



Министерство науки и высшего образования Российской Федерации
Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования

**«РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»**

**Кафедра прикладной океанографии и комплексного управления
прибрежными зонами**

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА
(бакалаврская работа)

На тему: «Параметры и траектории циклонов, приводящих к наводнениям в Финском заливе»

Исполнитель: Рахимова Элеонора Рустамовна
(фамилия, имя, отчество)

Руководитель: доктор географических наук, профессор
(ученая степень, ученое звание)

Аверкиев Александр Сергеевич
(фамилия, имя, отчество)

**«К защите допускаю»
Заведующий кафедрой**

(подпись)

кандидат географических наук
(ученая степень, ученое звание)

Хаймина Ольга Владимировна
(фамилия, имя, отчество)

«04» 06 2024 г.

Санкт-Петербург

2024

Введение	2
Глава 1. Причины и механизмы, приводящие к значительным подъемам уровня в Балтийском море и наводнениям в Финском заливе.	4
1.1 Физико-географическое описание Балтийского моря, отражающее причины и механизмы опасных поднятий уровня и наводнений в Финском заливе.	4
1.2 Синоптические и климатические условия возникновения наводнений восточной части Финского залива.	8
Глава 2. Параметры и траектории циклонов, приводивших к подъемам уровня в Финском заливе в период с 2018 по 2023г.	10
Глава 3. Анализ циклонической деятельности над районом Балтийского моря и повторяемости наводнений в Финском заливе в период с 1879 по 2023гг..	31
Заключение	34
Список использованных источников	35
Приложение А	37

Введение

Наводнения на побережье Финского залива являются важной проблемой для жизнеобеспечения данного региона. С начала XXI века отмечается некоторое усиление деятельности циклонов над Северной Атлантикой и повышение уровня Мирового океана. Данные факторы способствуют повышению количества наводнений в Невской губе.

Колебания уровня воды рассчитываются от среднего многолетнего положения водной поверхности Балтийского моря у острова Котлин. Он принимается за исходный горизонт измерения высот на суше и глубин на морях. Данный исходный уровень был назван «нулем Кронштадского футштока». В настоящее время применяется термин «Нуль Балтийской системы».

Подъемы уровня воды в Санкт-Петербурге, Невской губе и Финском заливе представляют собой опасные гидрометеорологические явления, поэтому их анализ и прогноз является актуальной и практически важной задачей для океанологов и метеорологов.

В данной работе используются данные об опасных подъемах уровня, представленные Дирекцией комплекса защитных сооружений города Санкт-Петербурга от наводнений (КЗС)[8]. Для выбора синоптических карт был использован архив карт Британской метеослужбы [4].

Целью данной работы является анализ траекторий и параметров циклонов, которые приводили к подъемам уровня с 2018 по 2023 гг. с учетом более ранних данных.

Для достижения данной цели были поставлены и решены следующие цели и задачи:

1. Создание архива синоптических карт приземного давления за сроки, которые соответствуют датам максимального подъема уровня воды.
2. Выявление параметров и траекторий циклонов, приведших к наводнениям за период с 2018 по 2023 гг.
3. Приведение траекторий циклонов, влияющих на возникновение

наводнений, в соответствие с типизацией, представленной в работе Псаломщиковой и др. [13].

4. Определение координат и давления в центре циклонов, вызвавших наводнения в случаях максимального подъема уровня и в моменты минимального давления в центре циклона.

5. Анализ параметров, траекторий и частоты циклонов, приводящих к наводнениям в Финском заливе за период до 2023 гг. и за более ранние периоды.

Исходные данные: для получения дат опасных подъемов уровня в НГ, были задействованы архивы дирекции КЗС и архив карт с сайта Британской метеослужбы [4].

Был использован метод анализа приземных синоптических карт с дискретностью в 12 часов, приблизительно за 2 суток до максимального подъема уровня воды, для того, чтобы отследить траекторию циклона в начальной точке в Атлантическом океане до времени прохождения меридиана г. Санкт-Петербурга. По синоптическим картам прослежена траектория циклона, изменение давления в центре с фиксацией минимального давления и времени, а также координат его наступления.

В некоторых случаях высота подъема показана, но время указано не точно. Траектории циклонов были приведены в соответствие с классификацией типов Псаломщиковой и др.[13].

В результате были составлены таблицы с указанием параметров циклонов, приводивших к опасным подъемам уровня, типов их траекторий, значений максимальных подъемов уровня.

Будем придерживаться следующей терминологии и сокращений, которые были предоставлены в статьях и на сайте Дирекции КЗС:

ВЧФЗ – восточная часть Финского залива; НГ - Невская губа, часть ВЧФЗ, отделенная КЗС; КЗС - Комплекс защитных сооружений Санкт-Петербурга от наводнений; UTC - Всемирное координированное время.

Глава 1. Причины и механизмы, приводящие к значительным подъемам уровня в Балтийском море и наводнениям в Финском заливе.

1.1 Физико-географическое описание Балтийского моря, отражающее причины и механизмы опасных поднятий уровня и наводнений в Финском заливе.

Балтийское море является крупнейшим в мире внутренним солоноватым морем. Этот солоноватый водоем представляет собой рукав Атлантического океана, окруженный Данией, Эстонией, Финляндией, Германией, Латвией, Литвой, Польшей, Россией, Швецией, а также Северо- и Центрально-Европейской равниной. Море простирается от 53° до 66° северной широты и от 10° до 30° восточной долготы. Поскольку это окраинное море Атлантики, водообмен между двумя водоемами ограничен.

Балтийское море представляет собой полузакрытый бассейн с ограниченным сообщением с Северным морем через Датский пролив. Диапазон приливов в Балтийском море не превышает нескольких сантиметров и в основном незначителен. Примерно каждые пару лет происходит явление, когда очень сильный ветер, дующий с запада на северо-запад, перемещает воду из западной части Балтийского моря в восточную, перекачивая воду из Северного моря в Балтийское море через Датские проливы. Это приводит к скоплению большего количества воды в южной части Балтики, и впоследствии ее уровень повышается.

Финский залив в наше время является активно исследуемой морской акваторией. Общие исследования проводятся в рамках международного сотрудничества между всеми прибрежными государствами залива. Понимание основ физики залива жизненно важно для оценки состояния морской среды и построения связанных гидродинамических и экологических моделей при описании реакции моря на деятельность человека.



Рисунок 1.1 Карта Балтийского моря

Наводнения в Балтийском море, и в особенности в Финском заливе представляют собой очень сложное явление. В их возникновении и развитии участвует довольно большое количество факторов из метеорологии и гидрометеорологии. Характер этих факторов изменчив.

В настоящее время наводнениями ВЧФЗ считаются подъемы уровня воды выше 160 см над нулем Балтийской системы высот. Существует следующая классификация: наводнения с подъемом воды до 210 см считаются опасными, от 211 до 299 см – особо опасными, свыше 300 см – катастрофическими. При катастрофических наводнениях общая площадь затопления превышает 100 км².

Колебания уровня Балтийского моря в диапазоне периодов от часов до нескольких суток формируются преимущественно под влиянием неоднородностей полей атмосферного давления и ветра и выражены сгонно-нагонными явлениями, сейшами и топографическими волнами. Сгонно-нагонные явления в Балтийском море формируются в результате ветрового

воздействия и занимают широкий диапазон периодов: от нескольких часов до нескольких недель. Частным случаем этих процессов являются штормовые нагоны, которые в некоторых случаях приводят к наводнениям в вершине Финского залива.

Штормовые нагоны – один из важнейших типов колебаний уровня для акватории Балтийского моря. Экстремальные штормовые нагоны в Финском заливе приводят к катастрофическим наводнениям в Санкт-Петербурге и причиняют городу огромный экономический и социальный ущерб. Экстремальные подъемы уровня в Финском заливе формируются при прохождении глубоких циклонов с преобладанием западных ветров над акваторией Балтийского моря. Под областью низкого атмосферного давления формируется нагонная волна, распространяющаяся в сторону вершины Финского залива. Подъем уровня моря усиливается из-за мелководья, а также из-за сужения залива к вершине. Таким образом, важную роль в формировании штормовых нагонов играют частотные свойства акватории Финского залива, которые определяют преобладающий период собственных колебаний уровня и их затухание.

