http://resources.marine.copernicus.eu/documents/QUID/CMEMS-IBI-QUID-005-001.pdf> (дата обращения: 30.04.2019).

42. Descripción del Sistema // Puertos del Estado [Электронный ресурс] // URL: <http://www.puertos.es/es-es/oceanografia/Paginas/Intro---FAQ.aspx> (дата обращения: 05.05.2019).

43. SEA SURFACE HEIGHT PRODUCTS // AVISO+ Satellite Altimetry data [Электронный ресурс] URL: <https://www.aviso.altimetry.fr/en/data/products/sea->

surface-height-products.html (дата обращения: 04.04.2019).

44. Climate Data Operators // Max-Planck-Institut für Meteorologie (MPI-M) [Электронный ресурс] URL: <https://code.mpimet.mpg.de/projects/cdo> (дата обращения: 15.03.2019).

45. Ncview: a netCDF visual browser // Climate Research Division URL: [http://meteora.ucsd.edu/~pierce/ncview\\_home\\_page.html](http://meteora.ucsd.edu/~pierce/ncview_home_page.html) (дата обращения: 10.03.2019).

46. Ferret User's Guide // Ferret Support [Электронный ресурс] URL: <https://ferret.pmel.noaa.gov/Ferret/documentation/users-guide> (дата обращения: 15.03.2019).

47. Исследование многолетней изменчивости концентрации хлорофилла «а» на примере создания диаграммы Новмоллер для Каспийского моря по данным SeaWIFS // Межуниверситетский аэрокосмический центр при Географическом факультете МГУ им. М.В. Ломоносова URL: [http://www.geogr.msu.ru/science/aero/center/int\\_sem7/2.3%20Novmoller.htm](http://www.geogr.msu.ru/science/aero/center/int_sem7/2.3%20Novmoller.htm) (дата обращения: 27.02.2019).

48. Novmöller Diagram: A climate scientist's best friend // NOAA Climate.gov URL: <https://www.climate.gov/news-features/understanding-climate/hovmöller-diagram-climate-scientist's-best-friend> (дата обращения: 15.02.2019).

49. Novmöller, E. (1949), The Trough-and-Ridge diagram. *Tellus*, 1: 62–66

50. Elias A.R // Estimating the Size of the Levantine East Mediterranean Hydrocarbon Basin. Leban: Lebanese University, 2016.