

Министерство науки и высшего образования Российской Федерации Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ» Кафедра ПО ЮНЕСКО-МОК и КУПЗ

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА

(бакалаврская работа)

На тему условия формирования разрывных течений на Балтийской косе

Исполнитель

<u>Мехова Ольга Сергеевна</u> (фамилия, имя, отчество)

Руководить кандидат географических наук, доцент

(ученая степень, ученое звание)

<u>Густоев Дмитрий Владимирович</u> (фамилия, имя, отчество)

«К защите допускаю»

Заведующий кафедрой _

(подпись)

кандидат географических наук, доцент

(ученая степень, ученое звание)

Хаймина Ольга Владимировна (фамилия, имя, отчество)

«___»____ 2022 г.

Санкт-Петербург 2022

оглавление

Глава 1. Физико-географическое описание объекта	5
1.1. Балтийское море	5
1.2. Гданьский залив.	8
1.3. Балтийская коса	15
Глава 2. Разрывные течения	17
2.1. Приборы и оборудование	21
2.1.1. Дрифтеры	21
2.1.3. Инклинометр	24
2.1.4. Беспилотный летательный аппарат (БПЛА) и лагранжевые частицы (ЛЧ)	26
2.2. Реанализы, прогнозы, математические модели, базы данных	27
2.2.1. Выбор полигона	27
2.2.2. Реанализ, прогноз, математическая модель, метеоданные	28
2.3. Соц. опрос и информационные источники	29
2.4. Определение тренда	30
3. Разрывные течения по натурным данным и случаям из СМИ	32
3.1. Разрывные течения в работе Островского	32
3.2. Прибрежная практика	34
3.3. Случаи из СМИ и опроса	45
4. Межгодовая и сезонная изменчивость разрывных течений по данным реанализа	51
Заключение	63
Приложение 1	70
Приложение 2	71

Балтийская коса интереснейших является олним ИЗ мест Калининградской области. Расположение между Калининградским заливом и Гданьским заливом Балтийского моря, обусловленное аккумулятивными процессами, геоморфологическими a также принадлежность к ДВУМ государствам – России и Польше, обуславливает историческая важность и рекреационный потенциал района. Особое внимание стоит уделить песчаному пляжу, который тянется ровной полосой со стороны открытого моря. Приезжие любят это место за небольшие глубины близ берега, где, казалось бы, можно не волноваться за плавающих на мелководье детей. Однако, основываясь на рассказах местных жителей, на пляжах часто возникает такое опасное явление, как разрывное течение.

Водные потоки в прибрежной зоне Балтийской косы быстро меняются, как по времени, так и в пространстве. Они сильно зависят от ветровых условий. Течения на мелководье, могут создаваться как непосредственно ветром, так и волнами. На их динамику влияет сложная морфология дна. Встречаются как вдольбереговые, так и разрывные течения (РТ).

Разрывные течения в российской части Гданьского залива — это относительно новое направление исследований гидрофизических особенностей Балтийского моря. В 2020 году была проведена работа по определению условий формирования разрывных течений на Балтийской косе в 2020 году. Для этого использовалось различное оборудование. Также для обработки полученных измерений производились различные расчеты и сравнения. Так как для выполнений этой работы требовались не только научные источники, то дополнительная информация была получена с помощью опросов и информационных сайтов.

Возможность прогнозирования такого опасного явления, как разрывное течение, а также информирование об этом местных жителей и отдыхающих, приведет к уменьшению бессмысленных жертв.

3

Цель работы:

Определить условия формирования разрывных течений в районе Балтийской косы.

Задачи работы:

- 1. Найти материалы и изучить методику определения разрывных течений
- 2. Установить критерии, по которым будут определяться разрывные течения
- 3. Сравнить условия зафиксированных в литературе фактов разрывных течений с данными прогноза и реанализа.
- 4. Сравнить условия зафиксированных в СМИ и соцопросе фактов разрывных течений с данными прогноза и реанализа.
- 5. По ряду реанализа, за период с 00 часов 1 января 1979 года по 18 часов 31 декабря 2021 года, используя выбранные критерии определить количество случаев, когда условия подходили для формирования разрывных течений.
- 6. Проанализировать межгодовую и сезонную изменчивость.
- 7. Определить сопутствующие разрывным течениям факторы.

Глава 1. Физико-географическое описание объекта

1.1. Балтийское море.

Балтийское море является частью Атлантического океана. Протяженность с севера на юг составляет 12°10', от 65°50' с.ш. до 53°40' с.ш., и это составляет около 1350 км. Протяженность с запада на восток составляет 20°50', от 9°25' в.д. до 30°15' в.д., что так же составляет примерно 1350 км (рис.1.1). Из-за того что море вытянуто и по параллели по меридиану разные его районы находятся в разных климатических и физико-географических зонах [1].



Рис 1.1. Карта Балтийского моря [1].

Балтийское море целиком лежит в пределах шельфа – имеет максимальные глубины до 459 метров. Это самое крупное материковое море северной Европы. Общая площадь Балтийского моря 422.6 км². Самые крупные заливы, входящие в состав моря, это Ботнический, занимающий около 28% площади моря, Финский, занимающий 7% и Рижский, площадь которого составляет 4.5% от всей площади Балтийского моря. На 2019 год объем моря определялся в 20080 км³ [2]. Западная граница Балтийского моря проходит между мысом Скаген и юго-западной оконечностью острова Черн. Балтийское море взаимодействует с Северным морем через группу Датских проливов. Пролив Малый Белт, в самом узком месте имеет ширину 0.5 км. Пролив Большой Бельт 3.7 км. Пролив Эресунн/Зунд 10.5 км. Самые большие проливы это Каттегат и Скагеррак, имеющие ширину 60 км и 110 км. Все эти проливы достаточно мелководны, они имеют глубины на порогах от 7 до 18 метров. Относительная узость проливов и их малые глубины затрудняют водообмен между Балтийским и Северным морями. Это отражается на формировании природных особенностей Балтийского моря [3].

У Балтийского моря большая зона водосбора, в него впадает около 250 рек. Самые крупные из которых это Нева, Висла, Неман, Западная Двина. По территории моря пресноводный сток распределяется неравномерно. Самое большое количество речной пресной воды поступает в Ботнический и Финский заливы. Всю водную массу в Балтийском море можно условно разделить на две части. Более пресные воды, которые с поверхностным течением уходят из Балтийского моря в Северное море, и соленые североморские воды, которые через Датские проливы приходят с придонным течением. Сильные западные ветра, обычно, усиливают приток соленой воды, восточные — сток более пресной воды из Балтийского моря. Циркуляция воды в море происходит против часовой стрелки, т.е. циклоническое движение. Постоянные скорости течений небольшие, около 3-4 см/с. Так как скорости малы, то такие течения становятся неустойчивыми, и могут нарушаться под воздействием ветров.

6

Балтийское море достаточно мелководное, средняя глубина составляет 48 метров (рис.1.2). Глубин до 50 метров занимают больше половины всей площади моря. При этом глубины, превышающие 200 метров, занимают только 0.3%.



Рис. 1.2. Карта рельефа дна Балтийского моря [3].

Максимальная глубина в 459 метров находится к северу от острова Готланд в Ландсортской впадине[4]. В центральной части Балтийского моря есть две больших котловины, Готландская с глубиной до 250 метров и Гданьская, где максимальная глубина достигает 116 метров (рис.1.3). И сравнительно неглубокие впадины в западной части моря, Арконская впадина глубиной 53 метра и Борнхольмская с глубиной 105 метров [5].



Рис.1.3. Расположение основных впадин и районов Балтийского моря. ГП – Готландский порог, ГС – остров Готска-Сандён [4].

1.2. Гданьский залив.

Гданьский залив является частью Балтийского моря. Залив имеет протяженность 74 км, его ширина у входа 107 км, а максимальные глубины достигают 115 метров [7]. Залив располагается в юго-восточной части Балтийского моря, между Самбийским / Клининградским полуостровом на востоке и полуостровом Хель на западе. На севере Гданьский залив свободно сообщается с Балтийским морем. С южной стороны он ограничен материком и Балтийской косой, которая отделяет его от Калининградского залива. Т.е. воды Гданьского залива омывают берега двух стран: Польши и России. Гданьский залив является самой западной частью нашей страны. Он относиться к Калининградской области, которая не имеет материковой связи с Россией, но при этом Гданьский залив является одним из крупных культурных и экономических центров нашей родины. На берегах залива отдыхают туристы и местные жители. Они приезжают, чтоб побыть на природе, искупаться, порыбачить. В Гданьском заливе находятся порты и нефтяные терминалы, здесь много лет происходит добыча рыбы и янтаря, ведется активная научная деятельность (рис.1.4.). В Калининграде есть Атлантическое Отделение Институт океанологии им. П.П. Ширшова, АО "Научно-Промышленное объединение "АТЛАНТРЫБФЛОТ", НИИ рыбного хозяйства и океанографии Атлант, НИЦ Прибалтийская археология. Здесь находится Атлантическая база флота.