Статистический анализ многолетних данных об изменчивости уровня Балтийского моря выявил сложный характер волновой структуры колебаний. Волновое поле, сформированное под воздействием переменных ветров и возмущений атмосферного давления над Балтийским морем, представляет собой суперпозицию стоячих колебаний со случайными фазами. Спектральный анализ синхронных рядов наблюдений за уровнем показал, что в Финском заливе отчетливо прослеживаются узловые линии стоячих продольных волн с частотами, соответствующими расстоянию от узловой линии до вершины залива (четверть длины волны). Можно выделить несколько участков акватории с ярко выраженными частотно-избирательными свойствами, например, Финский залив и Невская губа. Проанализированные оценки статистической связи колебаний уровня моря с изменениями ветра и атмосферного давления указывают на доминирующую

роль зональной компоненты ветра при формировании наводнений в Финском заливе. А также, можно отметить, что вероятной причиной экстремальных наводнений в Санкт-Петербурге может быть эффект резонансного «раскачивания» собственных колебаний, соответствующих основной фундаментальной сейшевой моде Финского залива с периодом 27 ч, когда повторные атмосферные возмущения над Балтикой возникают с периодом порядка 1-2 суток. Стоячие волны это лишь одна причина опасных подъемов уровня в Финском заливе.

При ситуациях с опасным уровнем поднятия вод, циклоны, фронты и связанные с ними поля давления и ветров обуславливают интенсивные деформационные колебания уровня. В зависимости от этих синоптических условий, колебания уровня могут изменять вид от длинной перемещающейся воды до вида стоячей воды. Распространяясь в Финском заливе, волны, под влиянием залива и ветров над ним в момент прохождения волны, видоизменяются. Во время наводнений суммируются различные виды колебаний уровня, то есть происходит наложение трансформирующейся длинной волны на сейшеобразную волну.

Чаще всего нарастание волны становится более сильным при ветровом нагоне [1].

Самым ярко выраженным явлением, сопровождающим подъемы воды при наводнениях в Финском заливе, являются сильные ветра западного или юго-западного направлений. Циклоны, являющиеся областями низкого атмосферного давления, проходя над морем, вызывают повышение уровня воды, «засасывая» ее в центре низкого давления. Этому повышению уровня способствуют и ветровые потоки, направленные по касательной к центру циклона. В результате такого повышения уровня от циклона по водным пространствам начинает распространяться поступательная длинная волна. В середине Балтики высота такой волны держится в пределах от 30 до 50 см, а скорость ее свободного распространения составляет 40 – 60 км/ч. Если направление движения циклона и длинной волны совпадают, то эта волна

может сохранить и даже увеличить свою высоту, получая постоянную подпитку энергии от циклона.

В трансформации длинных волн (изменении их длины и высоты) важную роль играет изменение площади поперечного сечения залива, в который входит волна. Если длинная волна распространяется только под влиянием силы тяжести, последовательное уменьшение площади сечения приведет к тому, что ее лобовая часть (ветвь подъема) замедляет движение, а тыловая (ветвь спада) догоняет ее. Для Финского залива уменьшение сечения от створа мыса Ханко на входе от 4.5 до 0.6 км² у створа мыса Шепелевский является причиной дополнительного повышения уровня. Если же ее распространение сопровождается западным ветром, то высота подъема еще сильнее возрастает [1].

1.2 Синоптические и климатические условия возникновения наводнений восточной части Финского залива.

Суммируя сказанное выше, можно отметить, что формирование наводнений в районе восточной части Финского залива определяется следующими условиями:

- 1) Образованием и движением циклонов на границе раздела разнородных воздушных масс.
- 2) Формированием и распространением длинной волны вместе с движением циклона в направлении на восток.
- 3) Воздействием ветра на поверхность воды, создаваемым западным и юго-западными воздушными потоками циклона.
- 4) Стоячей волной или сейшевым колебательным движением, обусловленным раскачиванием всей водной массы при прохождении длинной волны.
- 5) Видоизменением длинной волны за счет уменьшения ее длины и увеличения высоты при последовательном прохождении все более узких и мелких частей Финского залива.

Отсюда можно сделать вывод, что, если первопричиной изучаемых наводнений является прохождение атмосферных циркуляционных образований, необходимо сначала рассмотреть повторяемость этих явлений в Северо-Западном и Западном регионах.

На рисунке 1.2 представлены характерные сектора траекторий перемещения циклонов и их условные обозначения, приведенные в статье Псаломщиковой и др. [13].

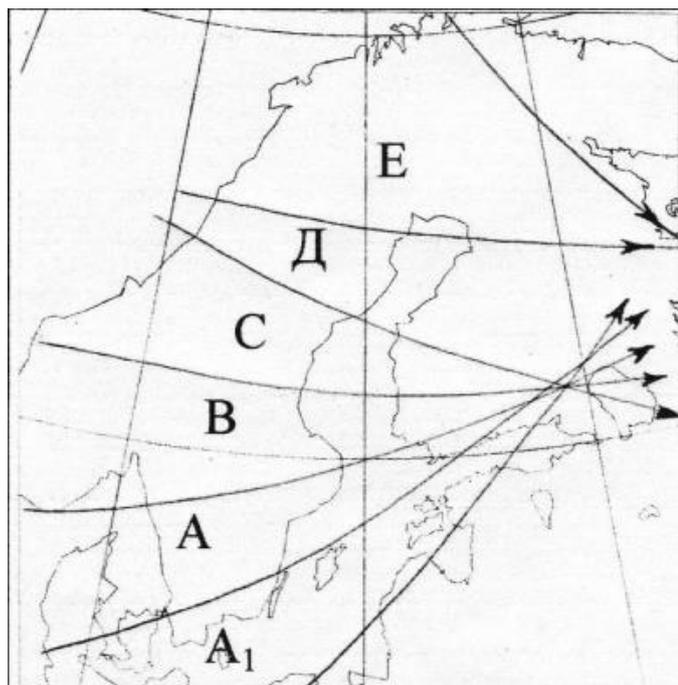


Рисунок 1.2 Траектории циклонов, приводящих к наводнению [13]

Глава 2. Параметры и траектории циклонов, приводивших к подъемам уровня в Финском заливе в период с 2018 по 2023г.

Для составления каталога синоптических карт в период с 2018 по 2023 гг. были использованы данные Британской метеослужбы [4], представленные в виде ежедневных приземных синоптических карт, за сроки 0 и 12 часов UTC. По этим картам возможно отследить траекторию проходящих над исследуемой областью циклонов, которые приводили к наводнениям в ВЧФЗ. Наводнения с 2011 года в Санкт-Петербурге предотвращает Комплекс защитных сооружений (КЗС). Поэтому наводнения в Санкт-Петербурге с этого времени не было, но поднятия уровня в восточной части Финского залива все равно отмечаются. Время поднятия уровня выше 160 см на водомерном посту Горный институт прогнозируется северо-западным управлением. КЗС закрывает все створки, но уровень открытой части Финского залива измеряется и классифицируется как наводнение. Все случаи можно найти на сайте КЗС [8]. На основе этих данных были выявлены все случаи повышения уровня выше указанной отметки 160 см с 2018 года до 2023 года включительно.

Нас интересуют траектории циклонов, которые приводили к таким подъемам уровня и закрытию КЗС. Эти периоды соответствуют по старой классификации, наводнениям в Санкт-Петербурге. Таким образом, для отслеживания траектории, из архива карт Британской метеослужбы выбирались карты за срок ближайший к максимальному подъему уровня и, в среднем, за 2 суток до этого. В результате были построены траектории движения циклонов, изображенные на последней карте за каждый случай. К сожалению, в некоторых случаях точное время максимального поднятия уровня в архиве Дирекции КЗС не представлено, но тогда это время устанавливалось опытным путем, когда циклон проходил через меридиан Санкт-Петербурга.

Далее на рисунках 2.1-2.17 приведены карты с траекториями циклонов

с указанием местоположения центра циклона и зафиксированным временем.

