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

Кафедра прикладной океанографии ЮНЕСКО-МОК и охраны природных вод

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА

(магистерская диссертация)

На тему Колебания уровня моря у Атлантического побережья Пиренейского полуострова

Исполнитель Жарова Александра Дмитриевна Руководитель кандидат географических наук, доцент Гордеева Светлана Михайловна

«К защите допускаю» Заведующий кафедрой

кандидат физ.-мат. наук, доцент, Ерёмина Татьяна Рэмовна

«ОД» ОС 20/8 г.

Санкт–Петербург 2018

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

Кафедра прикладной океанографии ЮНЕСКО-МОК и охраны природных вод

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА

(магистерская диссертация)

На тему Колебания уровня моря у Атлантического побережья Пиренейского полуострова

Исполнитель Жарова Александра Дмитриевна Руководитель кандидат географических наук, доцент Гордеева Светлана Михайловна

«К защите допускаю» Заведующий кафедрой

> кандидат физ.-мат. наук, доцент, Ерёмина Татьяна Рэмовна

«<u>»</u>____20_г.

Санкт–Петербург 2018

СОДЕРЖАНИЕ

		Стр.
	Сокращения	4
	Введение	5
1	Уровень моря	8
1.1	Распределения экстремальных значений	9
2	Физико-географическая и океанологическая характеристики	
	исследуемого района	11
2.1	Географическое положение исследуемого района	11
2.2	Кадиссикй залив	12
2.2.1	Атмосферный режим, ветровые поля и волнение	13
2.2.2	Общая динамика вод	16
2.2.3	Приливы	18
2.3	Северное побережье Пиренейского полуострова	18
2.3.1	Циркуляция на шельфе и континентальном склоне	20
2.3.2	Приливы	20
2.4	Исследования уровня моря проводимые в регионе исследования	21
2.4.1	Кадисский залив	21
2.4.2	Северное побережье Пиренейского полуострова	23
3	Материалы и методы	30
3.1	Материалы	30
3.1.1	Данные мареографов	30
3.1.2	Основные характеристики модели GLOBAL-REANALYSIS-PHY-	
	001-025	34
3.1.3	Основные характеристики модели ATLANTIC-IBERIAN BISCAY	
	IRISH- OCEAN PHYSICS REANALYSIS	37
3.2	Расчет эмпирических вероятностей превышения	39
3.2.1	Методика расчета, используемая в данной работе	39

3.3	Подготовка исходных данных	41		
4	Результаты работы	45		
4.1	Сопоставление исходных среднесуточных рядов мареографов и			
	моделей	45		
4.2	Сопоставление рядов отклонений максимумов мареографов и			
	моделей и их распределений Гумбеля	51		
4.3	Распределение Гумбеля для рядов различной дискретности	62		
	Заключение	68		
	Список использованных источников	70		
	Приложение А «Нахождение максимума»			
	Приложение Б «Уравнения трендов исходных среднесуточных			
	данных»			
	Приложение В «Функции распределения Гумбеля для месячных			
	максимумов, полученных по данным разной дискретности»			

СОКРАЩЕНИЯ

САК	—	Североатлантическое колебание
IPC	_	Iberian Poleward Current
SW	_	Ветер юго-западного направления
SE	_	Ветер юго-восточного направления
WSW	_	Ветер направления запад-юго-запад
NW	_	Ветер северо-западного направления
IGN	_	Национальный географический институт
NMMA	_	Nivel Medio del Mar en Alicante
NEMO	_	Nucelus for European Models of the Ocean
MDT	_	Mean Dynamic Topography
IBI	_	IBERIAN BISCAY IRISH Region

ВВЕДЕНИЕ

В целом измерения и исследования уровня моря – это важная задача из-за многочисленных прикладных аспектов: определение опорного уровня в наземной и морской картографии, морской навигации, портовых работ. Кроме того, увеличение населения и рост городов в прибрежных зонах требует хорошего знания местного поведения уровня моря, которое позволит осуществлять хорошее управление побережьем, чтобы избежать рисков для населения и инфраструктуры.

Атлантическое побережье Пиренейского полуострова является довольно протяженным, с большим количеством прибрежных населенных пунктов и портов, и для данного региона вопрос исследования уровня является актуальным. На изменение уровня моря в данном регионе влияют три основных фактора: атмосферное давление (эффект обратного барометра) и ветровые нагоны, так как данный регион подвержен влиянию Североатлантического колебания (САК), а также приливные течения. Так в некоторых регионах высота приливов могут достигать до 5 м.

Ярким примером подъёма уровня на побережье является недавний разрушительный подъем уровня на побережье Андалусии, вызванный штормом Эмма. Ущерб от данного явления превышает 100 000 евро [1].





Рисунок 1 – Разрушения, вызванные ураганом Эмма на набережной г. Кадис (провинция Андалусия) сверху и затопление набережной (снизу) в марте 2018 года [1]

В связи с такими разрушительными последствиями подъемов уровня моря у побережья актуальной задачей является оценка максимально возможных уровней моря различной повторяемости для обеспечения эффективного прибрежного управления, в частности для прибрежного строительства.

Целью данной работы являлось: оценить максимально возможные уровни моря на Атлантическом побережье Пиренейского полуострова и дать оценку возможности применения модельных данных для оценки распределения экстремальных значений уровня моря.

Идея сопоставления модельных данных с данными мареографов возникла в связи с тем, что не всё побережье равномерно освещено мареографными данными об уровне моря, также в данных имеются пропуски, вызванные различными причинами (например, поломкой оборудования, заменой датчиков, перенесением измерительного поста на новое место и т.д.), а модельные данные предоставляют возможность получить данные с маленьким пространственным разрешением, от 1/12°, и регулярными данными по времени.

Для достижения данной цели решались следующие задачи:

 изучение физико-географических и океанологических особенностей исследуемого региона;

- изучение ранее проведенных исследований уровня моря в регионе исследования;

- отбор и подготовка к расчётам исходных данных;

- расчет функций распределения Гумбеля для оценки максимально возможных уровней различной вероятности по двум типам данных: по данным мареографов и по данным моделей реанализа;

- сопоставление наборов данных мареографов и модельных данных по дисперсии, спектральной структуре и тесноте линейной связа, а также сопоставление полученных по ним функций распределения Гумбеля и максимальных уровней различной вероятности;

- получение максимальных значений уровня моря различной вероятности наступления в исследуемом регионе.

1 Уровень моря

Поверхность уровня моря не является фиксированной, она претерпевает изменения в уровне в результате приливных явлений, вариации атмосферного давления и ветра, а также волн и завихренностей, связанных с изменениями ветра и давлении; а также в результате изменения объема океанов, связанное с изменением плотности воды, таянием континентальных ледников и полярных ледяных шапок и локальными подъемами за счет стока рек. На уровень также влияют тектонические движения. Однако, уровень моря, измеренный относительно суши X(t), в основном зависит от влияния приливов и атмосферного воздействия во временных масштабах от нескольких часов до нескольких лет. В общем виде уровень моря можно представить выражением [2]:

$$X(t) = Z_0(t) + T(t) + S(t)$$
(1.1)

где $Z_0(t)$ – средний уровень моря, медленно меняющийся со временем,

- T (t) вариации из-за астрономических приливов,
- S (t) остаточная составляющая, в основном связанная с метеорологическими возмущениями.

В [3] дается следующее определение уровня моря – это «...высота поверхности моря, свободную от влияния ветровых волн и волн зыби, измеренную относительно условного горизонта. При этом в качестве уровенной поверхности используют поверхность морей и океанов, нормальную к направлению силы тяжести. В качестве условного горизонта можно использовать или так называемый нуль поста (условная постоянная для данного уровенного поста поверхность, от которой отсчитываются уровни моря), или единый нуль постов моря (единая условная поверхность, от которой производится отсчет уровня моря на всех уровенных постах данного моря или ряда морей)».

Один из актуальных вопросов – это определение экстремальных уровней моря. Так, при проектировании морских гидротехнических сооружений

определение максимальных высот уровня моря малых вероятностей превышения имеет первостепенное значение. В зависимости от выбранных проектных отметок может варьироваться объем работ, а, следовательно, и стоимость строительства. Также волны, течения и лед оказывают динамическое воздействие на берег и прибрежные сооружения, в связи с чем необходимо выбирать оптимальную удаленность от береговой черты для прибрежных сооружений. Данные о минимальных уровнях в первую очередь важны для судоходства и строительства атомных электростанций, которые производят забор воды для охлаждения реакторов и водозабор никогда не должен осушаться [4].

Однако следует иметь в виду, что поведение уровня моря на побережье варьируется от одного сезона к другому как следствие локальных факторов, таких как различное воздействие ветра на побережье в зависимости от его ориентации, усиление волн в зависимости от батиметрии и характеристик бассейна, а также важны наземные вертикальные движения (тектонические движения), которые маскируют абсолютные колебания уровня моря [5].

Различные метеорологические явления, такие как штормы, тропические высокое атмосферное давление (эффект обратного циклоны, ураганы, барометра), могут вызывать затопление прибрежной зоны, в особенности, когда данные явления совпадают с астрономическим приливом. Для уязвимых районов знание диапазонов изменения уровня моря и конечной статистики является основополагающим для проектирования портовых работ в целом, а управления побережьем С уделением особого также для внимания предотвращению наводнений [5].

1.1 Распределения экстремальных значений

Статистическая теория экстремальных значений была разработана в трудах как советских, так и зарубежных математиков (Б.В. Гнеденко, Н.В. Смирнов, М. Фреше, Р. Фишер, Э. Гумбел и др.).

Основа статистики экстремальных значений – двойной показательный закон:

$$\mathbf{P} = \mathbf{e}^{-\mathbf{e}^{-\mathbf{y}}}$$

(1.2)

где Р – функция распределения,

у – вспомогательная или приведенная переменная
экстремальных значений.

Вспомогательная или приведенная переменная экстремальных значений *у* связана определенным образом с исследуемой статистической переменной *х*.

Двойной показательный закон может быть представлен в виде трех предельных распределений экстремумов, отличающихся друг от друга характером свиязи между переменной *у* и статистической переменной *х*. Данные распределения используются для аппроксимации и экстраполяции эмпирических функций распределения. Теоретические функции распределения максимумов выражаются следующим образом:

$$P(x) = exp\left[-e^{-\alpha(x-u)}\right], \qquad \alpha > 0, u > 0, -\infty < x < \infty$$
(1.3)

$$P(x) = exp[-(\frac{v-\varepsilon}{x-\varepsilon})^k], \qquad v > \varepsilon, k > 0, x \ge \varepsilon$$
(1.4)

$$P(x) = exp[-(\frac{w-x}{w-v})^{k}], \qquad w > v, k > 0, x \le w$$
(1.5)

где *а* и *и* – параметры первого предельного распределения,

k, v, w и є – параметры второго и третьего предельных распределений.

Первое распределение (1.3) носит название распределения Гумбеля. Оно неограниченно, что означаете, что экстремальные значения могут достигать любых значений. Второй распределение (1.4) – распределение Фреше, а третье (1.5) – распределение Ваейбула. Два последних распределения являются органичными. Распределение Фреше ограничено снизу, а распределение

Вейбула – сверху. Распределения (1.4) и (1.5) получают оно из другого при имении знака случайно величины [4].

2 Физико-географическая и океанологическая характеристики исследуемого района

Как говорилось в 1 главе, на изменения уровня моря в различных масштабах времени влияют приливные течения, изменения атмосферного давления и ветровой режим. В связи с этим в качестве основных аспектов физико-географического и океанологического описания исследуемого района в данной главе будут кратко рассмотрены именно эти характеристики региона.

2.1 Географическое положение исследуемого района

Пиренейский полуостров расположен в юго-западной Европе. Он окружен Средиземным морем и Атлантическим океаном и соединяется с остальным европейским континентом на северо-востоке. Пиренейский полуостров имеет протяженную береговую линию – 2825 км, из которых 1675 км – это побережье Атлантического океана [6].