Рис.1.4. Гданьский залив [6].

Водообмен в заливе происходит с одной стороны, через узкий Балтийский пролив с Калининградским заливом, в котором, за счет притока рек, вода более пресная. С другой стороны, существует свободный обмен водной массы с Балтийским морем. Так же существует приток воды за счет впадающей в залив реки Висла. В работе [8] были рассмотрены сезонные колебания уровня Балтийского моря на основе данных полученных с 18 российских прибрежных станций. Станции располагались в разных частях Балтийского моря (рис.1.5).



Рис.1.5. Расположение станций, данные которых были использованы в настоящем исследовании [8].

Показано, что в Балтийске минимальные значения сезонного хода уровня моря наблюдаются с марта по июнь, максимальные в осенний период (рис.1.6,а). И если величина и время регистрации минимальных значений остается практически без изменений, то для максимальных значений есть различия. Так, в период с 1977 по 1987 гг. максимум наступал в сентябреоктябре, а в период с 2005 по 2015 гг. это был ноябрь. С 1994 по 2002 гг. в сентябре-октябре появился вторичный минимум сезонного хода уровня моря.



Рис.1.6.а, б. Сезонные колебания уровня Балтийского моря на станции Балтийск с 1977 по 2015 гг (а). Изменения размаха сезонных колебаний уровня моря на станциях Пионерский, Балтийск, Краснофлотское, Калининград,

Открытое (б) [8].

Размах сезонных колебаний уровня на всех станциях российской части юго-восточного побережья Балтийского моря существенно меняется от года к году. В целом для всех пяти рассматриваемых станций характерны тенденции уменьшения размаха сезонных колебаний (рис.1.6,б). Для Балтийска он составляет –0.36 см/год. Эта работа [8] показала, что в период с 1990 по 2005 гг. в юго-восточной части Балтийского моря произошло смещение годового цикла с октября-декабря к январю-февралю.

Сезонная изменчивость температуры воздуха, скорости и направления ветра рассмотрена по данным метеостанции города Балтийск, имеющей координаты 54°38'26.0"N 19°53'12.0"E (рис.1.7. а,б). Данные были скачены с сайта [Ошибка! Источник ссылки не найден.]. Рассматривался период с 1 нваря 1979 года до 31 августа 2020 года. Срочные данные по температуре воздуха, направлению и силе ветра были осреднены и получены среднемесячные значения.



Рис.1.7 а,б. Расположение метеостанции (а) и метеоплощадки (б) города Балтийск, координаты 54°38'26.0"N 19°53'12.0"E [6].

Среднемесячные значения температуры воздуха за исследуемый период представлены на рисунке 1.8. Минимальные значения среднемесячных температур наблюдаются в основном с середины ноября по февраль.



Рис.1.8. Сезонные изменения температуры воздуха по данным с метеостанции Балтийск с января 1979 по август 2020гг.

Есть периоды, когда в эти месяцы отсутствуют отрицательные значения температуры, при этом, кроме отдельных случаев, температура не превышает значения +4°С. Максимальные значения температуры приходится на летние месяцы. Видно, что начиная с 1987 года максимально значение увеличилось, и превышать 18°C. В стало те года, когда происходит увеличение периода, продолжительности теплого температуры зимой принимают положительные значения. Это хорошо прослеживается в периоды с 1998 по 1994 гг. и с 2017 по 2020 гг. Более подробные графики среднемесячных температур воздуха можно посмотреть в приложении 1.

На гидрометеорологический режим Гданьского залива важное влияние оказывает атмосферная циркуляция. Для определения сезонной изменчивости скоростей и направлений ветра были построены розы ветров для каждого месяца (рис.1.9.). Предварительно срочные данные метеостанции осреднялись по векторам. В районе Балтийска преобладают ветра западных румбов. Наибольшие скорости наблюдаются в осенне-зимний период. Максимальные значения ветра приходятся на январь и достигают 25 м/с. Самые слабые ветра в апреле и мае и их скорость колеблется в пределах 2-3 м/с. С сентября по март дуют в основном ветра юго-западных направлений. В апреле и мае ветра слабеют и, хотя большая часть имеет северо-западное направление 3-3C3. На гидрометеорологический режим Балтийской косы и Гданьского залива важное влияние оказывает атмосферная циркуляция.



Рис.1.9. Сезонные изменения скорости и направления ветра по данным с метеостанции Балтийск с января 1979 по август 2020гг.

На халинный режим залива оказывает влияние речной сток и Северное море, за счет которого происходит приток более соленой воды [9, 11]. Гданьский залив — это активная гидродинамическая зона. Здесь наблюдаются такие явления, как апвеллинги, вихри, плюмы, разрывные течения (рис. 1.10. а,б,в).



Рис.1.10. Плюм (а), вихри (б,в) [6].

1.3. Балтийская коса

Балтийская коса, протяженностью 65 км, представляет собой полосу суши, которая отделяет Гданьский залив от Калининградского (Вислинского) залива. Со стороны открытого моря вдоль всего берега тянется полоса песчаного пляжа, за которой тянется полоса дюн, поросшая травой и деревьями. Сам берег имеет волнообразную форму. Глубины у берега небольшие, присутствуют бары, которые выглядят как подводные песчаные валы. С северной стороны коса заканчивается Балтийским проливом, активно используемым для судоходства. Для того чтоб обезопасить пролив от ветра и волн здесь расположен мол. Он имеет длину 650 метров, и оказывает влияние на циркуляцию прибрежных вод (рис.1.10 а).

Морские волны влияют на формирование береговой линии. Так как на Балтийской косе вся береговая линия это песчаные пляжи, то происходит постоянное перемещение прибрежных наносов и их аккумуляция, т.е. положение песчаных мысов и подводных баров изменяется (рис.1.11).



Рис.1.11. Изменение береговой линии [6].

Глава 2. Разрывные течения

Природное явление – течение с высокими скоростями, направленное от берега в сторону открытого моря, может быть знакомо под разными названиями: разрывное или отбойное течение, рип. Жители Калининградской области иногда называют его тягуном, за свойство утягивать пловцов в открытое море.

Согласно [12], разрывные течения – это циркуляция вод, которая образуется в результате волнового нагона. В своей работе Davis [13] описывает разрывное течение как, один из видов возвратного донного течения, направленное в море которое периодически прорывает линию прибоя вдоль берега. Разрывное течение (РТ)— rip current — является прибрежным течением, которое может развивать скорость до 50 см/с при спокойной погоде и до 2 м/с в шторм [14]. Течение представляет собой стремительную струю воды, образующуюся в зоне прибоя [15]. Такой поток всегда направлено в сторону моря, практически под прямым углом [16]. Струи разрывных течений могут находиться друг от друга на расстоянии от нескольких десятков до нескольких сотен метров, в зависимости от условий топографии дна и берега. Само разрывное течение имеет ширину несколько метров, в отдельных случаях несколько десятков метров. При этом между струями разрывных течений поток воды в основном направлен вдоль берега [17].

РТ можно разделить на три основные части (рис.2.1). Первая — это подпитывающее течение (rip feeder current). Оно создается разрушающимися волнами, которые двигаются практически параллельно берегу. Два потока, двигаясь навстречу друг другу, сталкиваются и узкой струей прорываются в сторону моря, образуя вторую часть структуры, собственно РТ (rip current). Струя, удаляясь от берега постепенно расширяется. Третья часть — голова РТ (rip head), находится на расстоянии от берега, там, где происходит резкое расширение потока с одновременной потерей скорости. Часть этой воды может быть снова подхвачена и с волнами будет перенесена к берегу, таким образом,

завершая циркуляционную ячейку [13] (рис.2.1). Пространственный масштаб процесса РТ напрямую зависит от силы волнения и топографии дна [15, 16].



Рис.2.1 Схема формирования разрывного течения [14].

В работе [18] говориться, что существуют такие участки побережья, где разрывные течения встречаются очень часто. Такое течений может быть очень стабильным, и такое будет находиться в одном месте по несколько дней, или, под воздействием разных факторов, будет смещаться вдоль береговой линии. В статье [14] рассматриваются разные механизмы генерации разрывных течений. На основе полевых, лабораторных и модельных работ была создана классификация различных видов разрывных течений (рис.2.2).



Рис.2.2. Механизмы генерации разрывных течений [14].

Условия, способствующие возникновению разрывных течений, могут быть различны. Это явление может быть на ровных пляжах и на пляжах со сложной морфологией; когда волна подходит параллельно к берегу и под углом; на открытых пляжах и в местах с жесткими границами (например, волнорезами).

Работы, написанные по разрывным течениям, в основном выполнены зарубежными авторами. Рипы в южной части Балтийского моря малоизучены. В работе [19] на основе полевых исследований проведенных в районе Любятово (Польша) представлены результаты, показывающие условия, при которых могут возникать разрывные течения. Такие течения наблюдались только в мелководной части прибрежной зоны, в прибойной зоне, в начале ноября 2017 года. Были зафиксированы скорости разрывных течений от 14 см/с до 34 см/с. В этой работе был сделан вывод, что вероятность возникновения таких течений выше, когда приходят длинные волны.