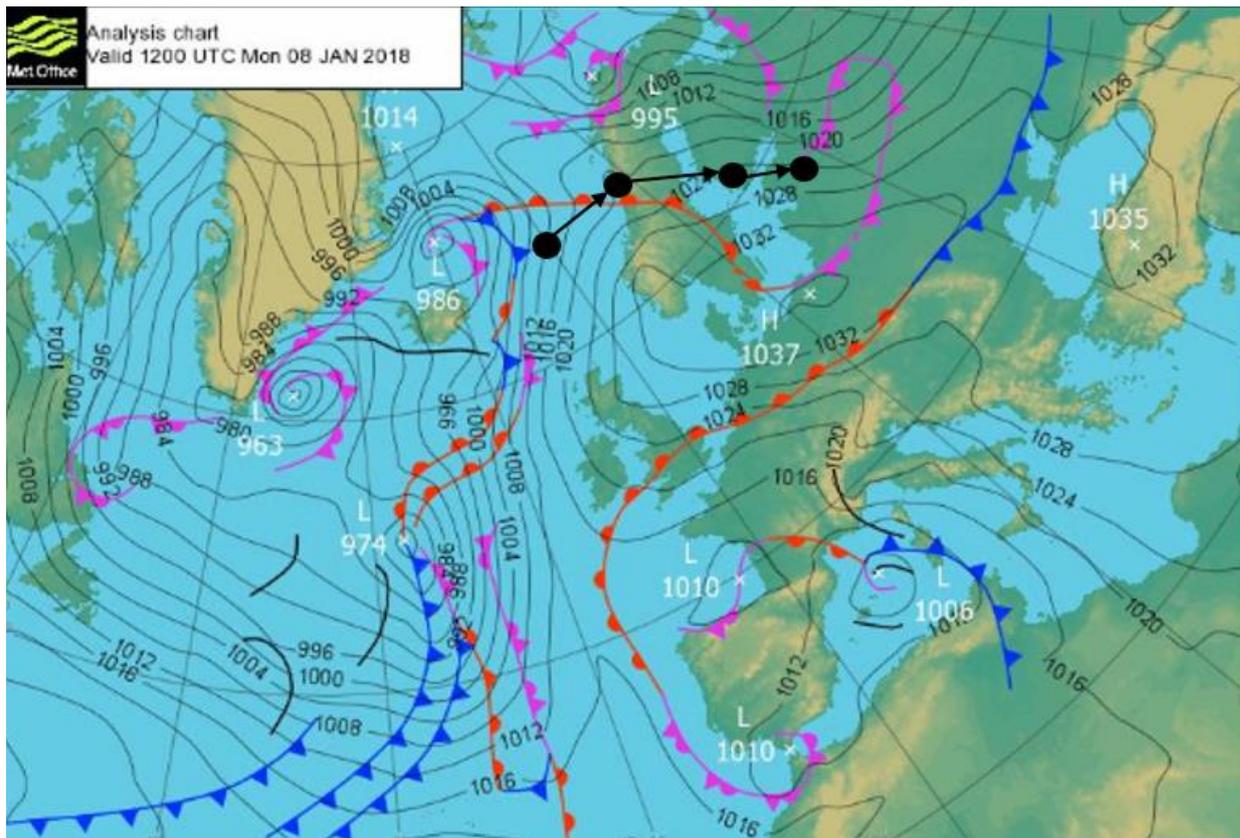


Рисунок 2.1 Синоптическая карта за срок 48 часов на 08 января 2018 года с траекторией циклона, который привел к подъему уровня 214 см в 15 час МСК на внешней стороне КЗС. Указаны точки положения центра циклона за сроки 00 UTC 7 января, 12 UTC 7 января, 00 UTC 8 января и 12 UTC 8 января.

На рисунке 2.1 можно отследить движение циклона с запада, тип синоптической ситуации С. Минимальное давление в центре составило 991 гПа.

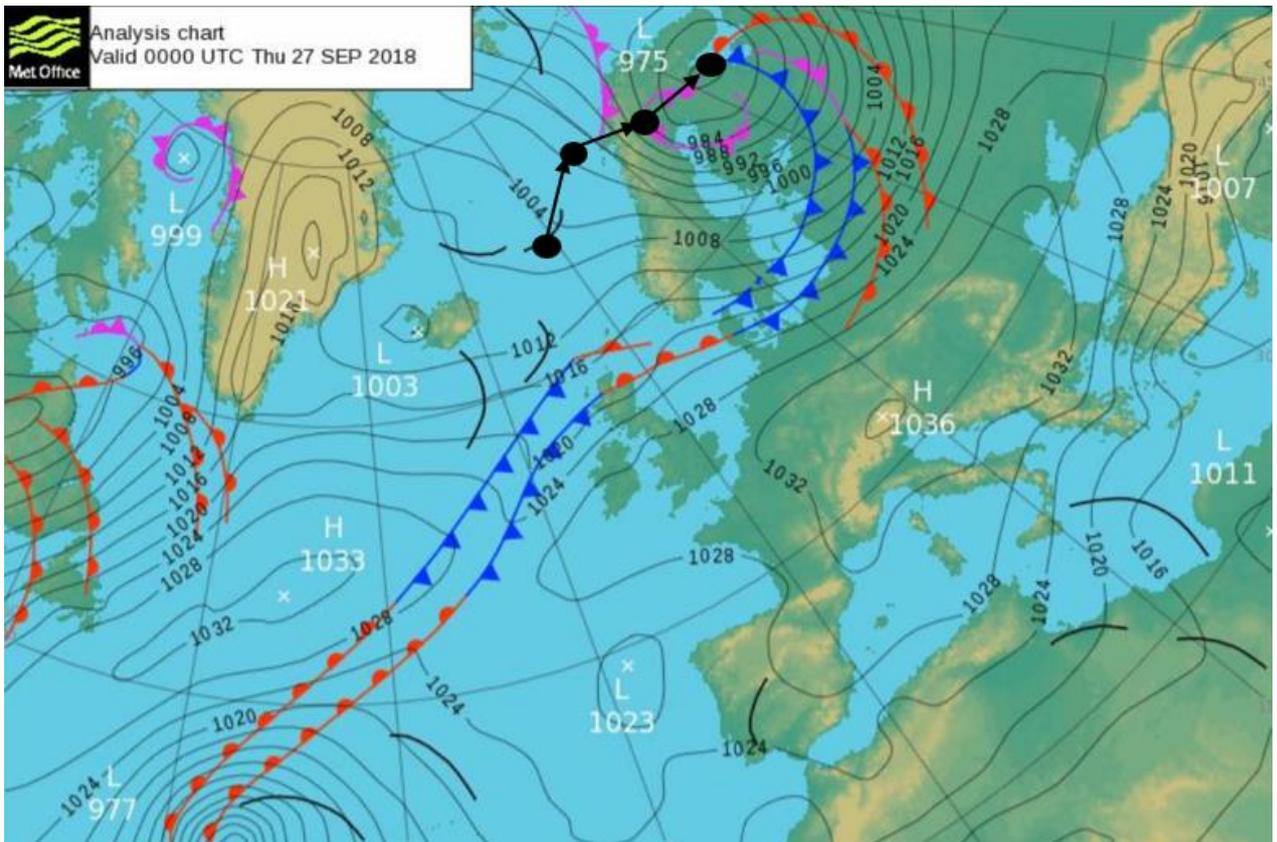


Рисунок 2.2 Синоптическая карта за период 48 часов 26 сентября 2018 года с траекторией циклона, который привел к подъему уровня 218 см в 22 час МСК на внешней стороне КЗС. Указаны точки положения центра циклона за сроки 00 UTC 25 сентября, 12 UTC 25 сентября, 12 UTC 26 сентября и 00 UTC 27 сентября.

На рисунке 2.2 видно, что циклон движется с северо-запада, тип траектории Е. Минимальное давление в центре составило 975 гПа.