Иберийский полуостров расположен в средних широтах в зоне влияния полярного фронта, который отделяет полярные воздушные массы И субтропические воздушные массы. Таким образом, традиционно было признано, что Атлантический Иберийский континентальный шельф находится под влиянием двух великих океанских круговоротов, между которыми он которые определяют общую циркуляцию в Северной расположен, и, Атлантике, а именно это: подполярный круговорот, который располагается примерно между 45° и 65° с.ш., создаваемый системой низкого давления Исландии, и субтропический круговорот, который простирается от 10° до 40° с.ш. и генерируется антициклонической системой Азорских островов. Аналогичным образом, местоположение Пиренейского полуострова на крайнем западе европейского континента означает, что влияние континента имеет важное значение, и традиционно было описано, что атмосферная изменчивость зимой и весной является ответом на развитие термического антициклона,

образующегося при охлаждении на Европейский континент и его ослабление весной [5].



2.1 – Пиренейский полуостров

В данной работе рассматривается Атлантическое побережье Испании, а именно Кадисский залив и северо-западное побережье Испании. Далее будут рассмотрены физико-географические и океанологические характеристики этих двух подрайонов.

2.2 Кадиссикй залив

Кадисский залив географически расположен в северо-восточной части Атлантического океана.

Кадисский залив - это суббассейн в Северной Атлантике, недалеко от Гибралтарского пролива, характеризующийся широким континентальным шельфом. Его северные, восточные и южные пределы четко определены югозападными побережьями Пиренейского полуострова, Гибралтарским проливом и Атлантическим побережьем Марокко соответственно. На Атлантическом побережье наиболее важными географическими объектами являются мыс Санта-Мария, мыс Сан-Висенте и мыс Трафальгар. К востоку от мыса Санта-Мария, континентальный шельф очень широкий (30-50 км) и имеет гладкий склон. На западе платформа более узкая (<15 км), а ее днища характеризуются наличием многочисленных подводных каньонов (Фаро, Портимао, Сан-Висенте и т. д.) [7].



2.2 расположение Кадисского залива [8]

2.2.1 Атмосферный режим, ветровые поля и волнение

Южноатлантический атмосферный раздел расположен В средних широтах, а это означает, что преобладающие ветры зарождаются в северозападном секторе и имеют определенную сезонность. Летом южная (меридиональная) компонента ветра является причиной летнего авеллинга на атлантическом побережье полуострова. Из-за повышения температуры воздуха к северу от Африканского континента устанавливается низкое давление, которое в течение этого сезона генерирует восточные ветры в море Альборан, Гибралтарском проливе и в меньшей степени в Кадисском заливе. Из-за орографии Гибралтарского пролива ветер в основном восточные и западные,

восточные ветры преобладают летом и западные зимой. Гидрологические и динамические изменения, связанные со сменой ветров, происходят в небольших временных масштабах. Восточные ветры генерируют прибрежный апвеллинг в районе португальского Алгарве и струю холодной воды, расположенную у мыса Санта-Мария, которая отклоняется на юго-восток, оставляя на своем пути через континентальный склон холодный след, который называется «фронт Уэльвы».

С другой стороны, возвышения создают противоположные эффекты, наиболее заметным из которых является усиление прибрежного противотечения, который несет воды, транспортиртирующие значительно более теплые воды. Если восточные ветры сохраняются, противотечение не только вторгается в континентальный шельф португальского Алгарве, но также распространяется на десятки километров к северу вдоль атлантического полуострова.

Изменения размера и положения Азорского максимума будут влиять на сезонные колебания, что, в свою очередь, сказывается на циркуляции в Северной Атлантике. Зимой Азорский максимум расположен на юге и благоприятствует ветрам западной четверти на Атлантическом побережье Иберийского полуострова. В то время как летом он движется на север, вызывая северные ветры, которые генерируют сезонный апвеллинг вдоль галисийскопортугальского побережья. Холодная полоса апвеллинга, которая начинается в Галиции и заканчивается в Мавритании, прерывается Кадисским заливом, который сохраняет высокую температуру в летний период.

Эта сезонная закономерность благоприятствует поверхностной антициклонической циркуляции во внешней части Кадисского залива в весенний и летний месяцы, в то время как смещение антициклона к югу зимой вытесняет Азорское течение и способствует циклонической циркуляции поверхностных вод в Кадисском заливе. Хотя эти инверсии и не очень часты, они наблюдались в зимние месяцы [8].

Далее будет рассмотрена более подробна циркуляция вод, связанная не только с направлением ветра.

Что касается волнения, то наиболее частые волны (70%) имеют западное направление (с наибольшей частотой (70%) наблюдаются волны с западными направлениями), с преобладанием направления 270° (28%). Другим значимым направлением является SE (135 °) с частотой 15%. Однако наибольшие волны поступают из WSW, при этом 1% от общего объема имеют волны высотой более 3 м. Роза волнения представляет собой высоту и направление волн, связанные с их вероятностью возникновения. На рисунке 2.3 представлена роза волнения для Кадисского залива.



Рисунок 2.3 – Роза волнения. Совместное распределение значительной высоты по отношению к направлению [8]

Наиболее частые значительные высоты волн составляют от 0,5 м до 1 м, причем 70% времени - это волны менее 1,5 м. Распределение периодов является бимодальным, с 40% между 9-10 с и 45% между 5-7 с (рис. 2.4).



Рисунок 2.4 – Волнение. Совместное распределение пикового периода и значительной высоты волны в Кадиском заливе в течение периода с августа 1996 года по декабрь 2006 года [8]

Согласно анализу экстремальных значений, за период 20 лет оценка высоты значимой волны составляет 6.66 м, с волнами до 7.54 (верхняя полоса 90%) [8].

2.2.2 Общая динамика вод

Океанографическая система юго-запада Пиренейского полуострова ("Eastern охватывает северную часть Восточной пограничной системы Boundary Current System", EBCS) Западной Европы и Северной Африки. Морская морфология прибрежных районов В значительной степени обусловливает направления циркуляции. Береговая линия представляет собой резкое изменение у мыса Сан-Висенте (рис. 2.2), где западное и южное побережья сходятся почти под прямым углом. К востоку от мыса есть широкий вход, где происходят очень интенсивные рециркуляции.

В течение большей части года и в весенне-летний период структура циркуляции формируется антициклоническим потоком на склоне в восточном направлении в сторону к Гибралтарскому проливу и перекрестными течениями на шельфе и в открытом океане, образуя циклонные ячейки на шельфе между мысами (между мысом Сан-Висенте и мысом у Гибралтарского пролива) и антициклонической циркуляцией в центре залива (рис. 2.5). Эти ячейки связаны важными обменными процессами в системе шельф-склон-океан. В отношении зимнего режима существует неопределённость в детерминации режима циркуляции, так как за этот период меньшее количество наблюдений.

У западного побережья Пиренейского полуострова также существует сезонное чередование гидрографических полей, потоков и течений с наличием апвеллингов и даунвелингов в прибрежной зоне и на шельфе. Зимой наблюдается распространение на полюс теплого и относительно соленого потока воды, также известный как Иберийское течение к полюсу (Iberian Poleward Current, IPC).



Рисунок 2.5. Схематическое представление основных поверхностных потоков в заливе Кадис [8]

2.2.3 Приливы

Приливы в Кадисском заливе являются полусуточными и включают два отлива и два отлива каждые 24 часа с определенной асимметрией и временной задержкой между последовательными циклами. Средний диапазон приливов варьируется от 2,02 м в Уельве и 2,18 м в Кадисе. Наложенные на полусуточные приливные циклы существуют двухнедельные циклы, которые производят сизигийные приливы каждые две недели, а также 6-месячные циклы, которые производят чрезвычайно высокие равноденственные приливы дважды в год. Теоретический максимальный диапазон приливов в Кадисском заливе в условиях равноденствия весеннего прилива достигнет 3,74 м. На приливные диапазоны можно влиять ветровые и атмосферные давления, которые в Кадисском заливе могут составлять до 50 см сверх астрономического прилива в случае сильных штормов. Во время фаз затопления приливные волновые потоки от Гибралтарского пролива до Айямонте (на испанскопортугальской границе) с временной задержкой между обоими концами в пределах от 30 до 90 мин. Максимальный диапазон приливов колеблется от 3,70 м в Айямонте и 1,58 м в Тарифе (Гибралтарский пролив) [9].

2.3 Северное побережье Пиренейского полуострова

Атлантический регион, который омывает северные берега Пиренейского полуострова, характеризуется тем, что находится в зоне умеренного климата, с учетом явной сезонной изменчивости: с вертикальным перемешиванием вод в зимний период и тенденцией к расслоению в поверхностных водах в течение лета в результате солнечного нагрева [5].

Континентальный шельф в Кантабрийском море, располагающийся в южной части Бискайского залива, является узким и пересекается несколькими глубокими каньонами, что дает ему некоторые специфические особенности, среди которых выделяется интенсивное влияние океана.



Рисунок 2.6 – Северное и западное побережья Пиренейского полуострова



Рисунок 2.7 - Розы ветров для северо-западного побережья Пиренейского полуострова в м/с, усредненных для зимы, весны, лета и осени [5]

В западной части побережья Галиции континентальный шельф является протяжённым. На нем происходит взаимодействие между апвеллингами, циркуляцией эстуариев и погруженными речными долинами, которые функционируют как эффективные преобразователи солнечной энергии в пригодную для использования биомассу в виде рыболовство и моллюски.

Одной из важнейших характеристик области исследования является ее расположение в северной зоне канарейской апвеллинговой системы, которая простирается от северо-западной Африки до северного побережья Иберийского полуострова. Апвеллинг вызван ветровой компонентой, параллельной побережью [5].

2.3.1. Циркуляция на шельфе и континентальном склоне

Система циркуляции на шельфе Галиция-Кантабрия в значительной сезонного ветров, степени зависят OT режима которые определяют существование двух фундаментальных ситуаций: весной / летом ветры первого квадранта генерируют токи на запад, связанные с явлениями прибрежного апвеллинга, который усиливается в западном направлении; и осенью / зимой доминирующие ветры третьего квадранта генерируют поток на восток и заставляют воду накапливаться на побережье. Хотя эти закономерности имеют выраженную сезонность, импульсы апвеллинга зимой и даунвелинга в летнее время часты, так что изменчивость в метеорологическом масштабе очень важна. На рисунке 2.8 иллюстрируется различие поверхностных токов в зависимости от сезона.

2.3.2 Приливы

Также, как и для Кадиского залива, на северном побережье Испании преобладающей гармонической составляющей приливов является М2.

Результаты гармонического анализа показывают, что волна лунной компоненты (M2) распространяется по направлению к северо-востоку (направление возрастающих фаз: Виго, Корунья и Сантандер) с задержкой менее 20 минут от одной станции к следующей, Аналогично, амплитуда этой волны больше в Сантандере, чем в Корунье, и даже больше, чем в Виго, что указывает на то, что амплитуды M2 растут к северо-востоку.

Астронамические приливы могут достигать 4,77, 4.38 и 4.01 м в Сантандере, Корунье и Виго соответственно [5].



Рисунок 2.8 – Розы поверхностных течений зимой (синий цвет) и летом (зеолено-желтый) по данным сети буев, расположенных в Галиции и в Кантабрийском море. Значения в см/с. [5]

2.4 Исследования уровня моря проводимые в регионе исследования

2.4.1 Кадисский залив

Как уже говорилось ранее на уровень моря влияет состояние атмосферы, и это влияние может быть довольно сильным.