В работе [20] говориться, что РТ не являются частым явлением в южной части Балтийского моря. Они могут возникать на стадии стихания шторма, при этом имеют небольшие скорости. Были получены результаты по средней скорости, которая составляет 17 см/с, при зафиксированной максимальной скорости в 30 см/с.

В работе [21] описываются результаты по формированию разрывных течений на Балтийской косе в августе 2020 года. Были проведены измерения с использованием дрифтеров, лагранжевых частиц, инклинометра. Результаты этих измерений будут рассматриваться в этой работе.

2. Приборы и методы.

Для проведения исследования условий формирования разрывных течений на Балтийской косе работа была разделена на несколько частей. Первая часть заключалась в непосредственных измерениях, которые проводились на выбранных полигонах. Для этого использовалось оборудование, предоставленное Атлантическим Института отделением океанологии Российской Академии Наук (АО ИО РАН). Ко второй части можно отнести работу с базами данных: реанализами, прогнозами, математическими моделями. рамках третьей части работы проведены опросы на местности и В дистанционно в соц. сетях, а также поиск информации в СМИ для определения несчастных случаев вследствие возможных разрывных течений.

2.1. Приборы и оборудование.

2.1.1. Дрифтеры.

Во время проведения экспедиционных исследований на Балтийской косе использовались три дрифтера (рис.2.1.1.).



Рис.2.1.1. Устройство дрифтера.

Дрифтеры состоят из влагозащитного бокса (А), вставленного в металлический стержень (В). Надводный поплавок (С) находится посередине

стержня (В). Подводный парус (D) прикреплен к стержню на веревке. У дрифтера №1 имеется передатчик с характеристиками 433 МГц и дальностью 2 км; парус складной, соотношение надводной части к подводной около 1/58 (таблица 2.1.1.). Данные считываются с дрифтера с помощью программы Terminal. У дрифтеров №11 и №17 внутри бокса находятся GPS для определения местоположения и GSM модем для передачи координат в реальном времени. Данные геопозиции дрифтеров принимаются с помощью авторской программы А.Н.Граве (инж-иссл. АО ИО РАН) и записываются на сервер. Файл с данными скачивается с сервера и с помощью программы Google Earth переданные траектории дрифтеров визуализируются.

№ дрифтера	S [см ₂]	Тип
1	3124	Радиопередатчик
11	5100	GPS
17	7000	GPS

Таблица 2.1.1. Характеристики дрифтеров

Средняя скорость течения вычислялась на линейных отрезках траектории движения. Для каждого дрифтера было выделено несколько выраженных отрезков пути. По географическим координатам были вычислены соответствующие расстояния. Время движения было получено из данных с дрифтера.

2.1.2. Построение карты батиметрии.

Для создания карты батиметрии использовались GPS-навигатор Garmin GPSmap 60Cx, рейка, а также однолучевой эхолот Garmin GPSmap 421s. Измерения глубины проводились в течение двух дней. В первый день 18 августа 2020г. проводился пеший промер. С помощью GPS-навигатора записывались координаты точек, в которых глубины измерялась с помощью размеченной рейки. Во второй день 21 августа 2020г. были проведены измерения эхолотом с моторной лодки BRIG. Антенна эхолота устанавливалась на корму лодки с заглублением 25см. Промеры проводились параллельными галсами. Расстояние между галсами 10 метров, средняя длина галсов была 200 метров. Используя приложение «Геотрекер» были зафиксированы координаты береговой линии.

Для работы с данными GPS использовались программы: EASYGps для считывания данных с устройства (рис.2.1.2.) и OziExplorer для перевода данных в необходимый формат (рис.2.1.3.).



Рис.2.1.2. Интерфейс программы EASYGps.



Рис.2.1.3. Интерфейс программы OziExplorer.

В программе OziExplorer нужные точки или треки выделяются и экспортируются из формата Gps Exchange File в Excel или текстовый документ.

2.1.3. Инклинометр.

Для определения скоростей течений использовался разработанный в АО ИРАН инклинометрический измеритель скорости придонных течений (ИСПТ) (рис.2.1.4.). ИСПТ представляет собой физический маятник с закрепленной относительно дна точкой подвеса. Маятник устанавливается в неподвижной воде вертикально под действием положительной плавучести и отклоняется от вертикали силой гидродинамического давления в направлении набегающего потока до достижения равновесия моментов гидродинамической и архимедовой сил. Информацию о скорости и направлении течения дают измеряемые угол и используется направление отклонения, для чего трехкомпонентный акселерометр и магнитометр, размещаемые неподвижно внутри тела маятника вместе с электронным блоком управления и накопления данных [22].



Рис.2.1.4. Упрощенная схема ИСПТ: 1 – гермоконтейнер с электроникой, 2 – жесткая перфорированная оболочка, 3 – шарнирное крепление подвеса, 4 – поплавок, 5 – груз – подставка, U – скорость набегающего потока, Fd – сила гидродинамического сопротивления, Fc – равнодействующая гидростатической

силы и силы тяжести гермоконтейнера, *Fb* – равнодействующая гидростатической силы и силы тяжести оболочки (отрицательная плавучесть), *Ff* – равнодействующая гидростатической силы и силы тяжести поплавка [22].

Прибор построен по модульному принципу (рис.2.1.5.). Каркасом модульной сборки является цилиндрическая оболочка, изготовленная из трубы ПВХ с перфорированными стенками. Внутри оболочки соосно размещены приборный модуль – гермоконтейнер с постоянной положительной плавучестью, и модуль плавучести – дополнительный поплавок, необходимый для регулирования результирующего момента сил плавучести. Подвижная часть прибора прикреплена с помощью подвеса к тяжелому неподвижному грузу – платформе. В качестве подвеса используется короткая металлическая цепочка, состоящая из нескольких звеньев, позволяющая телу маятника отклоняться от вертикали на угол до 60–70° в любом азимутальном

направлении без соприкосновения с платформой. Массивные элементы находятся внутри гермоконтейнера. Все элементы сборки, за исключением подвеса, выполнены из материалов с плотностью, близкой к плотности воды[22].



Рис.2.1.5. Конструкция ИСПТ. 1 – перфорированная оболочка (длина 1 м, диаметр 0.11м), 2 – модуль дополнительной плавучести (поплавок), 3 – приборный модуль, 4 – донный груз (2 кг), 5 – подвес (цепочка) [22].

2.1.4. Беспилотный летательный аппарат (БПЛА) и лагранжевые частицы (ЛЧ).

Для определения скорости И направления течений рамках В экспедиционных исследований использовался метод Лагранжа. Для этого использовалась видеосъёмка с БПЛА и лагранжевы частицы. Было необходимо картировать траектории частиц, чтобы соотнести их перемещение со временем. Использовались два БПЛА: DJI Mavic -2 Enterprise и Mavic mini. Работа с БПЛА осуществлялась группой из двух человек. В качестве ЛЧ использовались белые строительные мешки с пустой пластиковой бутылкой внутри для плавучести. Для определения координат были установлены реперные точки (точки с известными координатами). Далее использовались скриншоты с видеозаписи, на которых четко видны реперные точки и лагранжевы частицы. По координатам реперных точек снимки привязывались к географическим координатам. Таким образом, были получены точки перемещения лагранжевых

частиц. Чтоб определить скорость перемещения частиц, было взято расстояние, вычисленное по координатам ЛЧ, и время, затраченное на это перемещение, определенное по видеозаписи.

2.2. Реанализы, прогнозы, математические модели, базы данных.

2.2.1. Выбор полигона.

Для формирования разрывных течений важную роль играет волнообразная береговая линия. По спутниковым снимкам с платформы GOOGLE EARTH был определен полигон с наиболее изрезанным берегом, свидетельствующим об активной динамике наносов, и следовательно о сильных течениях, и с подводным баром (рис.2.2.1.).



Рис.2.2.1. Первый полигон для исследований [23].

Кроме полигона, выбранного по спутниковым снимкам был выбран еще один участок для исследования, рядом с улицей Школьная. Основанием для этого послужили рассказы местных жителей о том, что в этом районе в море часто бывают потоки, которые утягивают пловцов от берега. Это место было интересно тем, что, на возможное возникновение разрывных течений, здесь оказывает влияние расположенный с северной стороны мол (рис.2.2.2.).



Рис.2.2.2. Второй полигон для исследований [23].

2.2.2. Реанализ, прогноз, математическая модель, метеоданные.