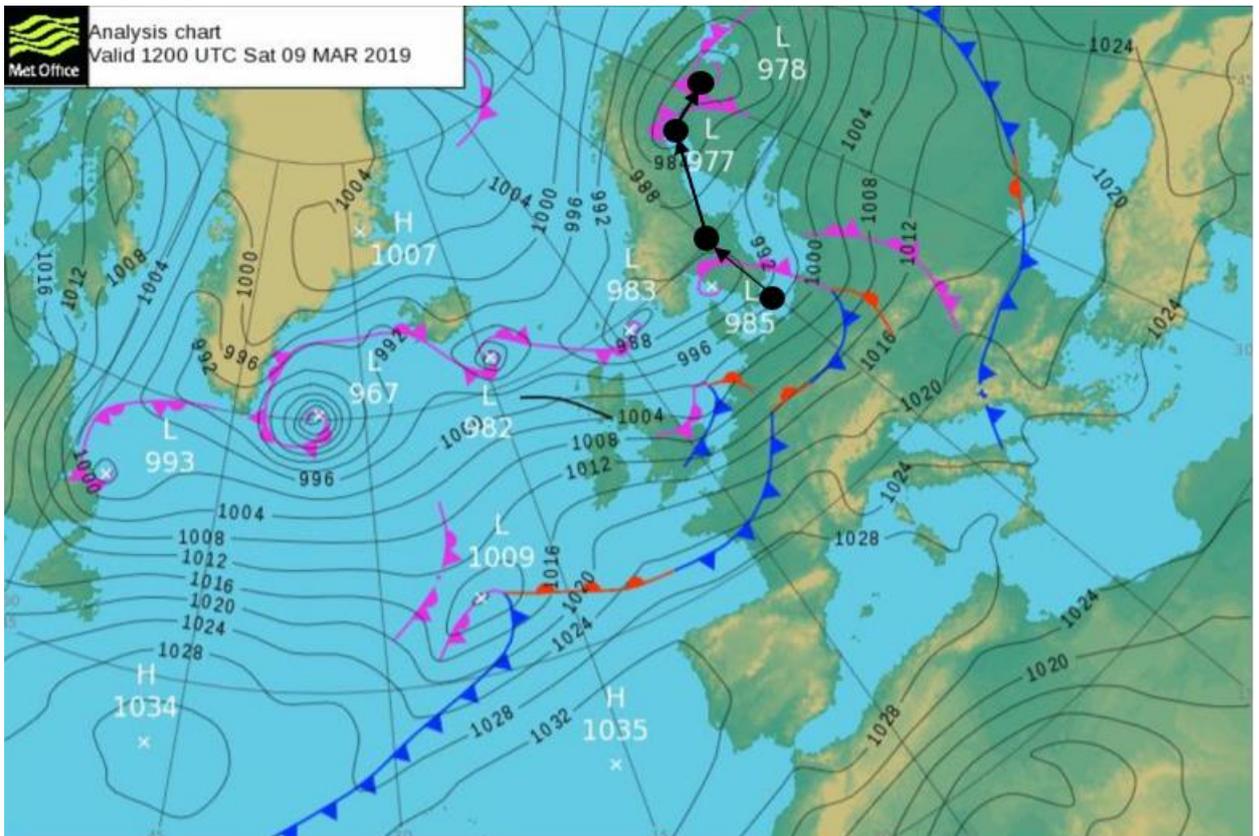


Рисунок 2.3 Синоптическая карта за период 48 часов 09 марта 2019 года с траекторией циклона, который привел к подъему уровня 180 см в 10 час 51 мин МСК на внешней стороне КЗС. Указаны точки положения центра циклона за сроки 00 UTC 08 марта, 12 UTC 08 марта, 00 UTC 09 марта и 12 UTC 09 марта.

На рисунке 2.3 можно отметить, что циклон движется с юго-запада, тип траектории А. Минимальное давление в центре составило 975 гПа.

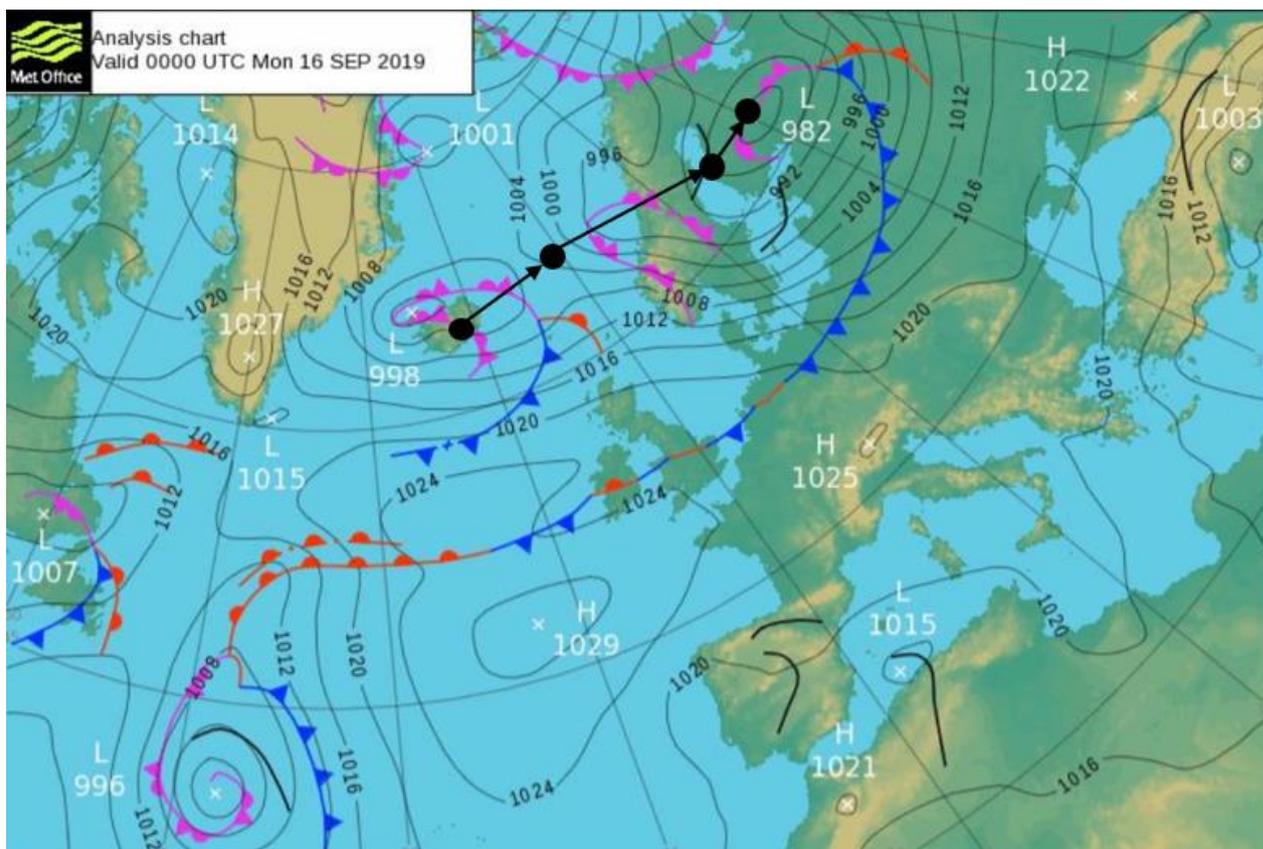


Рисунок 2.4 Синоптическая карта за период 48 часов 15 сентября 2019 с траекторией циклона, который привел к подъему уровня 170 см в 20 час 50 мин МСК на внешней стороне КЗС. Указаны точки положения центра циклона за сроки 12 UTC 14 сентября, 00 UTC 15 сентября, 12 UTC 15 сентября и 00 UTC 16 сентября.

На рисунке 2.4 можно заметить движение циклона с северо-запада, тип траектории Е. Минимальное давление в центре составило 977 гПа.