Так, например, в исследовании [10] «Влияние атмосферного давления и ветра на изменчивость уровня моря мареографа Бананза (Кадис)» (La influencia de la preción atmosférica y el viento en la variabilidad del nivel del mar en el mareógrafo de Bonanza (Cádiz) сделаны следующие выводы о влиянии атмосферы и ветра на данную станцию: - взаимосвязь между атмосферным давлением и уровнем моря в мареографе Бонанза объясняет около 40% изменчивости уровня, из-за стабильности преобладания определенных синоптических ситуаций. Еще больший процент дисперсии объясняется атмосферным вкладом при ветре квадранта SW, особенно во время продолжительных порывов более 24 часов, тогда объясняется более 55% изменчивости уровня моря атмосферным вкладом;

- величина скорости ветра способна объяснить только 10% изменчивости уровня моря, когда она поступает из третьего квадранта. Только в ситуациях высокой устойчивости в направлении ветра может составлять 25%. Когда ветер дует с компонентами, параллельными побережью (NW или SE), не проявляется никакое влияние на уровень моря.

Мареограф Бонанза расположен в центральной части Кадисского залива, что в принципе позволяет результаты, полученные для конкретного мареографа в общем виде применять ко всему заливу. На рисунке 2.9 представлено местоположение данного мареографа, а также станций на которых получали информацию о ветре (Chipiona) и давлении (Rota).



Рисунок 2.9 – Расположение мареографа Бонанза

Также в исследовании «Региональная изменчивость среднего уровня моря в районе Гибралтарского пролива» (Regional mean sea level variability in the Strait of Gibraltar area) [11] указывается на статистически значимую взаимосвязь уровня моря в данном регионе и индекса Североатлантического колебания атмосферы (САК). Причем взаимосвязь САК и уровня моря проявляется наиболее сильно в зимний период.

2.4.2 Северное побережье Испании

При поддержке института океанографии Испании и министерства науки и исследований было проведено крупномасштабное исследование северного побережья Испании, результаты которого изложены в монографии [5] «Климатические и океанологические изменения в Атлантическом побережье на севере Испании» (Cambio climático y oceanográfico en el Atlántico del norte de España). В том числе проводились и исследования уровня моря.

Для исследования уровня моря в этой работе использовались данные, полученные мареографами за период 67 лет (начиная с 1943 года) на трех станциях, расположенных в портах Сантандера (43° 28'N, 03° 48 'W), Коруньи (43° 22'N, 08° 24'W) и Виго (42° 14'N, 08° 44'O). Данные имели незначительные пропуски, которые не превышают 1% в Виго и 3% в Корунье и Сантандере. (С 2003 года в Сантандере также используется радиолокационный датчик.)

В настоящее время, поскольку цифровые записи доступны с 5минутными интервалами, почасовые уровни получают автоматически, в исключительных случаях (например, при появлении высокочастотных колебаний), применяя фильтр Баттерворта, который устраняет вышеупомянутые колебания, но сохраняет всю энергию приливных волн.

Контроль качества данных проводился ежегодно методом остаточного прилива (разница между наблюдаемым уровнем и прогнозируемым уровнем), что позволяет легко обнаруживать как ошибки точечного уровня, так и задержки. В настоящее время применяются протоколы контроля качества, определенные в рамках проекта ESEAS-RI.

Расчет среднесуточных уровней был сделан по часовым значениям с помощью сверточного фильтра по 119 пунктам с центром в 12:00. Среднемесячные уровни были получены путем вычисления среднего по среднесуточным уровням, если в этом месяце более 17 дней среднесуточных значений. В последующих анализах серии работа производилась со значениями аномалий, относящимися к среднему уровню, полученному за весь период на каждой из станций.

Метод оценки относительных тенденций - это линейная аппроксимация среднемесячных уровней. Сезонные вариации были получены в среднем по каждому из соответствующих месяцев, чтобы не исключать речные вклады и другие несезонные местные факторы.

Модель пространственной изменчивости среднего уровня моря и его связь с климатическими показателями была исследована через EOF - метод многомерного анализа, широко используемый в климатических исследованиях, целью которого является уменьшение числа переменных путем создания новых переменных или режимов, ортогональных между если и сформирована линейной комбинацией первого, чтобы сохранить как можно больше информации из исходного набора данных [5]

Экстремальные значения уровня моря были исследованы из серии часовых уровней, используя максимальные годовые значения и предполагая распределение Гумбеля для получения уровней возврата [5].

Функция Гумбеля в данной работе рассчитывалась по формуле:

$$f(x) = \frac{1}{\alpha} \exp\left(\frac{-x - \beta}{\alpha} - \exp\left(\frac{-x - \beta}{\alpha}\right)\right)$$
(2.1)

где α и β – параметры распределения, которые рассчитываются по формулам (2.2) и (2.3) соответственно.

$$\alpha = \frac{\sqrt{6}}{\pi}\sigma\tag{2.2}$$

где σ – стандартное отклонение исследуемого ряда.

$$\beta = \bar{\mathbf{x}} - 0.5772\alpha \tag{2.3}$$

где \bar{x} – среднее значение исследуемого ряда.

Краткие результаты данной работы:

1. Средний уровень моря в этом регионе показывает значения тренда, соответственно, 2.37, 2.44 и 2.65 мм/год в Сантандере, Корунье и Виго. Эти результаты несколько выше, чем полученные в глобальном масштабе на 1,8 м за последние 70 лет. Наибольший прирост за последние годы объясняется междекадальной изменчивостью с тенденциями до 20 мм/год. Эволюция тенденций в периоды 30 лет представляет собой цикл с минимальным значением в период 1964-1993 годов, что объясняется увеличением среднего атмосферного давления зимой во всей области южной Европы.

2. Общая картина пространственной изменчивости среднего уровня моря отвечает на характер региональной изменчивости САК на северном побережье.

3. Приливы полусуточные с диапазонами, которые достигли 4,77, 4,38 и 4,01 м в Сантандере, Корунье и Виго соответственно. Амплитуда и фаза гармонической составляющей М2, которая отмечает региональную структуру приливов в этой области, увеличивается к северо-востоку.

4. Экстремальные уровни, оцененные за периоды возвращения к 120 годам, превышают 0,25, 0,15 и 0,10 м, максимальные уровни, зарегистрированные за последние 67 лет в Сантандере, Корунье и Виго, соответственно.

5. При более высокой частотной выборке регистрируются более высокие экстремальные уровни, что позволяет улучшить оценки уровней возврата и, следовательно, проектировать береговые инфраструктуры с большей безопасностью [5].

Остановимся более подробно на обзоре результатов изучения экстремальных уровней.

Максимальные и минимальные суточные значения уровня моря представляют собой колебания, которые в большей степени обусловлены явлением приливов путем чередования квадратурных и сизигийных приливов в результате различных фаз Луны. Во всех трех местах распределение является гауссовым, более симметричным для минимальных значений (коэффициенты смещения 0,00, -0,05 и -0,04 в Сантандере, Корунье и Виго соответственно), чем для максимумов (смещение = 0,10, 0,12 и 0,14 в Сантандере, Корунье и Виго соответственно). Одним из возможных объяснений может быть различное воздействие изученных местностей на атмосферные нарушения, вызывающие антициклоны и циклоны, а также на то, что на северном побережье Испании действуют циклоны, генерируемые локально, а также те, которые генерируются в Атлантике, и которые распространяются в направлении побережье. Напротив, ответ на антициклоны является только локальным. Учитывая полученные коэффициенты эксцесса (k = 2,36, 2,37 и 2,44 в Сантандере, Корунье и Виго соответственно), все серии показывают немного более плоское распределение (эксцесс <3), чем нормальное распределение, то есть оно имеет большее число экстремумов близких к среднему значению, чем нормальное распределение.

Для исследования экстремальных значений использовались почасовые данные, из которых формировали серии максимальных годовых значений.

Результаты анализа экстремальных значений (табл. 2.1), полученные с почасовых уровней, показывают максимальные уровни 2,55. 2,48 и 2,51 м в Сантандере, Корунье и Виго соответственно. Оценены уровни моря с вероятным периодом возникновения 50 лет, которые практически совпадают с зарегистрированными максимумами, за исключением Сантандера, где оценочный уровень превышает максимальный, зафиксированный на 0,16 м (на 0,06 м больше соответствующей ошибки). Разницу, обнаруженную на станции Сантандер, можно объяснить тем, что серия годовых максимумов хуже приспособлена к функции распределения Гумбеля, вероятно, потому, что

станция Сантандер расположена в заливе. Оценки экстремальных уровней для периодов повторяемости 120 лет составляют 2,80, 2,63 и 2,61 м, что превышает максимальные значения, зарегистрированные за 67 лет серии в 0,25, 0,15 и 0,10 м в соответствующих населенных пунктах (рис. 2.10а).

Чтобы узнать об эволюции экстремальных уровней, оцененных за периоды до 50 лет, данные были обработаны в блоках 30 лет с ежегодными смещениями (рис. 2.10b). Эти уровни постепенно возрастают в Сантандере и, что менее заметно, в Корунье, который вместе с Виго представляет самый высокий уровень отдачи в период 1967-1997 годов. Поведение Виго более изменчиво и также представляет минимальное оценочное значение 2,45 м за период 1960-1990 годов. В трех населенных пунктах максимум этих экстремальных уровней для периодов возвращения в 50 лет имеет тот же порядок, что и при рассмотрении полного периода данных.

Таблица 2.1. Максимальные годовые значения уровня моря (м), зарегистрированные на каждой станции за период 1943-2010 годов, и уровни возможные раз в 50 и 120 лет. Значения относятся к среднему уровню каждой станции в течение периода исследования [5].

	Сантандер	Корунья	Виго	
Максимальный	2.55	2.48	2.51	
зарегистрированный уровень моря	2.000	2000		
Уровень моря при периоде	2.71 ± 0.10	2.54 ± 0.09	2.51 ± 0.11	
повторяемости 50 лет	2.71-0.10	2.0	2.01-0.11	
Уровень моря при периоде	2 80±0 12	2.63±0.11	2.61±0.11	
повторяемости 120 лет	2.00-0.12	2.02-0.11	2.01 0.11	



Рисунок 2.10 – Серия максимальных годовых значений уровня моря и периодов возврата (а) и эволюции уровней возврата (мм), рассчитанных за период 50 лет, рассчитанных в блоках по 30 лет с перемещением 1 года (b) в Сантандере, Корунье и Виго [5]

Все результаты, представленные в предыдущем разделе, были получены по часовым данным. Сравнительное изучение экстремальных уровней проводилось с выборок с интервалом 1 час и 5 минут на станции Сантандер за период (2004-2008 гг.). Найденные различия достигают 0,08 м, что указывает на то, что чем выше частота дискретизации, тем выше вероятность записи более высоких экстремальных уровней и, следовательно, тем лучше оценки уровней возврата, позволяя легко корректировать ошибки времени [5].

3 Материалы и методы

3.1 Материалы

3.1.1 Данные мареографов

В данной работе использовался набор данных REDMAR, состоящий из измерений, поступающих из сети мареографов, расположенных в государственных портах Испании. Данные в свободном доступе находятся на портале EMODnet (http://www.emodnet-physics.eu/Portal),

Основная цель набора данных REDMAR – это производить непрерывные измерения, записывать, анализировать и накапливать данные об уровне моря в портах, а предоставление доступа к данным в режиме реального времени является одним из основных аспектов. Самые старые станции предоставляют данные с июля 1992 года. В настоящее время в этой сети работает более 30 станций. Управление работой сети производится из Мадрида. В управление входит: техническое обслуживание, контроль качества, анализ данных, а также включение исторических данных и данных о продуктах в базу данных и создание исторических отчетов, данные о средних значениях и экстремумах и т. д.

Первоначально эта сеть состояла из акустических мареографов SONAR. Однако из-за прекращения производства между 2004 и 2006 годами, были использованы датчики давления Aanderaa. Эти датчики были установлены на временной основе в связи с тем, что они представляли трудности в обслуживании и отклонения в долгосрочном масштабе. В результате длительных испытаний для целей REDMAR была выбрана технология частотной развертки (технология сдвига частот; частотного рассеивания?), которая позволяет контролировать уровень моря во всем диапазоне частот, включая волны и зыбь.