Данные по температуре поверхности моря, скорости и направлению ветра были взяты с сайта Гавайского центра данных для исследования климата — Азиатско-тихоокеанский информационно-исследовательский центр (APDRC) [24]. Для определения сезонной изменчивости температуры поверхности моря были взяты среднемесячные значения за период с января 1979 по август 2020 года. Для исследования скорости и направления ветра были взяты ежечасные значения с 00 часов 1 января 1979 года по 23 часа 31 августа 2020 года. Использовались данные реанализа ERA5 - это реанализ пятого поколения Европейского центра среднесрочных прогнозов погоды (ECMWF) для глобального климата и погоды за последние несколько десятилетий. В настоящее время доступны данные с 1950 года. Эти данные разделены на записи климатических данных за 1950-1978 гг. и данные, начиная с 1979 года по текущий момент. Реанализ ассимилирует в модель натурные наблюдения, а также спутниковые данные. Так как число ассимилированных наблюдений с годами увеличивается, то это приводит к улучшению качества получаемых данных. ERA5 обновляется ежедневно с задержкой около 5 дней [25]. Данные пересчитываются на регулярную сетку широты и долготы 0,25 градуса (0,5 и 1 градус соответственно для океанских волн) [26].

Дни проведения измерительных работ были выбраны на основании волновых прогнозов, выполненных в модели SWAN (Simulating Waves Nearshore). Эта модель используется для оперативных региональных прогнозов волн [27]. Так же для исследования использовались данные прогнозируемые с помощью модели SWAN по направлению и силе ветра, на основе скачанных данных с [28].

Для анализа условий сопутствующих возникновению разрывных течений использовались срочные данные по температуре, направлению и скорости ветра со станции Балтийск, скачанные с [9].

Для того, чтоб проанализировать длинный временной ряд на наличие волновых условий сопутствующих разрывным течениям использовалась модель SWAN в которую в качестве вынуждающей силы задавались значений ветра на высоте 10 метров двух реанализов: NCEP/CFSR (Climate Forecast System Reanalysis) и реанализа NCEP/CFSv2 (Climate Forecast System Version 2) [29]. Использование обусловлено ДВУХ реанализов ИХ разным временным охватом И пространственным разрешением. Реанализ NCEP/CFSR покрывает временной период в 32 года с 1979 по 2010 г. Временной шаг реанализа составляет 1 ч, пространственное разрешение ~0,3125°×0,3125°. Реанализ NCEP/CFSv2 охватывает период с 2011 г. по настоящее время и имеет более высокое пространственное разрешение ~0,205°×0,204° [30].

2.3. Соц. опрос и информационные источники.

Для лучшего понимания, где и в какие дни могли быть разрывные течения, проведена работа с основными новостными информационными

источниками [31, 32, 33]. На этих сайтах найдены статьи, в которых говорится, что люди пострадали или погибли, в связи с сильным течением. Отбиралась информация только по российским морям. Из 32 найденных статей только 12 описывали события на российской территории, и из них только 4 упоминания Балтийского моря.

Также проведен опрос с помощью онлайн-сервиса Google Forms [34]. В нем участвовали люди разного возраста, места проживания и уровня образования. Всего в опросе приняло участие 111 человек. Задавались вопросы для определения общего понимания явления разрывных течений, и была серия вопросов для определения, где и когда встречались с этим явлением. Отвечая на вопрос о том, сталкивались ли они сами или их знакомые с разрывными течениями больше половины участников дало отрицательный ответ (рис.2.3.1.).



Рис.2.3.1. Диаграмма показывает количество положительных и отрицательных ответов в % на вопрос: сталкивались ли Вы сами или Ваши знакомые с разрывными течениями [34].

2.4. Определение тренда.

Для определения наличия тренда межгодовой изменчивости была выдвинута нулевая и альтернативная гипотезы: H0: r = 0; H: r \neq 0. Для проверки гипотезы использован критерий Стьюдента. Формулы для расчета: $t = \frac{|r|}{\sigma r}$;

 $\sigma r \frac{1-r^2}{\sqrt{(N-2)}}$, где t — критерий Стьюдента, σr — средняя квадратичная ошибка. Критическое значение критерия Стьюдента tкр (α , υ) определяется при α =5% (уровень значимости), и υ =N-2 (число степеней свободы), где N — длина ряда. Сравниваем t и tкр, если t > tкр, то нулевая гипотеза отвергается и коэффициент корреляции значим, если t < tкр, то оснований отвергать нулевую гипотезу нет и коэффициент корреляции незначим [35].

3. Разрывные течения по натурным данным и случаям из СМИ

Для определения условий разрывных течений можно рассматривать натурные измерения, а также случаи, о которых сообщается в СМИ и в специально проведенном опросе.

3.1. Разрывные течения в работе Островского

В работе [19] по данным полученным в эксперименте 2017 года сделано предположение, при каких условиях возможно формирования РТ на южном побережье Балтийского моря. Исследования проходили в прибрежном районе вблизи Любятово, которое рассматривается как типичное песчаное побережье южной Балтики. Результаты исследования показали, что в районах Любятово, Лебы, косы Хель в конце октября — начале ноября 2017 года в основном фиксировались вдольбереговые течения. Для формирования РТ согласно работе требуются специфические условия: волна должна подходить к берегу перпендикулярно, или почти перпендикулярно; значимая высота волны Нs должна находиться в диапазоне 0.7-1.5 метра, при этом максимальные скорости РТ бывают при Hs от 0.8 до 1.1 метра; период волны должен быть от 5 секунд и более. Разрывные течения были зафиксированы только 3 ноября 2017г.; условия, при которых они сформировались, представлены в таблице 3.1.1. Измерения проводились несколькими дрифтерами.

Таблица 3.1.1. Условия при которых зафиксированы РТ 3 ноября 2017г., в районе Любятово.

Дата	№ дрифтера	Время	Направле ние береговой линии, °	Нs, м	T(Hs), c	Направле ние волны, °	Направлен ие ветра, °	V max, м/с
	4	07:30-08:00	69	0.99-1.07	4.4-5.7	327-345	336-348	0.34
	4	09:35-10:09	69	0.90-0.99	5.3-6.1	330-344	238-290	0.14
3 ноября	9	07:24-07-49	69	1.00-1.07	4.4-5.3	334-345	336-348	0.22
2017г.	9	10:00-10:59	69	0.87-0.96	5.3-6.3	330-353	204-285	0.15
	10	07:48-08:45	69	0.94-1.00	5.0-5.9	327-345	306-348	0.26
	10	09:29-12:28	69	0.82-0.99	5.1-6.3	330-357	204-290	0.25

Для анализа данных, рассчитанных при помощи модели SWAN, в рамках задачи по идентификации РТ, проведено сравнение данных за 3 ноября 2017

года, полученных в ходе эксперимента Островского в районе Любятово и моделирования SWAN (таблица 3.1.2).

Таблица 3.1.2. Данные волнения полученные моделью SWAN на 3 ноября 2017 года в районе Любятово.

Дата	Время	Направле ние береговой линии, °	Hs, м	T(Hs), c	Направле ние волны, °	Направлен ие ветра, °
	00:00	69	0.86	4.2	314.17	343.9
	03:00	69	0.82	3.97	328.68	337.7
	06:00	69	0.79	4.23	339.73	333.7
3 ноября	09:00	69	0.71	4.57	345.47	283.6
2017г.	12:00	69	0.63	4.5	349.74	86.3
	15:00	69	0.6	3.87	348.6	75.5
	18:00	69	0.6	3.54	335.31	78.9
	21:00	69	0.64	3.77	317.23	63.3

Результаты сравнения показывают, что данные полученные моделью SWAN подтверждают, что условия для РТ выполняются. Направление и скорость ветра, а также направление и высота значительных волн представлены на рис.3.1.1.



Рис.3.1.1. График направления и скорости ветра, направления и высоты волны. По оси X отсчет начинается от 1 ноября 2017 года 00:00 часов, каждые 3 часа. 3-му ноября 2017г. соответствуют сроки с 17 по 24.

Для дальнейшего анализа данных моделирования были определены критерии возникновения разрывных течений. Направление волны перпендикулярно берегу, допускается отклонения от перпендикуляра не более чем на 22.5° в одну либо другую сторону (т.е. сектор 45°); Hs > 0.7 м; T > 4.4 с. Так как в районе Балтийской косы береговая линия имеет направление 30° , то направление подходящей волны должен попадать в диапазон 277.5-322.5°.

3.2. Прибрежная практика

В августе 2020 года на Балтийской косе, в рамках прибрежной практики ПУ ИО РАН была проведена серия измерений для определения условий возникновения РТ на российской части Балтийской косы [21]. Измерения проводились 19, 23 и 24 августа 2020г (таблица 3.2.1).

Таблица 3.2.1. Работы, проведенные на Балтийской косе.

Дата	Прогноз	Полигон	Лагранжевые частицы	Дрифтеры	Инклинометр	Реанализ
19.08.2020		1		1 запуск		График направления
23.08.2020	SWAN	2	запуски			и скорости ветра, направления и
24.08.2020	50111	1	Sallyean	4 запуска	поставлен	высоты волны

Дни для измерений были выбраны на основании прогнозов направления ветра и высот волн, выполненных в модели SWAN (таблица 3.2.2). Для визуализации были построены карты. Пример карты представлен на рис.3.2.1.