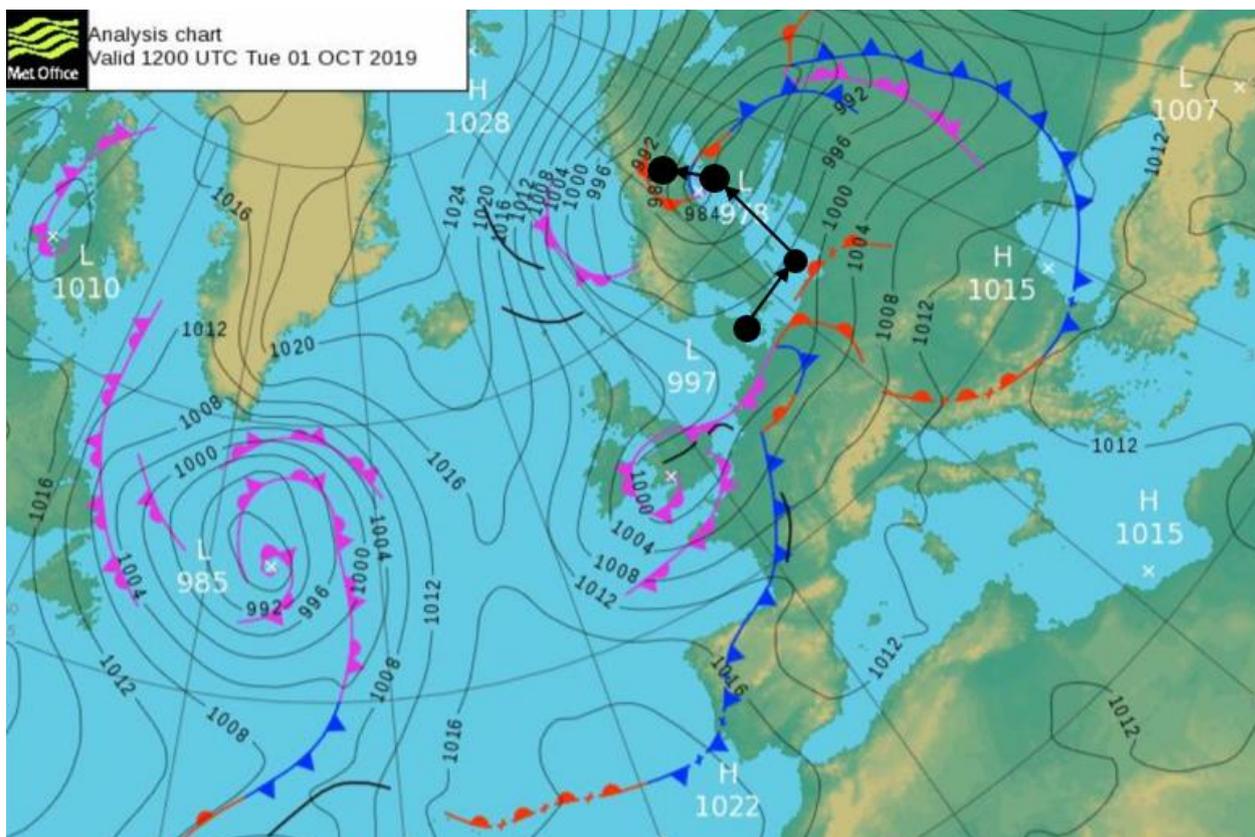


Рисунок 2.5 Синоптическая карта за период 48 часов 01 октября 2019 с траекторией циклона, который привел к подъему уровня 165 см в 13 час 00 мин МСК на внешней стороне КЗС. Указаны точки положения центра циклона за сроки 00 UTC 30 сентября, 12 UTC 30 сентября, 00 UTC 01 октября и 12 UTC 01 октября.

На рисунке 2.5 можно отметить, что циклон движется с юго-запада, тип траектории А. Минимальное давление в центре составило 979 гПа.

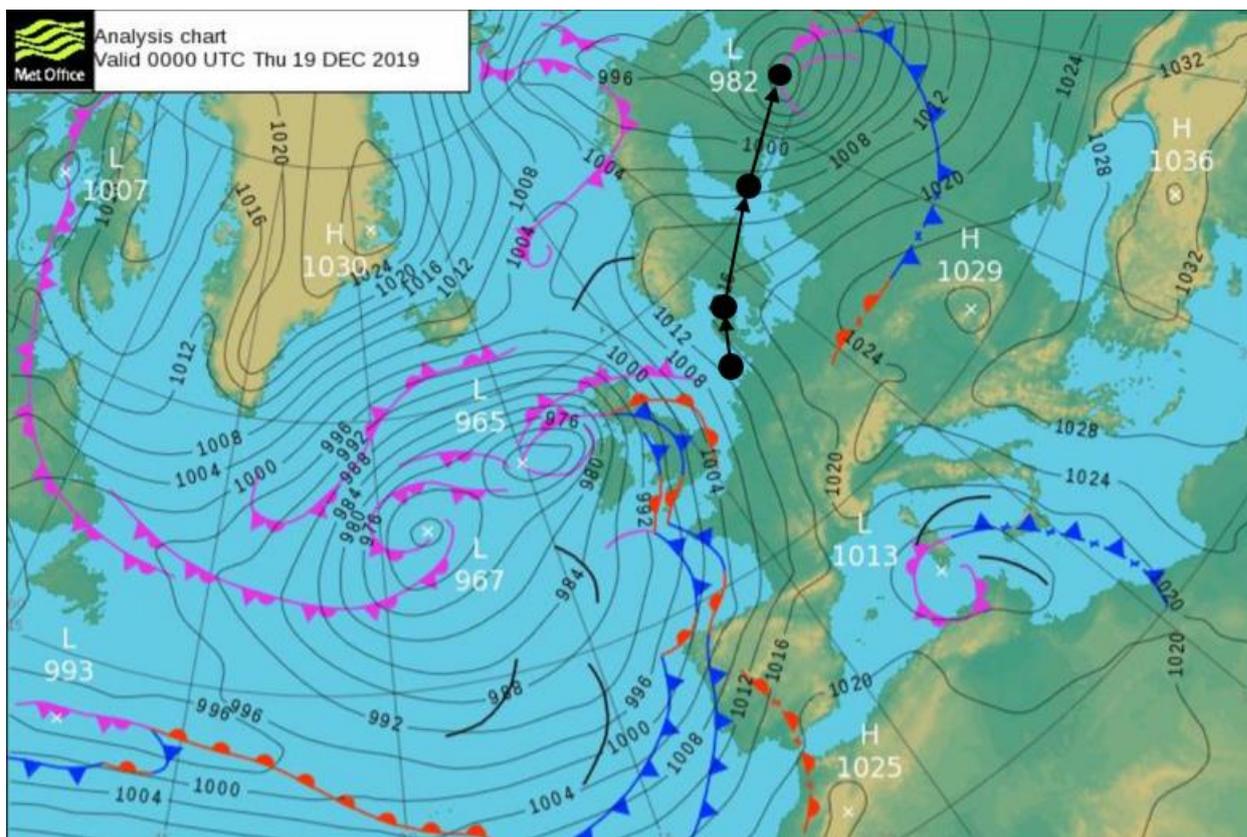


Рисунок 2.6 Синоптическая карта за период 48 часов 19 декабря 2019 с траекторией циклона, который привел к подъему уровня 136 см в 00 час 13 мин МСК на внешней стороне КЗС. Указаны точки положения центра циклона за сроки 12 UTC 17 декабря, 00 UTC 18 декабря, 12 UTC 18 декабря и 00 UTC 19 декабря.

На рисунке 2.6 можно отметить, что циклон движется с юго-запада, тип траектории А. Минимальное давление в центре составило 984 гПа.