С 2006 года начался период реновации REDMAR, в ходе которого все старые станции были заменены станциями такого типа (от производителя

Miros). С 2007 года также добавлено много новых станций (все они уже являются радарными), которые завершили и значительно улучшили пространственный охват сети.

Новые радиолокаторы Miros также готовы измерять волны вблизи причала или зыб, (соответствующие измерениям значимых высот и среднему периоду в каждые 20 мин) обеспечивая значительную высоту и средние измерения каждые 20 минут. Эти данные о зыби, поскольку датчик расположен у подножия пирса и внутри порта, могут подвергаться воздействию локальных процессов отражения и / или преломления, присущих установке, и они не обязательно должны быть характерными для волнения снаружи (внешнего волнения за пределами мола, причала).

В некоторых случаях мареографиая станция оснащена метеорологическими датчиками, которые обеспечивают информацию о ветре в реальном времени и атмосферное давление высокого разрешения.

Получение данных.

Ранее, в случае с акустическими датчиками и датчиками давления, данные имели дискретность 5 минут. Данные отправлялись на приемную станцию, расположенную в Управлении порта. Впоследствии по электронной почте эта информация доходила до Пуэрто-дель-Эстадо (Государственный порт) с периодичностью, которая зависела от каждой из станций (6 часов, 1 часа или 5 минут). Каждый час данные, которые поступали, подвергались автоматическому контролю качества.

В случае новых радиолокационных датчиков, которые заменили старые датчики (акустика и давление), данные имеют частоту дискретизации 0,5 секунды. Информация также передается на приемную станцию, расположенную в Управлении порта, в которой уровень моря и атмосферные данные усредняются каждую минуту и параметры волн каждые 20 минут. Вся эта информация передается в государственные порты через Интернет. Каждые четверть часа данные, которые поступают, подвергаются автоматическому контролю качества. С другой стороны, каждые 12 часов фильтр применяется к

данным уровня моря, которые получают среднечасовые значения, а также метеорологический остаток из «сырой» (необработанной\исходной) серии. Вся эта информация, серия, усредненная каждые 5 минут, временные ряды и метеорологический остаток хранятся окончательно в Океанографическом банке данных.

Кроме того, раз в год регулярно просматриваются временные ряды уровня моря, полученные с станций. Исходя из этих тщательно продуманных серий, рассчитываются средние уровни (ежедневно, ежемесячно и ежегодно), экстремальные (ежедневные, месячные и годовые), гармонические константы, а также приливные течений для каждой станции REDMAR. Эти данные хранятся окончательно в Океанографическом банке данных.

На рисунке 3.1 представлена схема получения данных с мареографов в сети REDMAR.



Рисунок 3.1 – Получение данных в сети REDMAR

Для мареографов важным параметром является значение опроного уровня или нуля. Национальный географический институт (IGN) использует в качестве отсчета высоту, которая на полуострове соответствуют уровню среднего моря в Аликанте (Nivel Medio del Mar en Alicante, NMMA) в десятилетие 1870-1880 годов. Это относится к геометрическим высотам геодезических сигналов, распределенных по Пиренейскому полуострову, и составляет национальную систему. На островах IGN обычно использует средний уровень местного моря как ноль.

Высота на NMMA, используемая Пуэрто-дель-Эстадо, была предоставлена IGN, которая выполняет выравнивание каждого из датчиков во время установки. Каждый порт, со своей стороны, определяет опорный уровень или нуль, удобный для выполнения работ, дноуглубительных работ и т. д.; который известен как нуль порта. Мареографы REDMAR обычно относятся к нолю порта.

Для того, чтобы контролировать стабильность опорных датчиков используются по меньшей мере два опорных сигналов: один рядом с мареографом и другой в более стабильном месте, размещенном на одном уровне с предыдущим (основным опорным сигналом). Речь идет об обнаружении возможных осаждений причала, на котором находится датчик, что приведет к ложному повышению уровня моря. Эти точки(?) должны принадлежать или быть привязаны к Национальной геодезической сети, чтобы соотнести уровни между различными станциями.
3.1.2 Основные характеристики модели GLOBAL-REANALYSIS-PHY-001-025

Таблица 3.1 – Основные характеристики модели GLOBAL-REANALYSIS-PHY-001-025 [12]

Название модели	GLOBAL-REANALYSIS-PHY-001-025
Географический охват	180° з.д.→180° в.д.; 89° ю.ш. → 90°с.ш.
	— Температура
	— Соленость
	 Высота поверхности моря
	— Горизонтальная скорость (меридиональная
	и зональная компоненты)
Переменные	 Концентрация морского льда
	— Толщина морского льда
	— Скорость морского льда (меридиональная и
	зональная компоненты)
	— Потенциальная температура морского дна
	— Толщина верхнего перемешенного слоя
Частота обновления	Ежегодно
Доступный временной	01 01 1993 – 29 12 2015 FF
промежуток	01.01.1775 27.12.2015 11.
Временное разрешение	Суточные и месячные значения
Пространственное разрешение	
(горизонтальное)	
Пространственное разрешение	75 споев
(вертикальное)	
Формат выходных данных	Netcdf CF1.0

Описание методов реализации модели

Реанализ GLORYS2V4 основывается на трех основных компонентах:

1. Модель океана (в том числе граничное состояние поверхности

атмосферы);

2. Метод ассимиляции данных;

3. Ассимилированные наблюдения.

Рассмотрим более подробно данные компоненты.

Модель океана

Система реанализа основана на версии 3.1 модели NEMO (Nucelus for European Models of the Ocean). В конфигурации модели используется трехполярный тип сетки – ORCA (1442 на 1021 точки) при горизонтальном разрешении 1/4°. Три полюса расположены: Антарктика, Северная Азия и Северная Канада. Разрешение 1/4° сетки ORCA (ORCA025 в дальнейшем) соответствует 27 км на экваторе, 22 км на мысе Хаттерас (область Гольфстрима) и 12 км на высоких широтах (Северный Ледовитый океан и региональные моря вокруг Антарктики). Вертикальная сетка имеет 75 уровней, с разрешением 1 метр около поверхности, 200 метров в «глубоком» океане (глубина более 3000 м) и 24 уровня в верхних 100 м,

Батиметрия, используемая в системе, представляет собой комбинацию интерполированного ЕТОРО1 и GEBCO8 (Becker et al., 2009). Наборы данных ЕТОРО используются в регионах глубже чем 300 м, а GEBCO8 используется в областях, где глубина не превышает 200 м, с линейной интерполяцией в слое 200-300 м. Минимальная глубина в модели установлена на 12 метров, за исключением района Багамских островов (~ 3 метра). Три острова были добавлены в проливе Торреса, чтобы уменьшить транспорт и пролив Палк (между Индией и Шри-Ланкой) был «открыт» с глубиной 3 м.

Метод ассимиляции данных

Метод ассимиляции данных основан на уменьшенном порядке фильтра Калмана, основанного на формуле SEEK, введенной Pham et al. (1998).

Важная особенность системы реанализа GLORYS2V4 (реализованной также в глобальном режиме реального времени системы прогнозирования), анализ проводится в середине 7-дневного цикла ассимиляции, а не в конце цикла ассимиляции.

Ассимилированные наблюдения уровня моря

Ассимилированные данные состоят из спутниковых данных температуры поверхности моря и аномалий высоты поверхности моря, профилей температуры и солености in situ, и концентрация морского льда. Модельное новшество (наблюдение минус эквивалент модели, y-Hx) рассчитанные в соответствующее время (FGAT – First Guess at Appropriate Time). Время начала повторного анализа GLORYS2V4 является 4 декабря 1992 года в 00 ч. UTC. Модель океана интегрирована в течение первых двух недель без данных ассимиляции. Затем все доступные наблюдения усваиваются.

Ниже приведен краткий обзор доступности наборов данных динамической топографии представлен в таблице 3.1.

	Jason-2	Jason-1	Jason-1	GFO	Envisat	Enwisat	ERS-1
		new(1)				new (2)	(3)
							ERS-2
Период	10.2008	02.2009/	04.2002/	01.2000/	10.2002/	10.2010/	10.1992/
доступности:		03.2012	10.2008	09.2008	10.2010	04.2012	10.2002
начало/							
конец							
	Topex	Topex	Cryosat2	AltiKa	H2-YA2		
	new (4)						
Период	09.2002/	09.1992/	01.2011	03.2013	04.2012/		
доступности:	10.2005	04.2002			01.2016		
начало/							
конец							

Таблица 3.2 – Спутники, предоставляющие альтиметрические данные [12]

В таблице 3.2:

(1) Новая орбита Jason-1: начало 02.2009 г.

(2) Новая орбита Envisat: начало 10.2010 г.

(3) Данных ERS-1 нет между 23 декабря 1993 года и 10 апреля 1994 года

(4) Новая орбита Торех: начало 09.2002 г.

Ассимиляция наблюдений аномалий поверхности моря требует знания средней высоты поверхности моря (MDT). В модели используется MDT на основе MDT «CNES-CLS13» с настройкой, использующей анализа с высоким разрешением и с пост-ледниковым отскоком (Post Glacial Rebound). Этот продукт учитывает последнюю версию геоида GOCE.

Ошибки модели в измерении уровня моря

Ошибка наблюдения включает в себя как инструментальную ошибку (Rme), так и ошибку репрезентативности модели (RRE). Предполагается, что эти ошибки некоррелированы и моделируются диагональными матрицами (т.е. ошибки наблюдения взаимно некоррелированы).

Для аномалий уровня моря ошибка наблюдения R_{me} (в дисперсии) задается в соответствии со знанием инструментальных особенностей. Так, для JASON (с новой орбитой или нет) и TOPEX-POSEIDON (с новой орбитой или нет) используется ошибка в 2 см; 3,5 см для ERS-2, GFO и ENVISAT. В октябре 2010 года Envisat высотомер был перенесен на более низкую орбиту, что привело к небольшому ухудшению качества данных. В результате этого высотомера (Envisat new) приписывается ошибка 5,5 см.

Для Cryosat-2 ошибка 4 см; 2 см для Altika и ошибка 4 см для HY-2A.

Средняя динамическая топография: в аномалии уровня моря добавлена ошибка репрезентативности для MDT. Эта ошибка составляет в среднем 5 см. Наибольшие значения (~ 10 см) расположены на шельфе, вдоль побережья (репрезентативность модели + ошибка наблюдения за приливами) и в регионах сильных фронтов (Гольфстрим, Куросио, ...) [12].

3.1.3 Основные характеристики модели ATLANTIC-IBERIAN BISCAYIRISH- OCEAN PHYSICS REANALYSIS

ИБИ (Иберийская Бискайская Ирландская) система океанского реанализа обеспечивает трехмерные ежемесячные и дневные океанические поля, а также среднечасовые значения для некоторых поверхностных переменных в течение

времени, который варьируется от 01.01.1992 до 31.12.2016. периода Предусмотрены среднемесячные и дневные средние значения 3D-температуры, солености, глубины перемешивания, температуры морского дна, компонентов зональной и меридиональной скоростей и высоты морской поверхности. Также предусмотрены часовые данные для поверхностных полей таких переменных, как высота поверхности моря, глубина слоя перемешивания, температура поверхности и течения, а также баротропные скорости. Численное ядро модели общей циркуляции океана NEMO v3.6 с IBI основано на модели горизонтальной разрешающей способностью 1/12 °. Ассимилируются данные о вертикальном профиле температуры и солености и температуре солености. Для данных об уровне моря ассимилируются спутниковые данные, полученные о следующих спутников: TOPEX, JASON, ERS, ENVISAT, GFO.