Таблица 3.2.2. Данные по направлению ветра и высоте волны на 19, 23, 24 августа 2020 года. Прогноз получен с использованием модели SWAN.

	19.08.2020	23.08.2020	24.08.2020
Направление ветра	C, C3	C3	З, ЮЗ
Высота волны	0.3-0.5 м	0.8-1.0 м	1.0-1.3 м



Рис.3.2.1. Направление ветра и высота волн 19.08.2020г. на 16 часов. Время на карте указано по Гринвичу [21].

Во все выбранные дни проводились запуски лагранжевых частиц, положение которых фиксировалось с БПЛА. 19 и 24 августа параллельно выполнялись запуски дрифтеров (таблица 3.2.3), все траектории движений дрифтеров были отмечены на карте батиметрии. 24 числа также был установлен инклинометр.

Таблица 3.2.3. Данные о времени и перемещении дрифтеров 19 и 24 августа 2020 года.

Дата	№ запуска	№ дрифтера	Координа движ	ты начала кения	Начало движения, СМТ	Координаты кон	ца движения	Конец движения, СМТ
			Долгота	Широта	GMI	Долгота	Широта	Givii
19.08.2020	1	11	19,848733	54,60725	15:03:05	19,847433	54,605933	15:45:12
24.08.2020	1	1	19,84877	54,60723	10:52:08	19,84998	54,60845	11:01:38
24.08.2020	2	1	1 19,84916 5		11:24:36	19,84955	54,60784	11:26:44
24.08.2020	1	17	19,848467	54,60715	10:46:18	19,85015	54,60862	11:05:16
24.00.2020	2	17	19,84847	54,60702	11:10:10	19,8497	54,60812	11:24:25

19 августа 2020 г. прогноз показал, что в районе Балтийской косы ветер должен иметь С и СЗ направление, а высота волнения составлять около 0.3-0.5 метра. Измерения проводились на первом полигоне (см. раздел 2.2.1). Была зафиксирована скорость ЛЧ в сторону берега от 0.07 до 0.27 м/с (рис.3.2.2). Движение происходит по каналу и совпадает с направлением ветра. Прибрежная струя проходит между баром и берегом. Другая часть потока прижимается к бару. Траектории ЛЧ прижаты к бару за счет дифракции волн (рис.3.2.3).



Рис.3.2.2. Принципиальная схема движения ЛЧ 19 августа 2020 г. Сплошными цветными линиями показаны основные траектории движения ЛЧ. Пунктирные линии показывают направление вдольберегового течения. Белая стрелка показывает направление ветра.



Рис.3.2.3. Дифракция волн. Голубыми линиями отмечены сходящиеся фронты волн на песчаном баре.

Волнение было недостаточное для формирования разрывного течения, но топография дна и направление волны способствует образованию вдольберегового течения направленное на ЮЗ.

19 августа также был проведен запуск дрифтера. Скорость движения дрифтера в сторону берега изменяется в диапазоне от 15.7 см/с до 24.5 см/с (рис.3.2.4).



Рис.3.2.4. Средние скорости дрифтера №11 на отдельных участках траектории движения [21].

Траектория дрифтера показывает, что РТ отсутствует, но есть вдольбереговое течение, направленное на ЮЗ, что соответствует направлению движения лагранжевых частиц.

Построенные графики направления и скорости ветра, направления и высоты волны (рис.3.2.5), по результатам моделирования SWAN, показали направление волны С-ВСВ, и высоту волны от 0.25 до 0.52 м. Такие параметры волны не дают возможности сформироваться разрывному течению.



Рис.3.2.5. График направления и скорости ветра, направления и высоты волны. По оси X отсчет начинается от от 00:00 часов 17 августа 2020 года, каждые 3 часа. 19 августа соответствуют сроки с 17 по 24.

19 августа ветро-волновые условия не соответствовали специфическим условиям для формирования РТ, что согласуется с натурными данными, полученными при запусках дрифтера и ЛЧ, а также это подтверждается данными реанализа. 23 августа 2020 г. прогноз показал, что ветер должен быть C3 направления, а высота волн достигать 0.8-1.0 метра, такой высоты волны достаточно для формирования РТ. Измерения проводились на втором полигоне (см. раздел 2.2.1). Лагранжевы частицы показали наличие компенсационного потока, который имеет веерообразную форму (рис.3.2.6), что вероятно объясняется сложной топографией дна.



Рис.3.2.6. Принципиальная схема движения ЛЧ 23 августа 2020 г. Сплошными цветными линиями показаны траектории движения ЛЧ в сторону моря. Белые пунктирные линии отмечают нахождение подводного бара. Цветные пунктирные линии показывают возвратную траекторию ЛЧ. Белая стрелка показывает направление ветра.

Построенные по реанализу графики направления и скорости ветра, а также направления и высоты значительных волн (рис.3.2.7), показали, что 23 августа направление волны 300°, при высоте 0.33-0.82 м. При такой волне происходит нагон воды в прибрежную зону, необходимый для формирования разрывных течений.



Рис.3.2.7. График направления и скорости ветра, направления и высоты волны. По оси X отсчет начинается от от 00:00 часов 21 августа 2020 года, каждые 3 часа. 23 августа соответствуют сроки с 17 по 24.

24 августа 2020 г. прогноз, выполненный моделью SWAN показал, что в районе исследования будет ветер ЮЗ-З направления, а высота волн ожидается 1 метр и более. Работы проходили, как и 19 августа на первом полигоне. При таком направлении ветра ЛЧ двигались строго вдоль берега в прибойной зоне, придерживаясь направления ВСВ. При этом скорость их движения 0.37-0.85 м/с (Рис.3.2.8).



Рис.3.2.8. Принципиальная схема движения ЛЧ 24 августа 2020 г. (нужно время съемки). Синяя и красная линия показывают траектории движения ЛЧ, ,белая стрелка показывает направление ветра.

Параллельно с запуском ЛЧ были проведены 4 запуска дрифтеров. Время и координаты их перемещения представлены в таблице 3.2.3. Было выполнено два запуска дрифтера №1 и два запуска дрифтера №17. Максимальные скорости зафиксированы при движении дрифтера №1 в сторону берега, достигая величины в 1. 267 м/с при первом запуске и 1 м/с при втором запуске (рис.3.2.9 и 3.2.10).



Рис.3.2.9. Траектория дрифтера № 1. Средние скорости на отдельных участках траектории движения (первый запуск)[21].



Рис.3.2.10. Траектория дрифтера № 1. Средние скорости на отдельных участках траектории движения (второй запуск) [21].

Дрифтер №17, так же как и дрифтер №1 показал, что максимальные скорости определяются при движении в сторону берега. Они достигают значений в 0.604 м/с при первом запуске и 0.9 м/с при втором запуске (рис.3.2.11 и 3.2.12).



Рис.3.2.11. Траектория дрифтера № 17. Средние скорости на отдельных участках траектории движения (первый запуск) [21].



Рис.3.2.12. Траектория дрифтера № 17. Средние скорости на отдельных участках траектории движения (второй запуск) [21].

Все дрифтеры двигались по каналу из бухты в море и огибали мыс по полузамкнутой траектории. Это может свидетельствовать о начале формировании циркуляционной ячейки, но учитывая движение ЛЧ строго вдоль берега, вероятней присутствие вдольберегового течения.

Инклинометр был поставлен в ложбину между двумя мысами. Полученные данные показали, что компенсационный поток присутствовал на дне, и был направлен практически перпендикулярно от берега (рис.3.2.13). Скорости в потоке находятся в диапазоне 0.3-0.35 м, что соответствует результатам, представленным в работе [Островский, 2020].



Рис.3.2.13. Роза скорости компенсационного потока.

Графики направления и скорости ветра, а также направления и высоты волны (рис.3.2.14), построенные по реанализу, показали, что 24 августа направление волны 300°, при высоте 0.52-0.99 м.



Рис.3.2.14. График направления и скорости ветра, направления и высоты волны. По оси X отсчет начинается от 22 августа 2020 года 00:00 часов, каждые 3 часа.

24-му августа 2020г. соответствуют сроки с 17 по 24.

Результат всех измерений показывает, что при направлении ветра 250° и направлении волны 300° зафиксированы условия для разрывного течения. При этом существовало течение вдоль берега.

3.3. Случаи из СМИ и опроса

По проведенному опросу (см. раздел 2.3) и поиску ключевых слов в СМИ были определены случаи, которые по описанию похожи на разрывные течения (таблица 3.3.1).

Таблица 3.3.1. Случаи из СМИ и опроса.