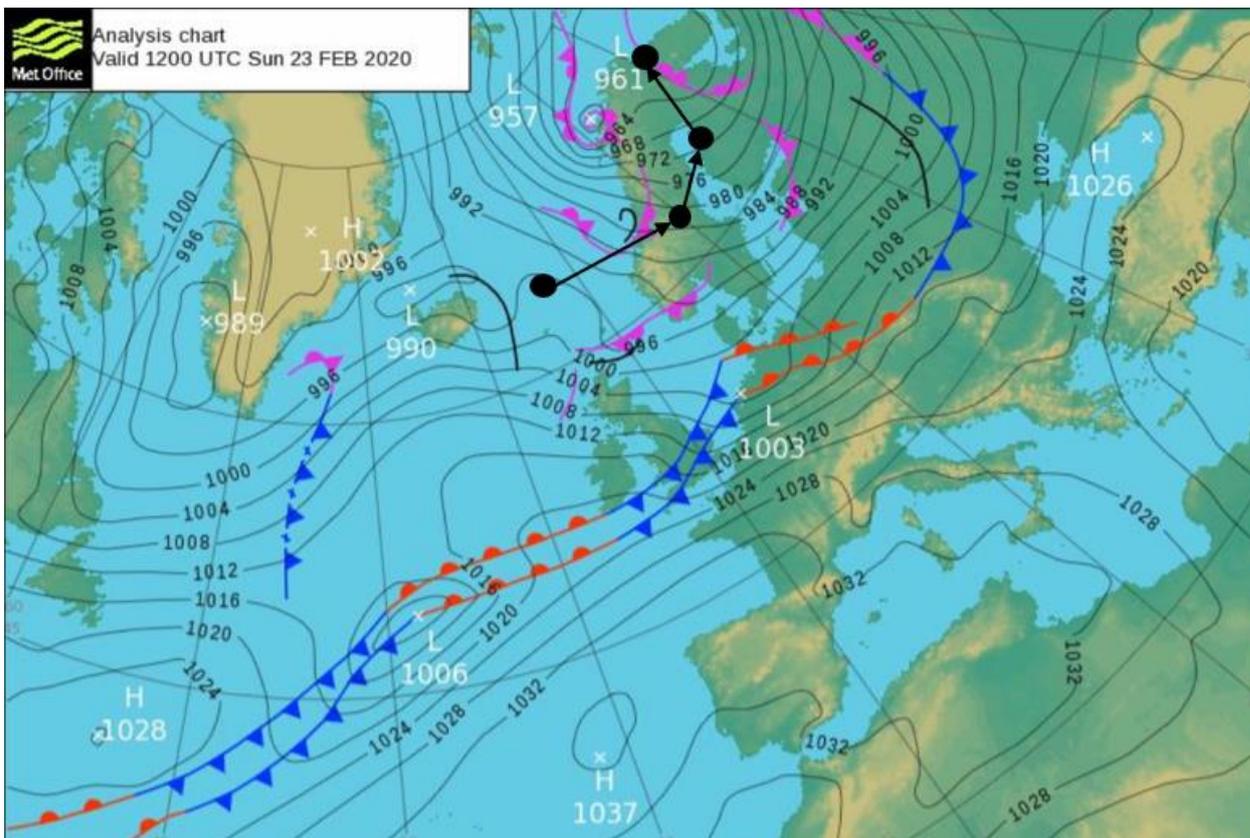


Рисунок 2.7 Синоптическая карта за период 48 часов 23 февраля 2020 года с траекторией циклона, который привел к подъему уровня 196 см в 01 час 00 мин МСК на внешней стороне КЗС. Указаны точки положения центра циклона за сроки 00 UTC 22 февраля, 12 UTC 22 февраля, 00 UTC 23 февраля и 12 UTC 23 февраля.

На рисунке 2.7 можно отметить, что циклон движется с северо-запада, тип траектории Д. Минимальное давление в центре составило 958 гПа.

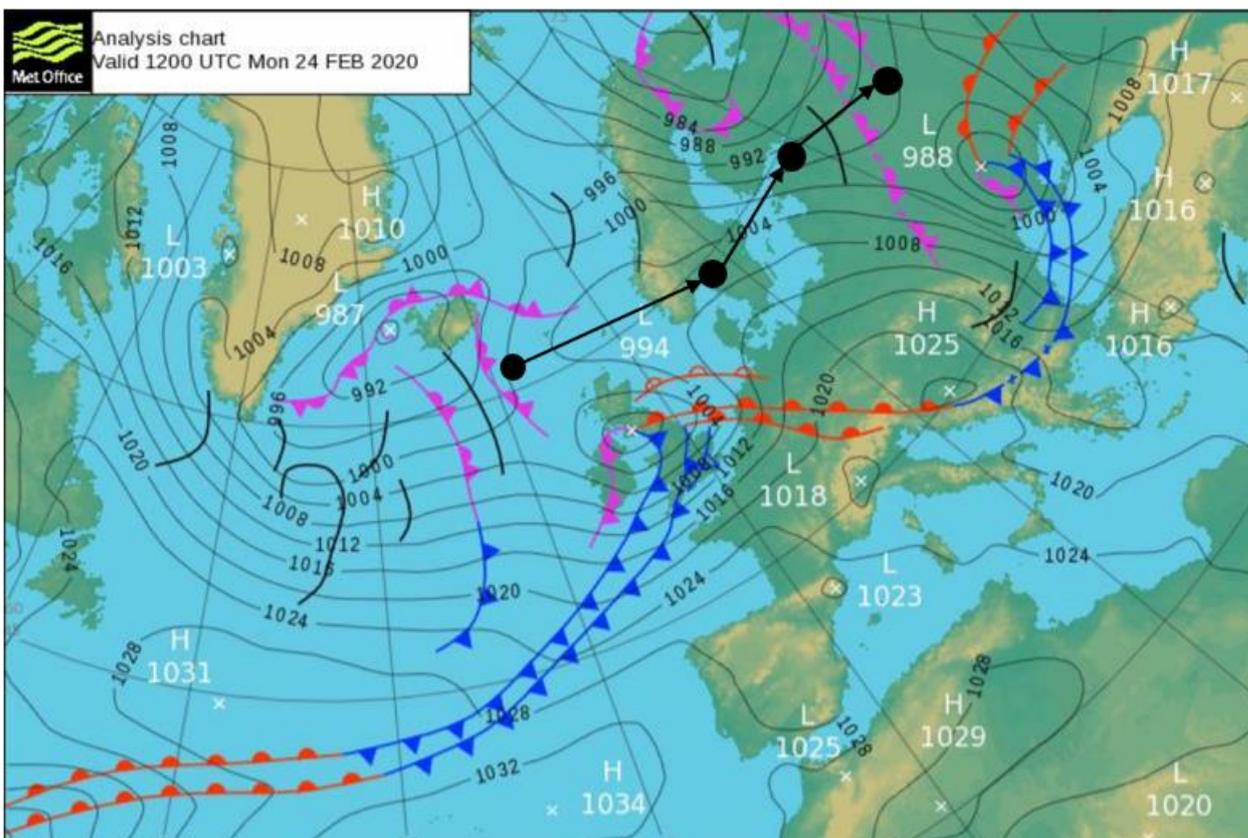


Рисунок 2.8 Синоптическая карта за период 48 часов 24 февраля 2020 года с траекторией циклона, который привел к подъему уровня 172 см в 03 час 00 мин МСК на внешней стороне КЗС. Указаны точки положения центра циклона за сроки 00 UTC 23 февраля, 12 UTC 23 февраля, 00 UTC 24 февраля и 12 UTC 24 февраля.

На рисунке 2.8 можно отметить, что циклон движется с юго-запада, тип траектории А. Минимальное давление в центре составило 987 гПа.

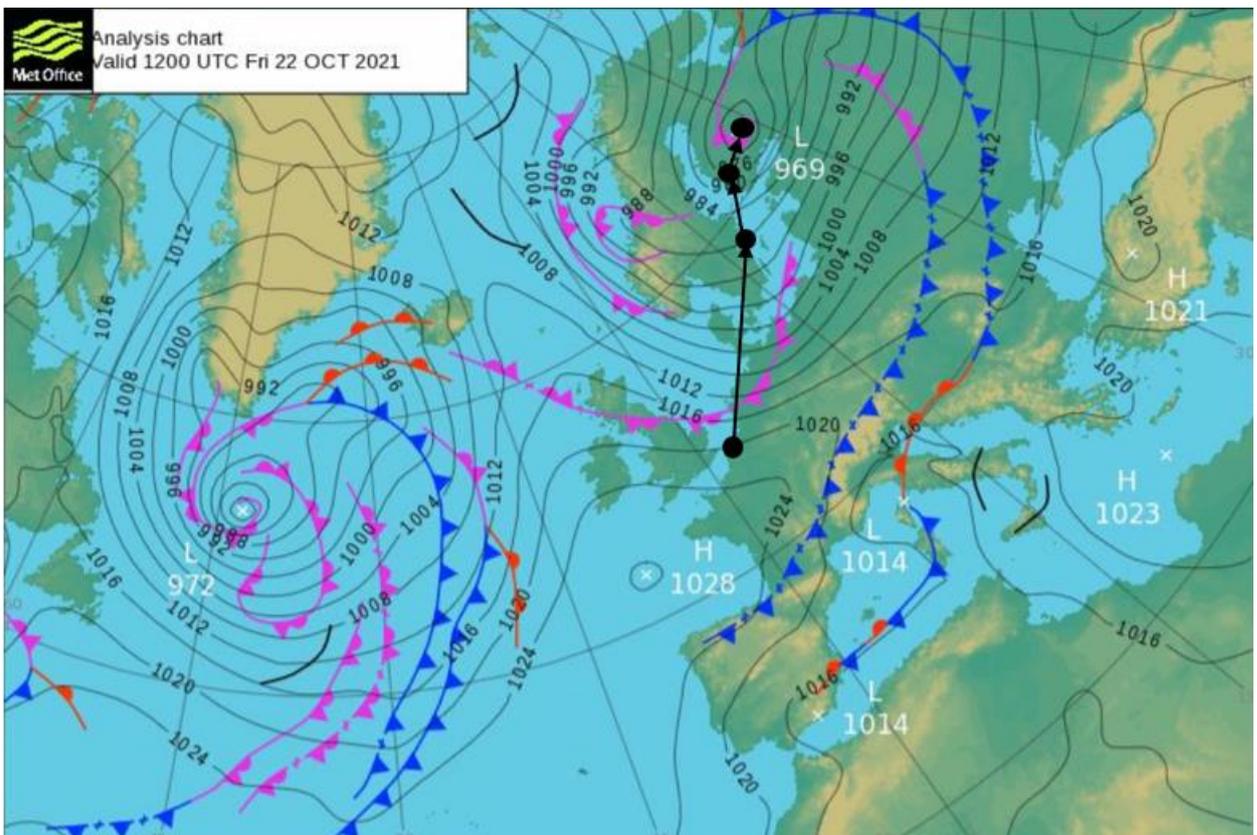


Рисунок 2.9 Синоптическая карта за период 48 часов 22 октября 2021 с траекторией циклона, который привел к подъему уровня 218 см в 23 час 40 мин МСК на внешней стороне КЗС. Указаны точки положения центра циклона за сроки 00 UTC 21 октября, 12 UTC 21 октября, 00 UTC 22 октября и 12 UTC 22 октября.