Качество реанализа IBI в основном оценивалось с помощью проверки повторных анализов ежемесячных полей с источниками наблюдений и сравнения продуктов реанализа IBI с глобальными моделями реанализа GLORYS (GLOBAL-REANALYSIS-PHYS-001-009). Кроме того, была проведена конкретная оценка выходных данных модели более высокой частоты путем сравнения результатов повторного анализа с 10-часовыми натурными данными, полученными 14 буями Пуэрто-дель-Эстадо, расположенных вдоль побережья Испании (Атлантического и Средиземноморского) побережья и Канарские острова.

Реанализ IBI для уровня моря очень близок к альтиметрическим наблюдениям и имеет хорошую способность описывать изменчивость уровня моря. Средневзвешенное среднеквадратичное отклонение (Root-mean-square deviation, RMSE) исследуемого уровня моря составляет около 6 ~ 7 см. Корреляции с наблюдениями мареографов обычно выше 0,7 и лучше, чем для реанализа GLORYS2V3. Однако тренд уровня моря не согласуется с наблюдениями [13].

40

3.2 Расчет эмпирических вероятностей превышения

В гидрометеорологии существует большое количество различных формул для расчета эмпирических вероятностей превышения (не превышения). В средней части распределения эти формулы приводят к схожим результатам, основные отличия на концах распределения, особенно в области редких повторяемостей.

Э. Гумбел обобщил и сформулировал условия, которым должны отвечать расчетные формулы эмпирических вероятностей превышения:

1) период повторяемости, приписываемый наивысшему максимуму, должен приближаться к числу максимумов в выборке;

2) все наблюденные экстремумы должны быть нанесены на клетчатку вероятностей, т.е. эмпирические вероятности превышения не должны обращаться в 0 или 1 при значениях порядковых номеров членов ряда *m* от 1 до N [4].

3.2.1 Методика расчета, используемая в данной работе

Производится расчет эмпирического и теоретического рядов распределения по [14].

Эмпирический ряд

На первоначальном этапе необходимо получить ряд максимальных значений и ранжировать его по убыванию.

Далее необходимо рассчитать вероятности Р по формуле:

$$\mathbf{P} = \frac{m}{(N+1)} \tag{3.1}$$

где *т* – номер элемента по порядку от начала ряда,

N – длина ряда.

После рассчитываются перцентили нормального распределения. Расчет производился в Exel с помощью функции НОРМОБР(вероятность; среднее;

стандартное отклонение). Данная функция возвращает обратное нормальное распределение для указанного среднего и стандартного отклонения. Среднее значение в данном случае равно 0, а стандартное отклонение – 1.

Далее на клетчатку, приведенную на рисунке 3/2, наносятся по оси X перцентили нормального закона распределения и по оси У – ряд максимумов, ранжированных по убыванию



Рисунок 3.2 – Клетчатка вероятностей [14]

Теоретический ряд

Для получения теоретического ряда необходимо рассчитать параметры распределения Гумбеля α и ε.

Для максимумов расчёт производится по следующим формулам:

$$\alpha = \sigma(x) / \sigma(y) \tag{3.2}$$

$$\varepsilon = X_{\rm cp} - Y_{\rm cp} / \alpha \tag{3.3}$$

где σ_x и σ_y – стандартные ошибки эмпирического и теоретического* рядов соответственно,

X_{ср} и Y_{ср} – средние значения эмпирического и теоретического*

рядов соответственно.

*табличные значения (значения представлены в таблице 3.3)

Таблица 3.3 Средние значения параметров Y_{cp} и σ_y при различном числе членов ряда [15]

n	y y	σ_{y}	n	y	σ_y	n	ÿ	σ_{y}
20	0.524	1.063	40	0.544	1.141	60	0.552	1.175
22	0.527	1.076	42	0.545	1.146	65	0.554	1.180
24	0.530	1.086	44	0.546	1.150	70	0.555	1.185
26	0.532	1.096	46	0.547	1.154	75	0.556	1.190
28	0.534	1.105	48	0.548	1.157	80	0.557	1.194
30	0.536	1.112	50	0.548	1.161	85	0.558	1.197
32	0.538	1.119	52	0.549	1.164	90	0.559	1.201
34	0.540	1.126	54	0.550	1.167	95	0.559	1.204
36	0.541	1.131	56	0.551	1.170	100	0.560	1.206
38	0.542	1.136	58	0.552	1.172	x 0	0.577	1.282

Далее рассчитываются перцентили нормального закона распределения аналогично с эмпирическим рядом. Вероятности в данном случае имеют следующие значения: 0.00001; 0.0001; 0.001; 0.001; 0.02; 0.05; 0.1; 0.2; 0.3; 0.4; 0.5; 0.6; 0.7; 0.8; 0.9; 0.95; 0.98; 0.99; 0.999.

После расчета процентилей рассчитывается теоретическое распределение Y(p) заданной обеспеченности p и X(p):

$$Y(p) = -\ln[-\ln(1-p)]$$
 (3.4)

$$X(p) = \varepsilon + Y(p)/\alpha \tag{3.5}$$

где α и ε – параметры распределения Гумбеля.

Далее на клетчатку (рис. 3.2) наносятся по оси X значения процентилей нормального закона распределения, а по оси У – X(p) [14].

3.3 Подготовка исходных данных

В работе использовались три ряда исходных данных, а именно:

1. Часовые данные мареографов с дискретностью 1 час за период с 2009 по 2017 гг.

2. Среднесуточные данные модели GLOBAL-REANALYSIS-PHY-001-025 за период 1993-2015 гг (далее модель 1)

3. Среднесуточные данные модели ATLANTIC-IBERIAN BISCAY IRISH-OCEAN PHYSICS REANALYSIS за период 1992-2016 гг (далее модель 2)

Всего в работе рассматривалось 5 станций, соответственно для каждой станции по три исходных ряда. Расположение станций представлено на рисунке 3.3, а в таблице 3.4 представлены координаты станций.



Рисунок 3.3 – Расположение исследуемых станций

	-					
Название	М	ареограф	M	Іодель 1	Модель 2	
станции	град. с.ш	град. з.д	град. с.ш	град. з.д	град. с.ш	град. з.д
Бильбао	43.352	-5.045	43.75	-5.0	43.500	-5.000
Корунья	43.357	-8.389	43.50	-8.5	43.417	-8.333
Виго	42.244	-8.727	42.25	-9.0	42.250	-8.833
Уельва	37.132	-6.834	37.00	-7.0	37.083	-6.833
Тарифа	36.002	-5.592	36.00	-5.75	36.000	-5.583

Таблица 3.4 - Координаты исследуемых станций

По часовым данным мареографов были рассчитаны среднесуточные значения за те сутки, где присутствует полный набор данных, а именно 24 значения. Из ряда среднесуточных значений за каждый месяц выбирались максимальные значения. Выбор максимального значения производился с помощью специально разработанной для этой цели программы на языке Fortran90, текст программы представлен в приложении А.

Для модельных данных моделей 1 и 2 также были выбраны максимальные значения за каждый месяц.

В итоге для каждой станции (рис. 3.3) было получено три ряда максимальных значений. В связи с тем, что модельные данные – это превышение высоты над геоидом, а данные мареографов отсчитываются от нулей портов, то из рядов максимумов были удалены средние значения и далее рассматривались ряды отклонений.

Для рядов отклонений были рассчитаны теоретические и эмпирические функции распределения Гумбеля. Также между всеми рядами был рассчитаны коэффициенты корреляции, произведено сравнение по дисперсии и сопоставлены значимые гармоники. Перед выполнением спектрального анализа для каждого ряда были рассчитаны тренды. Тренды проверялись на значимость и если они были значимы, то удалялись из ряда. Для данных расчетов были использованы отрезки рядов за 2009-2015 гг, а для спектрального анализа использовался временной отрезок 2012-2015 гг, так как в период с 2009 по 2011 гг в рядах отклонений мареографов имеются пропуски данных, вызванные тем, что в эти месяцы невозможно было рассчитать среднесуточные значения, поскольку в часовых данных имелся не полный набор данных (менее 24 значений за сутки)

Аналогичное сравнение рядов было произведено для исходных среднесуточных рядов за период 2012-2015 гг. Выбор данного периода для рассмотрения и сопоставления рядов был обусловлен большими пропусками в рядах данных мареографов в период 2010-2011 гг. В ряде за период 2012-2015 год также имелись пропуски значений, которые восстанавливались с помощью линейной интерполяции.

Также по часовым данным мареографов выбирались максимумы за месяц за период 2009-2017 гг, по этим же данным рассчитывались среднемесячные значения и из ряда среднемесячных значений выбирались годовые максимумы. Далее для рядов максимумов по часовым данным, по среднесуточным и по среднемесячным производился расчет теоретических и эмпирических функций распределения Гумбеля. 4 Результаты работы

4.1 Сопоставление исходных среднесуточных рядов мареографов и моделей

Для исходных среднесуточных рядов было произведено сопоставление по дисперсии, спектральной структуре и тесноте линейной взаимосвязи по коэффициенту корреляции. Результаты расчетов представлены в таблицах 4.1 и 4.2.

Для исходных рядов среднесуточных рядов мареографов и моделей 1 и 2 были рассчитаны и проверены на значимость по критерию Стьюдента коэффициенты корреляции, все они оказались значимыми, однако величины коэффициентов корреляции не превышают 0,7, что говорит о слабой тесноте связи между рядами. Наиболее тесная взаимосвязь между «мареограф-модель» выявлена для станций Корунья и Виго с обоими моделями, коэффициенты корреляции более 0,6. Также для взаимосвязи «мареограф-модель 2» для станции Тарифа коэффициент корреляции 0,63. Связь рядов данных двух моделей также наибольшая для станций Корунья, Виго и Уельва. В данных случаях коэффициенты корреляции более 0,7.

Сравнение рядов мареографов и моделей по дисперсии показало, что дисперсии (т.е. в степени различия В изменчивости) двух выборок статистически значимы при заданном уровне значимости α=0.05. Из таблицы 4.1 видно, что дисперсия рядов мареографов на порядок выше, чем дисперсия рядов моделей. Также различия в дисперсии можно проследить и визуально, если сопоставить графики временной изменчивости рядов мареографов и моделей 1 и 2 (рис. 4.1 А-В). В работе приведено сопоставление для станции Виго, которая имеет наибольший коэффициент корреляции с модельными данными (в частности с моделью 2), дабы показать, что несмотря на наличие статистически значимого коэффициента корреляции и имеющего относительно большую величину (0,625 с моделью 1 и 0,697 с моделью 2), временна

47

изменчивость данных мареографов разительно отличается от временной изменчивости модельных данных. Также далее различия во временной изменчивости рядов можно будет проследить по спектральной структуре.

Сопоставление дисперсий моделей 1 и 2 между собой выявило статистически значимую взаимосвязь, что оправданно, так как данные модели ассимилируют практически один и тот же набор спутниковых данных (см. описание данных), однако дисперсия модель 2 несколько выше, чем дисперсия модели 1, это, по-видимому, вызвано тем, что модель 2 также усваивает данные буев, расположенных вдоль побережья Испании. Эти различия в дисперсии моделей также прослеживаются при сопоставлении графиков временной изменчивости (рис. 4.1Б и 4.1В).

Как упоминалось в описании данных, перед проведением спектрального анализа из исходных рядов удалялись значимые тренды. Как показала проверка, во всех рядах присутствовали значимые тренды, которые и были удалены. На рисунке 4.1 А-В также нанесены линии трендов. Как показали расчеты разительных отличий в величине трендов рядов мареографов и моделей 1 и 2 не наблюдается. Средняя величина тренда для всех рядов 4*10⁻⁵ м/сутки (или 0,0146 м/год). В приложении Б приведены уравнения линии трендов всех рядов. Наиболее заметное отличие в величине тренда наблюдается для станции Тарифа. По данным мареографа величина тренда составляет 0,004 м/года, а по данным модели 1 и модели 2 0,015 м/год и 0.011 м/год соответственно.