Дата	Место	Источник
22.07.2017	Зеленоградск	https://ria.ru/20170728/1499331399.html
4-5.08.2018	Балтийская коса	https://www.kaliningrad.kp.ru/daily/26864.5/3907421/
17-18.07.2021	Светлогорск	опрос и https://kgd.ru/news/society/item/96099-chjomye-flagi-ne-pomogali- skolko-lyudej-vytashhili-spasateli-iz-baltijskogo-morya-v-vyhodnye
12.08.2021	Балтийск	https://klops.ru/articles/2021-08-23/239260-moskvich-vytaschil-iz-vody-chetveryh- tonuschih-no-poteryal-ottsa-podrobnosti-tragedii-pod-baltiyskom

Для определения условий волнения в перечисленных случаях были использованы данные реанализа, полученные с использованием модели SWAN. Рассматривалось направление волны относительно направления береговой линии. Для Балтийской косы и Балтийска направление берега 30°, для Светлогорска и Зеленоградска направление берега 90°. Соответственно, направление волны при подходе к берегу должна иметь направление 277.5-322.5° в первом случае, и 337.5-322.5° во втором. Так же учитывались период волны(Т), который должен превышать 4.4 с, и значительная высота волн (Hs), которая должна превышать 0.7 м.

График, построенный для событий в Зеленоградске 22 июля 2017 (рис.3.3.1) показывает, что направление волны было 3-15°, что соответствует направлению при котором могут возникать разрывные течения в этом месте. Но период и значительная высота волн имели значения меньше необходимых, Т в диапазоне 2.34-2.77 с, а Нѕ изменялось от 0.31м до 0.57 м.



Рис.3.3.1. График направления и скорости ветра, направления и высоты волны в Зеленоградске. По оси X отсчет начинается от 00:00 часов 20 июля 2017 года, каждые 3 часа. 22-му июля 2017г. соответствуют сроки с 17 по 24.

Для случаев на Балтийской косе 4-5 августа 2018 года также построен график по данным реанализа (Рис.3.3.2.). Направление волны держится в диапазоне 300-315° оба дня, эти направления подходят для образования разрывного течения. 5 августа период волн и их значительные высоты имеют необходимые для РТ величины. Это говорит о том, что существует большая вероятность того, что в этот день было разрывное течение.



Рис.3.3.2. График направления и скорости ветра, направления и высоты волны на Балтийской косе. По оси Х отсчет начинается от 00:00 часов 2 августа 2018 года, каждые 3 часа. 4-му августа 2018г. соответствуют сроки с 17 по 24. 5-му августа 2018г. соответствуют сроки с 24 по 32.

Следующий случай зафиксирован в Светлогорске 17-18 июля 2021 года. Также как и в двух предыдущих случаях по данным реанализа был построен график (Рис.3.3.3). С 00:00 часов 17 числа до 3:00 часов 18 июля направление волн попадает в необходимый диапазон, для создания РТ, и варьируются от 344 до 357°. Период волн в течение двух суток не превышал 4.24 с. Значительные высоты волн имели значения больше 0.7 м только с 12 до 21 часа 18 июля. Если рассматривать все ветро-волновые условия вместе получается, что в эти дни классических условий для формирования разрывных течений не наблюдалось.



Рис.3.3.3. График направления и скорости ветра, направления и высоты волны в Светлогорске. По оси X отсчет начинается от 00:00 часов 15 июля 2021 года, каждые 3 часа. 17-му июлю 2021г. соответствуют сроки с 17 по 24. 18-му июлю 2021г. соответствуют сроки с 24 по 32.

Последний из рассматриваемых случаев территориально находится в районе Балтийска и произошел 12 августа 2021 года. Построенный по реанализу график показывает, что направление волн было от 297 до 320°, и это полностью попадает в необходимый для РТ диапазон (рис.3.3.4). Также как и значимая высота волн в первую половину дня, с 00:00 до 12:00, когда ее значения превышали 0.7 метра. В течение всего дня период волны был от 3.3 до 3.66 с. Из трех необходимых условий для формирования РТ, установленных в работе [19], выполняются только два, При этом направление волны не менялось больше суток, поэтому нагона воды в прибрежную зону могло хватить для формирования разрывного течения.



Рис.3.3.4. График направления и скорости ветра, направления и высоты волны в Светлогорске. По оси X отсчет начинается от 00:00 часов 10 августа 2021 года, каждые 3 часа. 12-му августа 2021г. соответствуют сроки с 17 по 24.

Из 4-х рассмотренных случаев, только случай 4-5 августа 2018г. на Балтийской косе по волновым условиям дает возможность говорить, что РТ могло быть сформировано. 12 августа 2021г, существует большая вероятность, что РТ могло сформироваться. Два оставшихся случая, по разным условиям, не подходят для утверждения, что оно было. Но можно предположить, что были достаточно сильные вдольбереговые течения, которые намного чаще встречаются в этой части Балтийского моря [19]. 4. Межгодовая и сезонная изменчивость разрывных течений по данным реанализа.

Для определения межгодовой и сезонной изменчивости разрывных течений на Балтийской косе используется ряд данных моделирования SWAN, охватывающий период с 00 часов 1 января 1979 года по 21 час 31 декабря 2021 года. Параметры волнения приведены с временным интервалом 3 часа. Координаты точки, для которой получены данные, 54.6°с.ш. 19.75°в.д. (рис.4.1) [29].



Рис.4.1. Точка с координатами 54.6°с.ш. 19.75°в.д.

В модели рассчитывается значимая высота волны, направление, период и длина волны, а также есть данные реанализа NCEP/CFSR по ветру (компоненты U и V). Для того чтоб из всего ряда данных получить даты и время, когда были разрывные течения, все данные были отфильтрованы по направлению волны, периоду волны (T) и значимой высоте волны (Hs). Так как направление береговой линии Балтийской косы 30°, то необходимое направление приходящей к берегу волны было определено как диапазон 277.5-322.5°. Период волны согласно работе Островского взят более 4.4 с. Значимая высота волны должна быть больше 0.7 метра. Было использовано еще одно условие: если временной разрыв между случаями менее 12 часов, то это считалось одним событием. После применения всех фильтров получено, что за 43 года было 1958 случаев, по всем условиям подходящие для возникновения разрывных течений. Распределение случаев по годам представлено на рис.4.2, в среднем за год наблюдается 45 случаев, когда на Балтийской косе возможно формирование РТ, из них 7-8 в летний курортный сезон. За курортный сезон принят период июль-август, когда температура воздуха в среднем превышает 18°C, а температура поверхности моря стабильно превышает 16°C. По графику хорошо видно, что есть года, когда условия для формирования РТ появляются реже или чаще, чем обычно. Так года с минимальным количеством событий это 1996, 2014 и 2018, менее 35 событий за год. А к годам, когда условия для формирования РТ встречаются чаще, можно отнести 1990, 2011, 2017 и 2019гг, когда количество событий превышает 60 событий в год.



Рис.4.2. Распределение случаев возникновения РТ по годам. С 1.01.1979г. по 31.12.2021г.

Ряд межгодовой изменчивости был проверен на наличие тренда с помощью коэффициента корреляции. В таблице 4.1 приведены необходимые для проверки значения.

Таблица 4.1. Рассчитанные данные для оценки значимости коэффициента корреляции.

Ν	43
R^2	0.0004
t*	0.126
σr	0.156
tкр	2.020
r	0.020

При проверке на значимость критическое значение коэффициента Стьюдента оказалось больше его эмпирического значения, следовательно, можно сделать вывод, что тренд отсутствует.

Если смотреть распределение случаев по месяцам, то можно говорить о максимуме в зимний период - декабрь и январь. Наименьшее количество приходится на период апрель-июнь (Рис.4.3.).



Рис.4.3. Среднемесячное количество случаев возникновения РТ по месяцам. С 1.01.1979г. по 31.12.2021г.

Для того чтоб в межгодовой изменчивости оценить за счет каких месяцев происходило аномальное увеличение и уменьшение случаев возникновения условий для РТ были найдены среднемесячные количества случаев за весь рассматриваемый период, и с ним сравнивались количества случаев за месяца в

выбранные «аномальные» года (таблица 4.2). Так же были рассчитаны средние значения за сезоны, и с ними сравнивались сезонные значения в «аномальные» года (таблица 4.3).

Таблица 4.2. Среднемесячное количество случаев РТ за период с 1 января 1979г. по 31 декабря 2021г. А также количество случаев по месяцам, в года с минимальным и максимальным значением. Желтым цветом выделены месяцы, когда количество случаев меньше среднемесячных значений; зеленым, когда больше; тёмно-зелёным, когда количество случаев превышает среднемесячное количество в 2 раза и более. Красным цветом отмечены месяцы, когда не было условий для формирования РТ.