На рисунке 2.9 можно отметить, что циклон движется с юго-запада, тип траектории А. Минимальное давление в центре составило 969 мм.рт.ст.

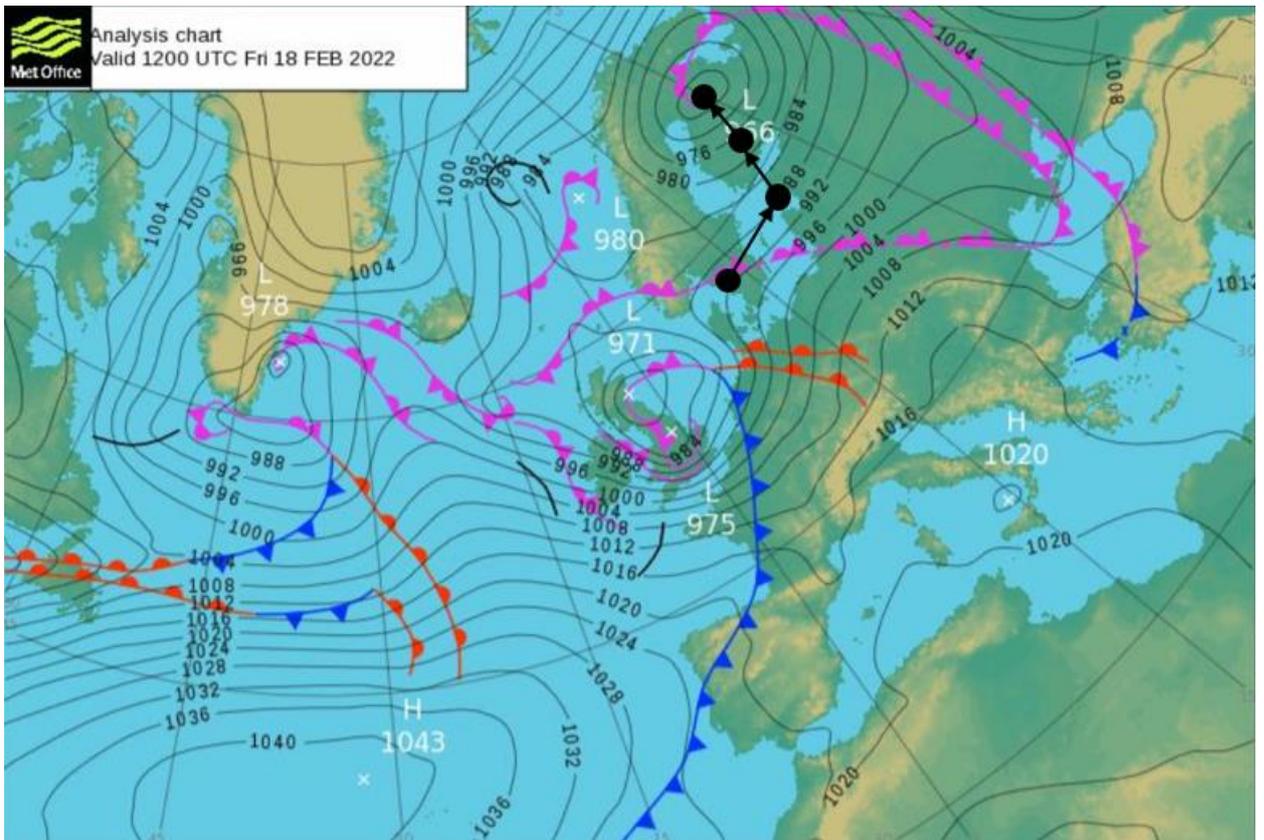


Рисунок 2.11 Синоптическая карта за период 48 часов 18 февраля 2022 года с траекторией циклона, который привел к подъему уровня 167 см в 21 час 20 мин МСК на внешней стороне КЗС. Указаны точки положения центра циклона за сроки 00 UTC 17 февраля, 12 UTC 17 февраля, 00 UTC 18 февраля и 12 UTC 18 февраля.

На рисунке 2.11 можно отметить, что циклон движется с юго-запада, тип траектории А. Минимальное давление в центре составило 960 гПа.

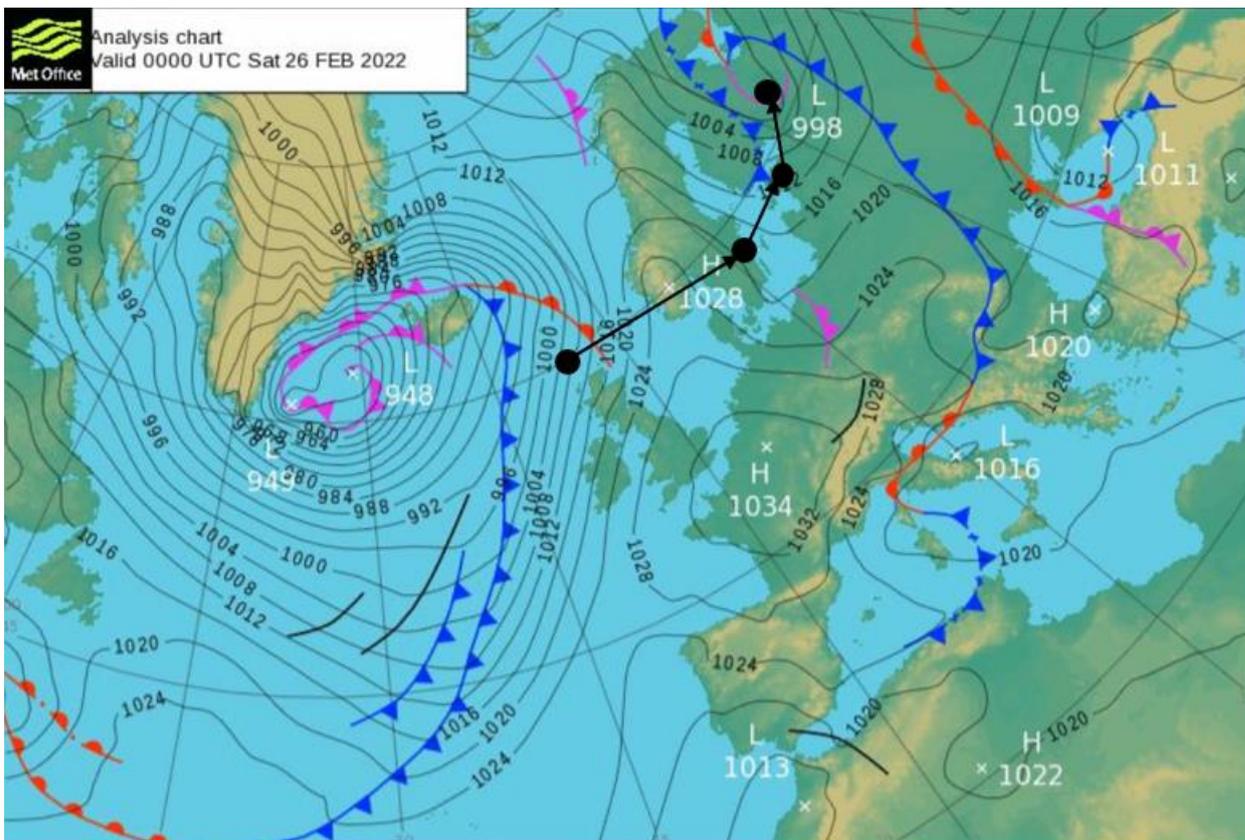


Рисунок 2.12 Синоптическая карта за период 48 часов 25 февраля 2022 года с траекторией циклона, который привел к подъему уровня 174 см в 18 час 00 мин МСК на внешней стороне КЗС. Указаны точки положения центра циклона за сроки 12 UTC 24 февраля, 00 UTC 25 февраля, 12 UTC 25 февраля и 00 UTC 26 февраля.