		Бильбао	Корунья	Виго	Уельва	Тарифа
	Мареограф- Модель 1	0.384	0.626	0.625	0.515	0.455
Корреляция	Мареограф- Модель 2	0.577	0.689	0.697	0.549	0.629
	Модель 1- Модель 2	0.579	0.911	0.895	0.858	0.560
C	Мареограф	0.110	0.120	0.127	0.106	0.081
Стандартное	Модель 1	0.049	0.053	0.048	0.043	0.046
отклонение	Модель 2	0.067	0.069	0.077	0.048	0.049
	Мареограф	0.012	0.014	0.016	0.011	0.007
Дисперсия	Модель 1	0.002	0.003	0.002	0.002	0.002
	Модель 2	0.005	0.005	0.006	0.002	0.002
	Мареограф- Модель 1	5.146	5.198	6.832	5.977	3.044
Критерий Фишера	Мареограф- Модель 2	2.681	2.993	2.712	4.921	2.748
	Модель 1- Модель 2	0.521	0.576	0.397	0.823	0.903
F _{кp} *		1.091	1.090	1.090	1.090	1.091

Таблица 4.1 – Сопоставление рядов по дисперсии и коэффициенту корреляции

* F_{кр} - критическое значение критерия Фишера

Длина ряда







Рисунок 4.1 – Временная изменчивость среднесуточных значений уровня моря по данным мареографа (а), модели 1 (б) и модели 2 (в) за период 01.01.2012-29.12.2015 гг для станции Виго. Красной пунктирной линией на графиках указана линия тренда

В общей сложности спектральный анализ выявил 11 различных гармоник от 3,5 лет до 14 суток (0,04 года), представленных в таблице 4.2. Абсолютно на всех станциях и для типов данных присутствует годовая гармоника, в данном случае во всех рядах также присутствует полугодовая гармоника, которая равноденственные приливы. Ha большинстве станций отражает еще присутствует гармоника в 3-3,5 года. Период колебания данной гармоники сопоставим с рассматриваемым периодом исследуемых рядов, который составляет 4 года (2012-2015 гг). Выявление данной гармоники может колебаний уровня свидетельствовать о наличии долгопериодных моря. Гармоника в 1,5 года также присутствует практически во всех рядах. Присутствие остальных гармоник неравномерно. Стоит отметить, что для данных мареографов на всех станциях также выделяются период в 0,42 года

(приблизительно 153 дня), 0,25 года (приблизительно 92 суток), а также период в 0.04 года (14,6 суток). Последняя гармоника с периодом в 14,6 суток примерно соответствует промежутку времени между двумя квадратурными приливами или двумя сизигийными. Модельные данные не отражают неравенство приливов в течение месяца, только для одной станции для модели 2 был выявленный данный период, а именно для станции Тарифа На рисунке 4.2 представлен спектр для станции Виго, в котором можно увидеть практически все выявленные гармоники (кроме 0,3 года).

Tun Tourun	Название		Период повторяемости, годы									
тип данных	станции	3-3,5	1,5	1	0,8	0,6	0,5	0,42	0,3	0,25	0,2	0,04
	Бильбао	3.5020	1.5759	1.0167			0.4925	0.4202	0.3121	0.2542		0.0404
	Корунья	3.1956	1.5978	1.0308	0.7989		0.4993	0.4205		0.2536	0.1869	0.0405
Мареограф	Виго	3.1956	1.5978	1.0308	0.7989	0.5918	0.4993	0.4205		0.2536	0.1869	0.0405
	Уельва	3.1956	1.5978	0.9986			0.4993	0.4261	0.3261	0.2932		0.0405
	Тарифа	3.1518		1.0167			0.5003	0.4202	0.3249	0.2918		0.0404
	Бильбао	3.15179	1.65883	1.01671			0.49246			0.25624		
	Корунья	3.19561	1.59779	0.99862			0.49931			0.25564		
Модель 1	Виго	3.19561	1.59779	0.99862			0.50724			0.25564		
	Уельва			0.96837			0.52387					
	Тарифа	3.15179	1.65883	0.98495			0.51669					
	Бильбао	3.1518	1.6588	1.0167			0.4925			0.2562		
	Корунья	3.1956	1.5978	0.9986			0.4993			0.2536		
Модель 2	Виго	3.1956	1.5978	0.9986			0.5072			0.2536		
	Уельва	2.9051	1.5217	0.9986			0.5072	0.4318				
	Тарифа	3.1540	1.5770	1.0174			0.5006	0.4262				0.0404

Таблица 4.2 Гармонические составляющие исследуемых рядов



Рисунок 4.2 – Спектр среднесуточных значений данных мареографа на станции Виго за период 2012-2015 гг. Красной линией показан уровень значимости

В целом, по спектральному анализу можно сделать следующий вывод, что модельные данные отражают основные долгопериодные колебания с периодом 1 год и полгода, однако плохо воспроизводят высокочастотные колебания, в частности такую важную составляющую колебаний уровня моря как сизигийные и квадратурные приливы.

4.2 Сопоставление рядов отклонений максимумов мареографов и моделей и их распределений Гумбеля

Для каждой из 5 станций по рядам среднесуточных значений уровня были выбраны максимальные значения за каждый месяц за период 2009-2015 гг, длины рядов отклонений представлены в таблице 4.3. Для получения рядов отклонений максимумов из рядов удалялись средние значения ряда.

Все ряды отклонений были сопоставлены по дисперсии и спектрам, а также проведен корреляционный анализ между рядами. В таблице 4.3 приведены результаты расчетов. В целом результат сопоставления по дисперсии и корреляции получился аналогичным результатам сопоставления исходных среднесуточных рядов. Так можно видеть, что, как и для исходных рядов, ряды отклонений максимумов мареографов и моделей имеют плохую линейную взаимосвязь, так как для всех станций коэффициенты корреляции меньше 0,7. Однако, как и ранее, для станции Виго наблюдается более сильная взаимосвязь данных мареографов и моделей 1 и 2 (коэффициенты корреляции 0,61 и 0,69 соответственно). Также для станции Корунья коэффициент корреляции данных мареографа и модели 2 составляет 0,65. Также была оценена взаимосвязь данных моделей. Для всех станций коэффициенты корреляции имеют значение более 0,6. Наибольшая взаимосвязь отмечается для станций Корунья и Виго. Сопоставление дисперсий рядов мареографов и моделей показало, что различия в дисперсии (т.е. в степени изменчивости) двух выборок статистически значимы (при заданном уровне значимости α=0.05).

53

Дисперсия данных мареографов на порядок выше, чем модельных данных. Сопоставление дисперсий моделей 1 и 2 показало, что имеется статистическая взаимосвязь в изменчивости этих двух моделей.

		Бильбао	Корунья	Виго	Уельва	Тарифа
	Мареограф- Модель 1	0.286	0.565	0.610	0.365	0.497
Корреляция	Мареограф- Модель 2	0.505	0.652	0.693	0.365	0.578
	Модель 1 - Модель 2	0.673	0.918	0.906	0.768	0.605
Станлартное	Мареограф	0.118	0.124	0.139	0.125	0.082
отклонение	Модель 1	0.045	0.055	0.049	0.036	0.040
oncontentie	Модель 2	0.069	0.076	0.085	0.049	0.041
	Мареограф	0.014	0.015	0.019	0.016	0.007
Дисперсия	Модель 1	0.002	0.003	0.002	0.001	0.002
	Модель 2	0.005	0.006	0.007	0.002	0.002
	Мареограф- Модель 1	6.993	5.172	8.119	12.160	4.255
Критерий Фишера	Мареограф- Модель 2	2.906	2.643	2.668	6.548	4.048
	Модель 1- Модель 2	0.416	0.511	0.329	0.538	0.951
F _{kp} *		1.452	1.449	1.449	1.449	1.491
Ллина ряла	Мареограф	75	76	76	76	68
h	Модели	83	84	84	84	71

Таблица 4.3 – Сопоставление рядов отклонений максимумов

* F_{кр} - критическое значение критерия Фишера

Для всех рядов отклонений проводился спектральный анализ. Как уже говорилось в 3 главе (пункт 3.3), перед проведением спектрального анализа из рядов удалялись значимые тренды. Для рядов отклонений максимумов было выявлено всего четыре значимых тренда, а именно для модели 1 для станций

Бильбао, Карунья и Тарифа, а для модели 2 – для Бильбао. В рядах мареографов значимых трендов не было выявлено. На рисунке 4.3 представлены графики временной изменчивости рядов отклонений максимумов мареографа до удаления трендов (для модели 1 и модели 2), модели 1 и модели 2 для станции Бильбао. По данным графикам четко прослеживаются различия в дисперсии, который были описаны ранее (табл. 4.3). на графиках (рис. 4.3) также приведены уравнения трендов, по ним видно, что различий в величине тренда нет для трех типов данных, однако, как уже говорилось, тренд для данных мареографа не значим. В [13] упоминается, что при проверке данных модели 2, производилось сопоставление результатов моделирования данными С мареографов и это сопоставление показало несоответствие трендов, что в общем-то подтвердилось в данном сопоставлении. Также стоит отметить, что в [13], говорится, что коэффициенты корреляций для большинства мареграфных станций и данных моделей показывают коэффициенты корреляции больше 0,7, однако в данной работе, для рассматриваемых станций это не подтвердилось.





Рисунок 4.3 – Временная изменчивость рядов отклонений месячных максимумов уровня моря по данным мареографа (А), модели 1 (Б) и модели 2 (В) за период 2009-2015 гг для станции Бильбао (сплошная линия) и линий тренда данных рядов (красная пунктирная линия)

Спектральный анализ проводился для отрезков рядов за период 2012-2015 гг. Это было связано с тем, что в период с 2009 по 2011 гг в данных имелись пропуски. Спектральный анализ показал, что для рядов мареографов для всех станций, кроме Тарифа, не выявлено значимых гармоник (табл. 4.4). Для станции Тарифа выявлена гармоника с периодом 6,03 месяца. Для модельных данных спектральный анализ выявил одну значимую гармонику с примерным периодом 1 год. Также данный период колебаний хорошо прослеживается визуально. На рисунке 4.3Б представлен график временной изменчивости ряда

отклонений для модели 1 для станции Бильбао до удаления тренда. На конец осени-начало зимы приходятся максимальные значения, а на начало весны приходятся минимальные значения. Возрастание уровня моря в осенне-зимний объяснить усилением атмосферной нестабильности период можно И увеличением числа штормов в данный период, в результате которых могу происходить штормовые нагоны на побережье. Однако, то, что данный годовой период не выявлен в рядах отклонений мареографов, может говорить о том, что причиной наличия годового периода в модельных данных вызвано другой причиной. Хотя в исходных рядах (табл. 4.2) по данным мареографов выделялся годовой период.

Название	Мареограф	Модель 1	Модель 2
станций	Т, мес	Т, мес	Т, мес
Бильбао	-	12.27	12.27
Корунья	-	12.13	12.13
Виго	-	11.75	12.13
Уельва	-	11.75	12.13
Тарифа	6.03	11.87	11.87

Таблица 4.4 – Периоды колебаний в рядах отклонений максимумов

Также три набора данных были сопоставлены по функции распределения Гумбеля. В данном случае использовались максимальные длины рядов, имеющиеся в свободном доступе. Так для данных мареографов месячные максимумы выбирались за период 2009-2017 гг для станций Бильбао, Корунья, Виго и Уельва (в итоге 100 значений максимумов), для станции Тарифа – за период 2010-2017 гг (93 значения). Для модели 1 месячные максимумы выбирались за период 1993-2015 гг, в итоге 276 значений. Для модели 2 – за период 1992-2016, в итоге 300 значений максимумов. Из рядов максимумов были получены ряды отклонений максимумов, для которых и проводился Гумбеля. В расчет функций распределения итоге были рассчитаны теоретические и эмпирические функции распределения Гумбеля по трем видам

данных (мареограф и две модели). На рисунках 4.4-4.8 представлены результаты расчетов.