		кол-во случаев												
месяцы	000000000000000000000000000000000000000	MI	ин аномал	ии		макс аномалии								
	среднемесячное	1996	2014	2018	1990	2011	2017	2019						
1	5.35	0	3	2	7	8	7	6						
2	4.07	2	2	0	6	3	2	8						
3	4.14	2	5	2	6	6	10	11						
4	2.58	0	3	4	4	3	8	0						
5	1.98	2	0	0	4	5	1	3						
6	2.63	1	1	4	1	7	6	2						
7	3.16	5	0	0	7	1	5	3						
8	3.40	0	6	4	4	4	3	1						
9	3.72	0	2	6	6	7	3	6						
10	4.98	2	1	5	7	6	8	11						
11	4.30	6	0	0	3	3	6	3						
12	5.42	2	4	5	6	9	4	9						

По таблице 4.2 видно, что в те года, когда количество случаев подходящих для формирования РТ течений минимально, есть месяца, в которых вообще не возникало таких условий, как минимум 3 месяца для каждого года. В 78% случаев их количество было меньше среднемесячных значений. Если смотреть года с максимальным количество случаев, то в 69% оно превышает среднемесячные значения. При этом как минимум по два месяца в каждом году превышает это значение в 2 раза и более. Для визуализации данных построена диаграмма (рис.4.4 и 4.5).



Рис.4.4. Диаграмма распределения случаев по месяцам для годов с минимальными значениями и среднемесячными значениями за период 1.01.1979-31.12.2021гг.



Рис.4.5. Диаграмма распределения случаев по месяцам для годов с их максимальными значениями, и среднемесячными значениями за период 1.01.1979-31.12.2021гг.

Рассматривая сезонные изменения можно говорить о том, что в года с минимальными количествами случаев, сезонные значения всегда меньше, чем среднесезонные значения за весь период. Года с максимальным количеством

случаев, практически во все сезоны превышают среденесезонные значения (таблица 4.3).

Таблица 4.3. Среднесезонное количество случаев РТ за период с 1 января 1979г. по 31 декабря 2021г. Количество случаев по сезонам, в «аномальные» года. Желтым цветом обозначены сезоны, где количество случаев меньше, чем среднесезонные значения; зеленым цветом, где больше; тёмно-зелёным, где количество значений больше чем в 2 раза.

	количество случаев											
сезоны	среднее	M	ин аномал	ии	макс аномалии							
	за сезон	1996	2014	2018	2011	2017	2019					
зима	14.84	4	9	7	20	13	23					
весна	8.70	4	8	6	14	19	14					
лето	9.19	6	7	8	12	14	6					
осень	13.00	8	3	11	16	17	20					

Для наглядности данных построены диаграммы распределения случаев по сезонам (рис.4.6 и 4.7). В годы с минимальными количествами значений, во всех сезонах количество случаев меньше среднесезонных. В годы с максимальными значениями в 83% количество случаев превышает среднесезонное количество.



Рис.4.6. Диаграмма распределения случаев по сезонам для годов с минимальными значениями и среднесезонными значением за период 1.01.1979-31.12.2021гг.



Рис.4.7. Диаграмма распределения случаев по сезонам для годов с максимальными значениями и среднесезонными значением за период 1.01.1979-31.12.2021гг.

Для определения зависимости выделенных «аномальных» лет от атмосферной циркуляции, было проведено исследование на определения корреляции между количествами случаев в аномальные года и индексами циркуляции NAO (североатлантическое колебание), AO (арктическое колебание), SCAND (скандинавское колебание). Для этого использовались среднемесячные значения индексов и ежемесячные количества случаев в аномальные года (таблица 4.4).

Таблица 4.4. Значения корреляции между среднемесячными индексами NAO, AO и ежемесячные количества случаев в «аномальные» года.

		Величина корреляции											
Индекс Весь	_	Миним	альная ан	омалия	Максимальная аномалия								
	весь период	1996	2014	2018	1990	2011	2017	2019					
NAO	0.164	-0.063	0.070	0.060	0.321	0.128	0.543	0.378					
AO	0.332	0.462	0.366	0.247	0.171	-0.087	0.707	0.712					
SCAND	-0.489	-0.649	-0.547	-0.663	-0.127	-0.530	-0.450	-0.127					

По полученным данным можно сказать, что зависимость количества случаев от индекса NAO слабая. Корреляция превышает 50% только в 2017 году. В года с минимальными значениями корреляция не превышает 7%, а за весь период она составляет 16%. Индекс AO дает корреляцию за весь период 33%, в 2017 и 2019 года 71%, но в 2011 году она всего 9%. Индекс SCAND дает самую хорошую корреляцию. Для полного ряда — это 49%. В года с минимальными значениями корреляция составляет от 55 до 66%. В года с максимальными значениями она изменяется от 13 до 53%. По данным из таблицы 4.4 были выбраны два года с максимальными корреляциями. Для 1996 года построен график (рис.4.8) с индексом SCAND и количеством случаев. Видно, что они находятся в противофазе, т.е. корреляция обратная. Для 2019 года построен график (рис.4.8) с индексом АО и количеством случаев. Видно, что связь, практически всегда, прямая. По всем «аномальным» годам построены графики (рис.4.9.1-6).

Рис.4.8. Индекс SCAND (слева), АО (справа) и количество случаев, для 1996 и 2019 года соответственно.

Рис.4.9.1. Графики индекса NAO и количества случаев для годов с минимальными значениями (1996, 2014, 2018гг.).

Рис.4.9.3. Графики индекса АО и количества случаев для годов с минимальными значениями (1996, 2014, 2018гг.).

Рис.4.9.4. Графики индекса АО и количества случаев для годов с максимальными значениями (1990, 2011, 2017, 2019гг.).

Рис.4.9.5. Графики индекса SCAND и количества случаев для годов с минимальными значениями (1996, 2014, 2018гг.).

Для всех данных реанализа отфильтрованных по направлению волны, Hs и T, были рассчитаны направление и скорость ветра, и построена роза ветров (рис.4.10).

Рис.4.10. Роза ветров.

По розе ветров хорошо видно, что когда выполняются все условия по волне, направление ветра находиться в диапазоне 202.5-315°, при этом чаще всего бывают ветра от 247.5° до 280° со скоростью 3-9 м/с. И если в исходный ряд значений внести, как дополнительный фильтр, направление ветра, то количество случаев не поменяется. Но вот если добавить еще и скорость ветра, то количество случаев уменьшается практически на 42%. По построенной розе ветров можно говорить, что необходимая для РТ волна генерируется локальными ветрами в 58% случаев.

Заключение

Прибрежная часть Балтийской косы представляет собой песчаный пляж с подводными барами на мелководье. Берег имеет большое количество мысов. И если выполняются волновые условия, то все это вместе способствует возникновению РТ. Необходимые условия были определены как Hs > 0.7 метра, T > 4.4 секунды, направление волны от 277.5 до 322.5°. Также, случаи между которыми разрыв по времени был менее 12 часов, объединялись в одно событие.

Проведя сравнение рассчитанных при помощи модели SWAN данных с даннымт полученными в ходе эксперимента Островского в районе Любятово 3 ноября 2017 года, когда были зафиксированы PT. Реанализа показали, что условия для формирования разрывных течений было. Следующее сравнение проводилось с данными полученными в августе 2020 года на Балтийской косе. Измерения проводились 19, 23 и 24 числа. Сравнение натурных данных от 19 августа с реанализом подтвердили отсутствие условий для формирования разрывных течений.. 23 августа натурные измерения и реанализ показали, что условия для PT были подходящие. И только 24 августа были частичные расхождения, реанализ показал, что условия формирования PT подходящие, а комплексные исследования показали, что хотя и присутствовал компенсационный поток на дне в сторону моря, но было и течение вдоль берега.

По данным СМИ и соцопросу были определены 4 случая, которые относили к разрывным течениям. Определив по данным реанализа волновые условия для этих дат, только два случая можно было отнести к РТ. В двух других случаях, вероятно, было сильное вдольбереговое течение, которое намного чаще встречается на Балтийском побережье, и имеет бо'льшие скорости.

Проведенные сравнения показали, что расчеты, выполненные с помощью модели SWAN, дают возможность с достаточно большой достоверностью определять условия для формирования разрывных течений. Поэтому был проанализирован полученный по реанализу ряд данных за 43 года, с 1.01.1979

63

31.12.2021гг. При использовании всех выбранных по условий ЛЛЯ формирования РТ получилось, что за 43 года таких случаев 1958, и в среднем в год могут возникнуть 45 случаев РТ. Но были «аномальные» года, когда количество случаев было меньше 35 или больше 60. Проверка ряда межгодовой изменчивости на наличие тренда показала его отсутствие. В годы с минимальным количеством случаев, как минимум в трех месяцах вообще не возникало подходящих для РТ условий. В годы с максимальным количеством 69% они были больше среднемесячных значений. случаев в Также среднемесячные значения показали, что максимум случаев приходится на зимний период, декабрь – январь, а минимум на период с апреля по июнь.

Для определения связи количества случаев с атмосферной циркуляцией, была проведена корреляция между количеством случаев и индексами NAO, AO и SCAND. Для этого использовались среднемесячные значения. Самая большая корреляция за весь рассматриваемый период была с индексом SCAND - 48.9%. С индексом AO было 33.2%, с NAO всего 16.4%. При корреляции с «аномальными» годами, SCAND лучше коррелирует с минимальными годами 54.7-64.9%. AO с максимальными, в 2017 и 2019 годах был 71%. Надо отметить, что индекс SCAND имеет обратную корреляцию.