Для станции Бильбао (рис. 4.4) видно, что функции распределения моделей имеют значения меньше, чем функция распределения, полученная по данным мареографов, причем с уменьшением вероятности возникновения экстремального события разница увеличивается. Так, при вероятности 50% отклонение уровня моря от среднего для мареографа превышает значение по модели 1 на 0,107 м, а модели 2 – на 0,063 м (см. Таблица 4.5). Также стоит отметить, что для данной станции распределения максимумов ближе к нормальному распределению.

	Отклонение	максимальн	ого уровня				
Haapawya	моря от сре	днего при ве	роятности	Δ, м			
станции		50%, м					
Станции	Manaarnad	Молони 1	Молони 2	Мареограф-	Мареограф-	Модель 1 -	
	марсограф	модель і	Модель 2	Модель 1	Модель 2	Модель 2	
Бильбао	0.132	0.025	0.069	0.107	0.063	-0.044	
Корунья	0.157	0.446	0.066	-0.289	0.091	0.380	
Виго	0.154	0.611	0.073	-0.457	0.081	0.538	
Уельва	0.124	0.480	0.038	-0.357	0.086	0.442	
Тарифа	0.093	0.027	0.037	0.066	0.056	-0.010	

Таблица 4.5 – Сопоставление функций распределения Гумбеля



Рисунок 4.4 – Функции распределения Гумбеля на клетчатке вероятностей нормального закона распределения для трех рядов данных (синяя сплошная линия – мареограф, красная сплошная линия – модель 1, зеленая сплошная линия – модель 2) для станции Бильбао и распределение максимальных за месяц среднесуточных значений отклонений уровня моря (точечные линии)

Для станций Корунья, Виго и Уельва (рис. 4.5-4.7) распределение максимумов довольно хорошо соответствует распределению Гумбеля. Отличительная черта распределений на этих трех станций, что модель 1 в области вероятностей от 99,9% до 1% значительно завышает значения отклонений уровня моря, так при вероятности 50% значение модели 1 превышает значения мареографа на 0,289 м, 0,457 м и 0,357 м (табл. 4.5) для станций Корунья, Виго и Уельва соответственно. Однако в области малых вероятностей данная модель занижает значения уровня моря.



Рисунок 4.5 – Функции распределения Гумбеля на клетчатке вероятностей нормального закона распределения для трех рядов данных (синяя сплошная линия – мареограф, красная сплошная линия – модель 1, зеленая сплошная линия – модель 2) для станции Корунья и распределение максимальных за месяц среднесуточных значений отклонений уровня моря (точечные линии)



Рисунок 4.6 – Функции распределения Гумбеля на клетчатке вероятностей нормального закона распределения для трех рядов данных (синяя сплошная линия – мареограф, красная сплошная линия – модель 1, зеленая сплошная линия – модель 2) для станции Виго и распределение максимальных за месяц среднесуточных значений отклонений уровня моря (точечные линии)



Рисунок 4.7 – Функции распределения Гумбеля на клетчатке вероятностей нормального закона распределения для трех рядов данных (синяя сплошная линия – мареограф, красная сплошная линия – модель 1, зеленая сплошная линия – модель 2) для станции Уельва и распределение максимальных за месяц среднесуточных значений отклонений уровня моря (точечные линии)



Рисунок 4.8 – Функции распределения Гумбеля на клетчатке вероятностей нормального закона распределения для трех рядов данных (синяя сплошная линия – мареограф, красная сплошная линия – модель 1, зеленая сплошная линия – модель 2) для станции Тарифа и распределение максимальных за месяц среднесуточных значений отклонений уровня моря (точечные линии)

Картина распределений Гумбеля для станции Тарифа аналогична со станцией Бильбао. В данном случае можно отметить, что различия в распределениях модели 1 и модели 2 незначительны относительно отличий их распределения от распределения данных мареографов. Так, отличия в значениях отклонений уровня между моделью 1 и моделью 2 при вероятности 50% составляют 0,01 м, а отличие от значения мареографа 0,066 м для модели 1 и 0,056 м для модели 2 (табл. 4.5).

В таблице 4.6 сопоставлены отклонения уровня моря от среднего при малых вероятностях наступления события. Вероятность в 1% соответствует возможность наступления 1 раз в 8,33 года, вероятность 0,1% - 1 раз 83,33 года и 0,01% - 1 раз в 833,3 лет.

Название	Тип данных	Вероятност	ъ, %	
станции		0,01	0,1	1
Бильбао	Мареограф	0.941	0.730	0.519
	Модель 1	0.354	0.268	0.182
	Модель 2	0.583	0.449	0.315
Корунья	Мареограф	1.020	0.794	0.568
	Модель 1	0.820	0.722	0.625
	Модель 2	0.617	0.473	0.330
Виго	Мареограф	1.145	0.887	0.628
	Модель 1	0.967	0.874	0.781
	Модель 2	0.691	0.530	0.369
Уельва	Мареограф	0.997	0.769	0.541
	Модель 1	0.765	0.691	0.616
	Модель 2	0.431	0.329	0.226
Тарифа	Мареограф	0.679	0.526	0.373

Таблица 4.6 – Максимальные отклонения уровня моря от среднего в метрах при различной вероятности для трех наборов данных

Модель 1	0.338	0.257	0.176
Модель 2	0.379	0.290	0.200

Также для большей наглядности различий в отклонениях уровня от среднего в области малых вероятностей для различных наборов данных, были рассчитаны разница значений, полученных по мареографам и по моделям 1 и 2. Результаты расчетов представлены в таблице 4.7 и таблице 4.8. По данным расчетом видно, что модель 2 занижает значения при вероятности 1% в среднем 0,2 м и с уменьшением процента вероятности наступления события эта разница увеличивается. Для модели 1 для трех станций (Корунья, Виго и Уельва) при вероятности в 1%, как уже отмечалось, завышает значения отклонений уровня моря относительно значений мареографов, однако далее показывает значения меньше в среднем на 0,2 м. Для станций Бильбао и Тарифа ситуация аналогична с ситуацией для модели 2, однако различия значений по модели 1 и по мареографам несколько больше, чем для модели 2.

Таблица 4.7 – Различия в отклонениях уровня моря рассчитанных по данным мареографа и данным модели 1 для пяти станций

Название	Δ при 0,01% , м	Δ при 0,1% , м	Δ при 1% , м
станции			
Бильбао	0.586	0.462	0.337
Корунья	0.201	0.072	-0.058
Виго	0.177	0.012	-0.153
Уельва	0.232	0.079	-0.075
Тарифа	0.341	0.269	0.198

Таблица 4.8 – Различия в отклонениях уровня моря рассчитанных по данным мареографа и данным модели 2 для пяти станций

Название	Δ при 0,01% , м	Δ при 0,1% , м	Δ при 1% , м	
станции				
Бильбао	0.358	0.281	0.204	
Корунья	0.404	0.321	0.238	
Виго	0.453	0.356	0.259	
Уельва	0.565	0.079	0.315	
Тарифа	0.300	0.236	0.173	

4.3 Распределение Гумбеля для рядов различной дискретности

Как известно, чем меньше дискретность данных и больше период выборки экстремумов, тем точнее можно определить экстремальные значения с малой вероятностью повторения. В связи с этим для данных мареографов были сопоставлены между собой распределения максимальных месячных значения, полученные по часовым данным и по среднесуточным данным, а также распределения для годовых максимумов, полученные по часовым данным, по среднесуточным и по среднемесячным.

Для годовых максимумов для всех станций имеется следующая закономерность (рис. 4.9): максимумы, выбранные по рядам среднемесячных значений, показывают наименьшие значения уровня, далее, с чуть большим значением идут максимумы, полученные по рядам среднесуточных значений, и далее максимумы, полученные по часовым данным. Значительное превышение значений функции распределения по часовым данным объясняется тем, что учитываются подъемы уровня за счет приливов, что исключается при рассмотрении среднесуточных значений. Однако в области малых вероятностей наступления экстремального события, а именно 1% (или что соответствует 1 разу в 100 лет), функции распределения Гумбеля для станций Бильбао, Уельва и Тарифа, рассчитанная для годовых максимумов, выбранных по суточным превышает значения функции распределения данным. для годовых максимумов, полученных по часовым рядам. Стоит оговорить, что в целом использовать ряд длиной 8-9 лет для оценки события таких малых вероятностей не совсем корректно. Желательно для таких оценок использовать ряд длинной не менее половины длины срока на который делается оценка, то есть для оценки события, которое может произойти раз в 100 лет, нужно использовать ряд длиной не менее 50 лет.

Сопоставление распределений максимальных месячных значения, полученные по часовым данным и по среднесуточным данным, также показало превышение функции распределения часовых данных над среднесуточными. В целом характер распределения для всех пяти станций схож, на рисунке приводится пример данных расчетов для станции Бильбао (рис. 4.10), остальные графики приведены в приложении В.



Рисунок 4.9 – Функции распределения Гумбеля на клетчатке вероятностей нормального закона распределения для годовых максимумов, полученных по данным разной дискретности (фиолетовая сплошная линия – часовые данные, зеленая сплошная линия – среднесуточные данные, голубая сплошная линия – среднемесячные) для станций Бильбао (а), Корунья (б), Виго (в), Уельва (г) и Тарифа (д) и распределение годовых максимумов соответствующей дискретности



Рисунок 4.10 – Функции распределения Гумбеля на клетчатке вероятностей нормального закона распределения для месячных максимумов, полученных по данным разной дискретности (красная сплошная линия – часовые данные, зеленая сплошная линия – среднесуточные данные), для станций Бильбао и распределение месячных максимумов соответствующей дискретности

В таблице 4.9 обобщены результаты по функциям распределения Гумбеля, рассчитанным по максимальным значениям, выбранным по рядам разной дискретности (суточная и часовая) за разный период (за месяц и за год). При выборе месячного максимума вероятность наступления события, равная 1%, означает, что событие может происходить 1 раз в 100 месяце или, что тоже самое, 1 раз в 8,33 года. Соответственно 0,1% - 1 раз в 1000 месяцев (или 1 раз в 83,33 года) и 0,01% - 1 раз в 10000 месяцев (или 1 раз в 833,33 лет). При выборе максимума за год вероятность наступления события, равная 1%, означает, что событие может произойти 1 раз в 100 лет. Таблица 4.9 – Сопоставление максимально возможных уровней моря с вероятностью наступления 0,01, 0,1 и 1 %, полученных по функции распределения Гумбеля, рассчитанной для рядов максимумов, выбранных по рядам различной дискретности (сутки и часы) за различные временные отрезки (год и меся)

Название	Дискретность	Период выборки максимумов	Вероятность, %		
станции	данных	уровня моря	0.01	0.1	1
Бильбао	среднесуточные	максимальный уровень моря за	3 330	3 1 1 9	2 908
		месяц	5.550	5.225	2
		максимальный уровень моря за год	7.449	6.365	5.278
	часовые	максимальный уровень моря за	5.674	5,362	5.049
		месяц		2.2.72	
		максимальный уровень моря за год	5.495	5.291	5.088
Корунья	среднесуточные	максимальный уровень моря за	3.745	3.518	3 292
		месяц			
		максимальный уровень моря за год	4.845	4.428	4.010
	часовые	максимальный уровень моря за	5.888	5.569	5.250
		месяц			
		максимальный уровень моря за год	5.897	5.643	5.389
Виго	среднесуточные	максимальный уровень моря за	3.231	2.973	2.715
		месяц			
		максимальный уровень моря за год	5.156	4.496	3.835
	часовые	максимальный уровень моря за	5.119	4.806	4.492
		месяц			
		максимальный уровень моря за год	5.311	5.017	4.723
Уельва	среднесуточные	максимальный уровень моря за	3.039	2.812	2.584
		месяц			
		максимальный уровень моря за год	6.788	5.697	4.605
	часовые	максимальный уровень моря за	4.786	4.522	4.258
		месяц			
		максимальный уровень моря за год	4.861	4.638	4.415
Тарифа	среднесуточные	максимальный уровень моря за	1.369	1.217	1.064
		месяц			
		максимальный уровень моря за год	4.137	3.354	2.571
	часовые	максимальный уровень моря за	2.155	1.972	1.788
		месяц			
		максимальный уровень моря за год	2.168	2.023	1.877

Сопоставляя полученные результаты можно сделать следующий общий вывод. При расчете функции распределения Гумбеля по максимумам, выбранным по часовым данным за месяц, значения вероятно возможных уровней моря превышают в среднем на 2 м значения для тех же процентов вероятности, полученным при расчете функции распределения по максимумам, выбранным по среднесуточным данным. Данное превышение обусловлено учетом приливов в часовых данных. Учитывая, что всё атлантическое побережье пиренейского полуострова испытывает значительные колебания уровня моря за счет приливов и возможны ситуации наложения подъёмов уровня под воздействием атмосферы и приливов, то желательно учитывать приливы в расчете экстремально возможных подъёмов уровня различной вероятности наступления.