Также для всех случаев по реанализу была построена роза ветров. Все ветра западных румбов. Наиболее часто бывают ветра в диапазоне 247-280° и имеют скорость 3-9 м/с, что может говорить о том, что необходимая для РТ течений волна генерируется локальными ветрами.

Выполненная работа позволяет сделать вывод о том, что на данном этапе выбранных критериев было достаточно, для определения условий формирования разрывных течений на Балтийской косе. Также можно говорить, о том, что необходимые волновые условия, в основном, формируются локальными ветрами. Это явление происходит регулярно в течение всего года, и в курортный сезон может создать опасность для отдыхающих. Поэтому была создана памятка, о том, как себя вести при попадании в разрывное течение (приложение 2). Так же надо отметить, что очевидцы не всегда правильно определяют само явление, и путают его с часто встречающимся вдольбереговым течением, которое имеет скорости большие, чем РТ.

Список использованных источников:

- ЕСИМО : единая государственная система информации об обстановке в мировом океане : [электронный ресурс] / федеральная программа "мировой океан". — URL: http://esimo.oceanography.ru/esp2/index/index/esp_id/1/section_id/2 (дата обращения 12.05.2022). — Текст : электронный.
- Коршенко А. Н. Качество морских вод по гидрохимическим показателям. - 2019.
- Коршенко А. Н. Качество морских вод по гидрохимическим показателям. – 2009.
- 4. Система Балтийского моря : монография / А. П. Лисицин, В. Б. Дубравин, Ж. И. Стонт [и др.] ; под ред. А. П. Лисицина Москва : Научный мир, 2017. 608 с. ISBN 978-5-91522-445-1.
- Большая российская энциклопедия : электронная энциклопедия : [электронный pecypc] — URL: https://bigenc.ru/geography/text/4343809 (дата обращения 10.05.2022). — Текст : электронный.
- 6. Google Earth : [электронный ресурс] URL: /https://www.google.com/earth/_(дата обращения 07.05.2022)
- Большая российская энциклопедия : электронная энциклопедия : [электронный pecypc] — URL: https://bigenc.ru/geography/text/2347448 (дата обращения 10.05.2022). — Текст : электронный.
- Медведев И. П. Межгодовая изменчивость сезонных колебаний уровня на российском побережье Балтийского моря //Океанол. Иссл. – 2018. – Т. 46. – С. 35-50.).
- 9. ЯОД-архив : архив погоды : [электронный ресурс] URL: http://aisorim.meteo.ru/waisori/_(дата обращения 05.05.2022).
- 10. Дубравин В. Ф., Капустина М. В. Эволюции термохалинной структуры вод Балтийского моря //Москва: Изд-во «Перо. 2017.

- 11. Дубравин В. Ф., Маслянкин Г. Е., Дорохова Е. В. Долгопериодная изменчивость термохалинной структуры вод Балтийского моря //Инновации в науке и образовании-2010. – 2010. – С. 135-138.
- 12.Bowen A. J. Rip currents: 1. Theoretical investigations //Journal of Geophysical Research. 1969. T. 74. №. 23. C. 5467-5478.
- 13.Davis W. M. The undertow myth //Science. 1925. T. 61. №. 1573. C. 206-208.
- 14.Castelle B. et al. Rip current types, circulation and hazard //Earth-Science Reviews. 2016. T. 163. C. 1-21.
- 15.Dalrymple, R. A., MacMahan, J. H., Reniers, A. J., & Nelko, V. (2011). Rip currents. Annual Review of Fluid Mechanics, 43, 551-581.
- 16.Shepard F. P. Undertow, rip tide or" rip current" //Science. 1936. T. 84. No. 2173. C. 181-182.
- 17. Рабинович А. Б. Длинные гравитационные волны в океане: захват, резонанс, излучение. 1993.
- 18.ELIOT B. A. The Persistence of Rip Current Patterns on Sandy Beaches. 1973.
- 19.Ostrowski R. et al. South Baltic rip currents detected by a field survey //Baltica. – 2020. – T. 33. – №. 1.
- 20.Schönhofer J., Dudkowska A. Rip currents in the southern Baltic Sea multi-bar nearshore zone //Continental Shelf Research. 2021. T. 212. C. 104324.
- 21.Мехова О. С. и др. УСЛОВИЯ ФОРМИРОВАНИЯ РАЗРЫВНЫХ ТЕЧЕНИЙ НА БАЛТИЙСКОЙ КОСЕ В 2020 г //Труды IX Международной научно-практической конференции «Морские исследования и образование (MARESEDU-2020)». – 2020. – С. 279-282.
- 22.Пака В. Т. и др. Об усовершенствовании инклинометрического измерителя скорости придонных течений //Океанологические исследования. – 2019. – Т. 47. – №. 2. – С. 220-229.
- 23.— Google Earth : [электронный ресурс] URL: /https://www.google.com/earth/ (дата обращения 29.08.2020).

- 24.— APCDR : Asia-Pacific Data-Research center : [электронный ресурс] URL: http://iprc.soest.hawaii.edu/ (дата обращения 07.06.2021).
- 25.Bell B. et al. The ERA5 global reanalysis: Preliminary extension to 1950 //Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society. 2021. T. 147. No. 741. C. 4186-4227.
- 26.Hersbach H. et al. The ERA5 global reanalysis //Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society. 2020. T. 146. №. 730. C. 1999-2049.
- 27. Кузнецова А. М. Численное моделирование поверхностного ветрового волнения на коротких разгонах. – 2019.
- 28.— NOMADS : NOAA Operational Model Archive and Distribution System : [электронный pecypc] — URL: https://nomads.ncep.noaa.gov/ (дата обращения 15.08.2020).
- 29.Медведева А. Ю. и др. Моделирование ветрового волнения в Балтийском море на прямоугольной и неструктурной сетках на основе реанализа NCEP/CFSR //Труды Гидрометеорологического научно-исследовательского центра Российской Федерации. 2016. №. 362. С. 37-54.
- 30.Saha S. et al. The NCEP climate forecast system version 2 //Journal of climate. - 2014. – T. 27. – No. 6. – C. 2185-2208.
- 31.— Lenta.ru : Новости России и мира сегодня : [электронный ресурс] URL: https://lenta.ru/ (дата обращения 20.05.2021).
- 32. РИА : Российское информационное агентство : [электронный ресурс]
 URL: https://ria.ru/ (дата обращения 20.05.2021).
- 33.— Радио Sputnik : радио : [электронный ресурс] URL: https://radiosputnik.ria.ru/ (дата обращения 20.05.2021).
- 34.— Google Forms : онлайн-сервис : [электронный pecypc] URL: https://docs.google.com/forms/d/e/1FAIpQLSdZwzPW6WIYFvdC7Jo1UmBG b3j-FhcPC4rxPBi9ldoKnpPewQ/viewform (дата обращения 20.05.2021).

35.Гордеева С. М. Практикум по дисциплине" Статистические методы обработки и анализа гидрометеорологической информации". – 2017.

2

n

-2

1980 1985 1990 1995 2000 2005 2010 2015 2020

Годы

2

-2

1980 1985 1990 1995 2000 2005 2010 2015 2020

Годы

Приложение 1. Графики среднемесячных температур воздуха по данным с метеостанции города Балтийск за период с 1 января 1979 г. до 31 августа 2020 г.

1980 1985 1990 1995 2000 2005 2010 2015 2020

Годы

Приложение 2. Памятка о том, как надо себя вести при попадании в разрывное течение.

Оцените рельеф морского дна: обычно разрывные течения возникают на протяженных участках с чередующимися мысами и бухтами или вблизи волноломов/препятствий. Бухты и отмели в солнечную погоду можно определить по оттенку воды - на отмелях вода светлее.

Течение можно увидеть при волнении: на отмелях будут видны белые барашки на поверхности моря, а в местах с сильным течением поверхность воды будет гладкой и без пены.

Что делать, если уносит в море?

 Основное правило – сохраняйте спокойствие. Разрывное течение характерно только для поверхностного слоя и не утащит ПОД воду.

 Сразу, как почувствовали, что уносит, подайте сигнал бедствия, попытайтесь обратить на себя внимание друзей, спасателей, других отдыхающих.

 Не пытайтесь грести к берегу против потока, течение может иметь скорости порядка 1 м/с! Даже опытному пловиу сложно противостоять такому течению.

4. Аккуратно, экономя силы, двигайтесь параллельно берегу (под углом к потоку) - уплывайте из зоны действия разрывного течения. В скором времени вы почувствуете, что поток ослаб и не утягивает вас - ширина разрывного течения редко превышает 50 метров.

Возможен также варнант – лечь на воду или «поплавком» дрейфовать до зоны, где течение ослабевает или возвращается к берегу, а потом плыть в сторону ближайшего мыса.

Обратите внимание, что течение не всегда направлено перпендикулярно берегу!

Перед входом в воду обязательно оцените обстановку! Если вы не уверены в собственных силах или находитесь на акватории впервые – постарайтесь не купаться в одиночестве.