При сравнении функций распределения Гумбеля, рассчитанным по максимумам, выбранным за год, наблюдается интересная особенность: для станций Бильбао, Уельва (для вероятностей 0,01 и 0, 1%) и Тарифа (для вероятностей 0,01-1%) вероятно возможные уровня моря выше при расчете функции по среднесуточным значениям, нежели при расчете по часовым.

Если сопоставлять уровне моря, полученные по максимумам, выбранным за меся ц и за год, можно сопоставить 1% (раз в 100 лет) для годовых максимумов и 0,1 % (раз 83,33 года) для месячных максимумов. Так для суточной дискретности для всех станций уровень, полученный по головым максимума, значительно (приблизительно на 1 м) превышает уровень, полученный по месячным максимумам. Для часовой дискретности обратная картина, однако отличия в уровнях моря в среднем составляют 0,1 м.

69

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По итогам проделанной работы можно сделать следующие выводы.

Несмотря на то, что между рядами моделей и мареографов существует статистически значимая линейная взаимосвязь, ряды значительно различаются по дисперсии. Так дисперсия данных мареографов на порядок выше дисперсии данных моделей. При сравнении спектральной структуры исходных рядов, было выявлено, что модельные данные отражают основные гармоники, которые также имеются и в рядах данных мареографов, однако не отражают весь спектр колебаний, присутствующий в изменениях уровня моря. При сопоставлении спектральной структуры рядов максимальных отклонений уровня моря, оказалось, что спектры, выявленные для модельных данных, отсутствуют в данных мареографов.

Что касается функций распределения экстремальных значений, то, в целом, обе модели занижают значения в области малых вероятностей наступления экстремального события (при 0,01 и 0,1 %) в среднем на 0,2 м, для трех станций (Корунья, Виго и Уельва) модель 1 в пределах от 1% до 99% значительно завышает (в среднем на 0,4 м) значения отклонений уровня моря от среднего.

В связи с этим основной вывод данной работы - непригодность использования модельных данных для оценки экстремальных уровней моря, так как как раз область малых вероятностей наиболее интересна при прибрежном строительстве и проектировании различных сооружений.

В целом функция распределения Гумбеля удовлетворительно описывает распределение максимальных значений уровня в данном регионе, однако распределение на некоторых станциях ближе к нормальному распределению (Бильбао и Корунья).

Что касается сопоставления функций распределения Гумбеля, полученных по рядам различной дискретности и выборке за различный период,

70

то в данном случае выводы неоднозначные, поскольку для станций Корунья и Виго максимальные значения уровня моря дают функции распределения, рассчитанные по часовым данным и когда максимуму, выбирался за год, а для станций Бильбао, Уельва и Тарифа максимальные значения уровня моря получены при выборе максимума также за год, но по среднесуточным данным. В связи с этим можно сделать вывод, что для каждой станции необходимо индивидуально подбирать оптимальную дискретность исходных для расчётов данных.

В целом оценки экстремальных уровней, полученные в данной работе, сопоставляются с оценками, полученными в работах, выпиленных ранее. Так для Кадисского залива максимальный астрономический прилив составляет 3,74 м, а в результате штормов подъем уровня может составлять до 50 см, в итоге 4,24 м. По годовым максимумам, полученным по среднесуточным значениям, уровень при вероятности 1% (1 раз в 8,33 лет) составляет 4,605 м. Для станций Виго и Корунья максимально зарегистрированные уровни моря относительно среднего за период 67 лет – это 2,51 м и 2,48 соответственно. При учете среднего уровня моря получается 4,6 м для Виго и 5,2 м для Коруньи. По данным расчетов этой работы при вероятности 1 % (1 раз в 100 лет) для годовых максимумов, полученных по рядам часовой дискретности уровень в Виго составляет 4,7 м, а в Корунье 5,4 м.
Список использованных источников

- El tiempo hoy [Интернет журнал]// www.eltiempohoy.es. URL: https://www.eltiempohoy.es/elcielo/meteorologia/cadiz-caleta-destrozos-olasviento-imagenes-redes-mar_0_2524200183.html (дата обращения 05.06.2018)
- Pugh, D.T., Tides, surges and mean sea-level: a handbook for engineers and scientists. Wiley, Chchester, 1987, 472 p.
- Коровин В.П. «Зарубежные технические средства в океанологии» СПб.: Гидрометиздат, 1994 г. - 196
- Руководство по расчету элементов гидрологического режима в прибрежной зоне морей и в устьях рек при инженерных изысканиях, Москва – 1973
- Cambio climático y oceanográfico en el Atlántico del norte de España// Temas de oceanografía, Madrid, 2012, №5, - p. 268
- Энциклопедический словарь Ф.А. Брокгауза и И.А. Ефрона. СПб.: 1890-1907.
- María D. Herrera Ximénez Caracterizacón de los ecosistemas del Golfo de Cádiz y Mar de Alborán. Recomendaciones para un enfoque ecosistémico, Universidad de Sevilla, - p.92
- Estrategia marina. Demarcación marina subatlántica. Parte I. Marco General. Evaluacióm inicial y buen estado ambiental, Madrid, 2012 – p. 131
- 9. F.J. Garcia-Prieto Geomprfology of the south-atlantic spanish coast// Sixth international conference on geomorphology, Filede trip Guide A4, p. 80
- Pablo Fraile Jurado, Mónica Agular Alba La influencia de la preción atmosférica y el viento en la variabilidad del nivel del mar en el mareógrafo de Bonanza (Cádiz)/ Departamento de Geografía Física y A.G.R. Universidad de Sevilla
- Elena Tel, M^a Jesús García Variabilidad regional del nivel medio del mar en la zona del Estrecho de Gibraltar/ 3^a Asemblea Hispano Portuguesa de Geodesia y

Geofisica, Valencia, 2002

- 12. Quality information document for For Global Ocean Reanalysis Products GLOBAL-REANALYSIS-PHY-001-025, Issue 3.5
- 13. Quality information document for IBI reanalysis Product IBI_REANALYSIS_PHYS_005_002, Issue 2.0
- Гордеева С.М «Практикум по дисциплине «Статистические методы обработки и анализа гидрометеорологический информации», РГГМУ – 2017
- Дружинин В.С., Сикан А.В. Методы статистической обработки гидрометеорологической информации, РГГМУ – 2001

Приложение А «Нахождение максимума»

program maximumssh2 dimension ssh(100000)!, day1(12) !ssh2(500,100), real maximum(3000) integer nn, y, k, day1(12) N=70128 !9125 !IBI !2920 ! 2920 для тарифы !3285 !8398 ! это для

мщдели кол-во

```
open(1, file='tarifa_tg_h.txt')
```

```
do i=1,N
read(1,*) ssh(i)
enddo
```

open(2, file='day.txt')

```
do k=1,12
read(2,*) day1(k)
enddo
```

open(3, file='max_tarifa_tg_h.txt')

```
nn=0
do y=2010,2017
do k=1,12
sshmax=-1e+10
maximum(k)=-1e+10
!nn=0
do j=1,day1(k)
```

do h=1,24

nn=nn+1

!print*, 'y=', y, 'k=', k, 'j=', j, 'nn=', nn, 'sshmax=', sshmax, 'ssh(nn)=', ssh(nn), 'maximum(k)=', maximum(k)

!pause 1
if(ssh(nn).gt. sshmax) then
maximum(k)=ssh(nn)
sshmax=ssh(nn)
!print*,'y=', y, 'k=', k, 'j=', j, 'nn=', nn, 'sshmax=', sshmax, 'ssh(nn)=', ssh(nn),
'maximum(k)=', maximum(k)

```
!pause 2
endif
endio !po h
enddo !j
enddo !j
enddo !k
!write(3, '(2i10, f10.7)') y, k, maximum(k)
!печать
do k=1,12
write(3, '(2i10, f11.7)') y, k, maximum(k)
enddo
```

```
enddo !y
```

!print*,'y=', y, 'k=', k, 'j=', j, 'nn=', nn, 'sshmax=', sshmax, 'ssh(nn)=', ssh(nn), 'maximum(k)=', maximum(k)

close(1) close(2) close(3)

end

Приложение Б «Уравнения трендов исходных среднесуточных данных»

Уравнения трендов уровня моря (h) рядов мареографов:

Бильбао: $h=4*10^{-5}*t+2,36$ Корунья: $h=3*10^{-5}*t+2,69$ Виго: $h=3*10^{-5}*t+2,06$ Уельва: $h=4*10^{-5}*t+1,99$ Тарифа $h=1*10^{-5}*t+0,67$

Уравнения трендов уровня моря (h) рядов модели 1:

Бильбао:	h=5*10 ⁻⁵ *t-0.379
Корунья:	h=4*10 ⁻⁵ *t-0,408
Виго:	h=3*10 ⁻⁵ *t-0,407
Уельва:	h=3*10 ⁻⁵ *t-0,457
Тарифа	h=4*10 ⁻⁵ *t-0,403

Уравнения трендов уровня моря (h) рядов модели 2:

Бильбао:	h=4*10 ⁻⁵ *t-0.366
Корунья:	h=4*10 ⁻⁵ *t-0,375
Виго:	h=4*10 ⁻⁵ *t-0,371
Уельва:	h=3*10 ⁻⁵ *t-0,368
Тарифа	h=3*10 ⁻⁵ *t-0,410

Приложение В «Функции распределения Гумбеля для месячных максимумов, полученных по данным разной дискретности»



Рисунок В1 – Функции распределения Гумбеля на клетчатке вероятностей нормального закона распределения для месячных максимумов, полученных по данным разной дискретности (красная сплошная линия – часовые данные, зеленая сплошная линия – среднесуточные данные), для станций Корунья и распределение месячных максимумов соответствующей дискретности



Рисунок B2 – Функции распределения Гумбеля на клетчатке вероятностей нормального закона распределения для месячных максимумов, полученных по данным разной дискретности (красная сплошная линия – часовые данные, зеленая сплошная линия – среднесуточные данные), для станций Виго и распределение месячных максимумов соответствующей дискретности



Рисунок В3 – Функции распределения Гумбеля на клетчатке вероятностей нормального закона распределения для месячных максимумов, полученных по данным разной дискретности (красная сплошная линия – часовые данные, зеленая сплошная линия – среднесуточные данные), для станций Уельва и распределение месячных максимумов соответствующей дискретности



Рисунок В4 – Функции распределения Гумбеля на клетчатке вероятностей нормального закона распределения для месячных максимумов, полученных по данным разной дискретности (красная сплошная линия – часовые данные, зеленая сплошная линия – среднесуточные данные), для станций Тарифа и распределение месячных максимумов соответствующей дискретности