На рисунке 2.12 можно заметить, что циклон движется с юго-запада, тип траектории А. Минимальное давление в центре составило 981 гПа.

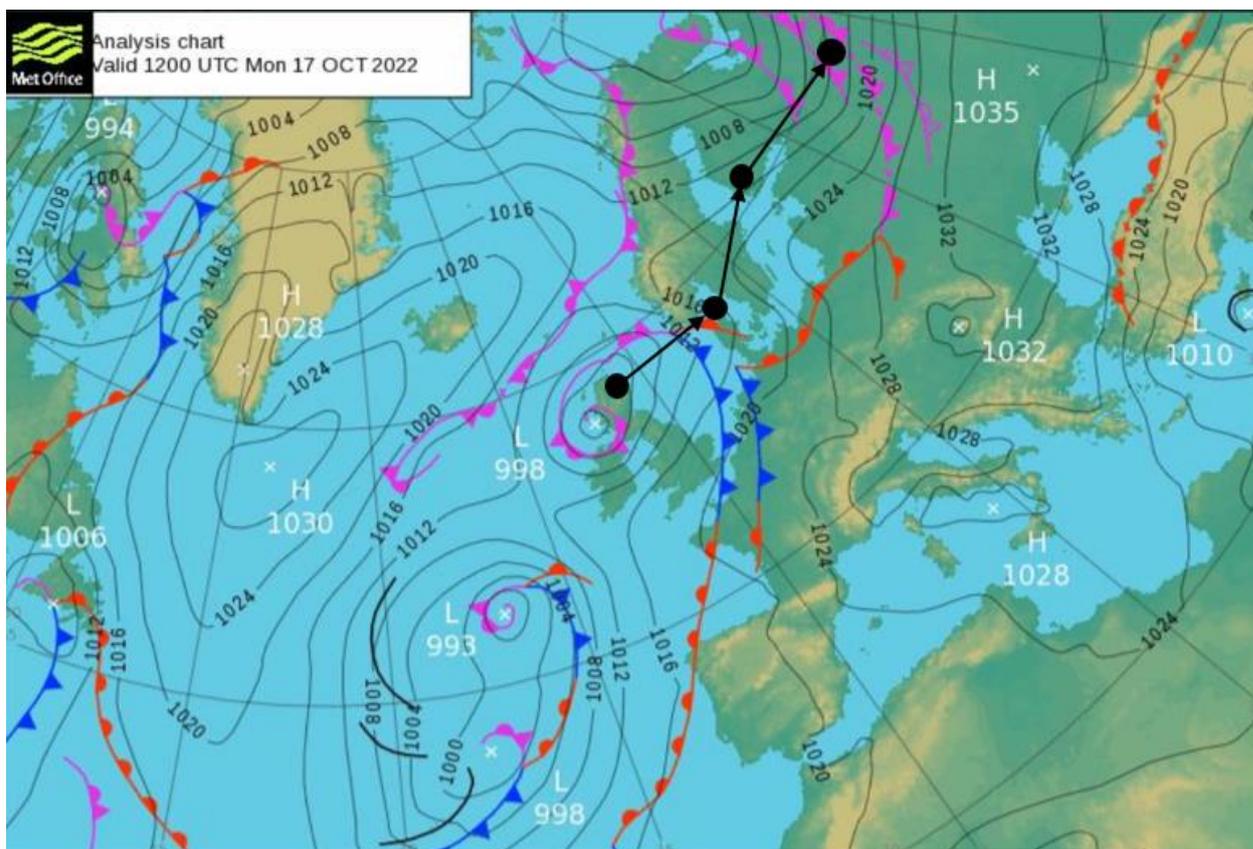


Рисунок 2.13 Синоптическая карта за период 48 часов 17 октября 2022 года с траекторией циклона, который привел к подъему уровня 170 см в 03 час 00 мин МСК на внешней стороне КЗС. Указаны точки положения центра циклона за сроки 00 UTC 16 октября, 12 UTC 16 октября, 00 UTC 17 октября и 12 UTC 17 октября.

На рисунке 2.13 можно отметить, что циклон движется с запада, тип траектории С. Минимальное давление в центре составило 992 гПа.

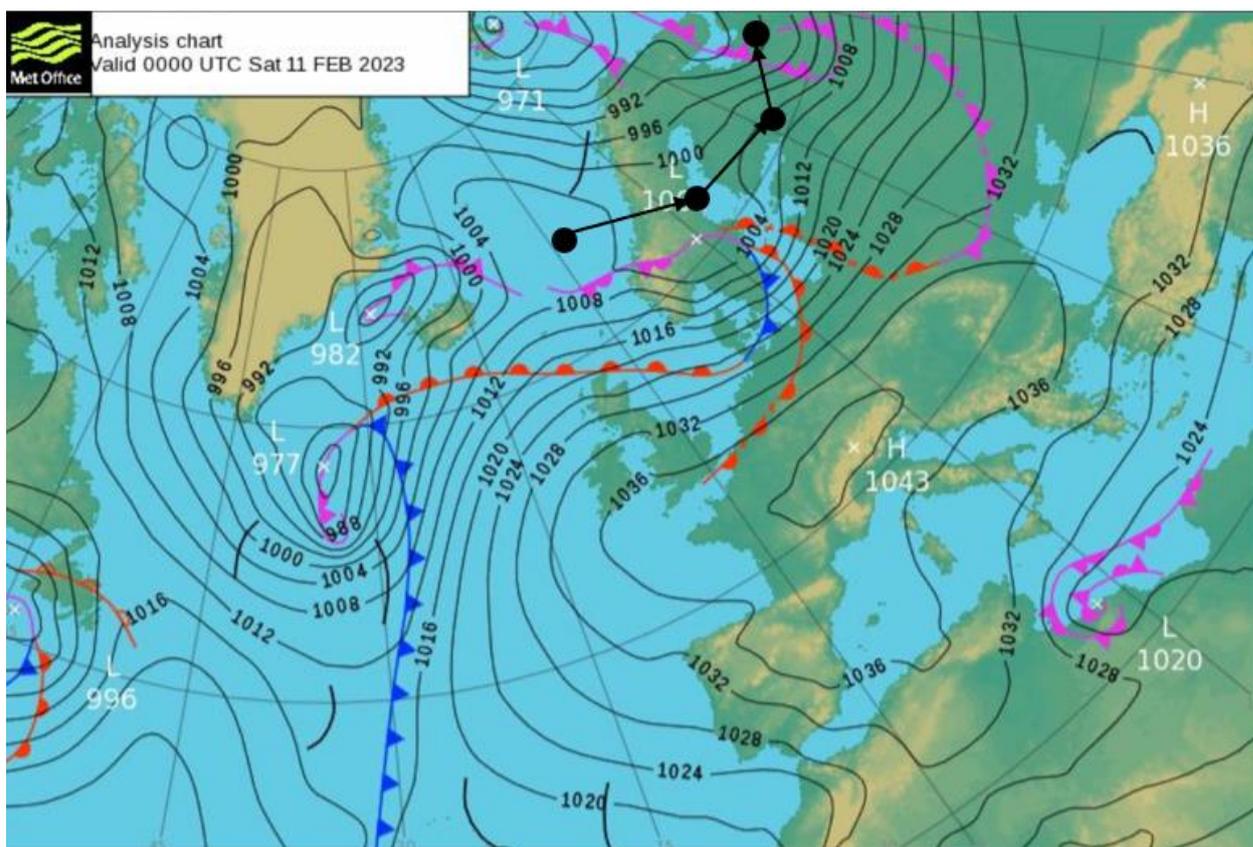


Рисунок 2.14 Синоптическая карта за период 48 часов 10 февраля 2023 с траекторией циклона, который привел к подъему уровня 184 см в 03 час 00 мин МСК на внешней стороне КЗС. Указаны точки положения центра циклона за сроки 12 UTC 09 февраля, 00 UTC 10 февраля, 12 UTC 10 февраля и 00 UTC 11 февраля.

На рисунке 2.14 можно отметить, что циклон движется с северо-запада, тип траектории Д. Минимальное давление в центре составило 983 гПа.

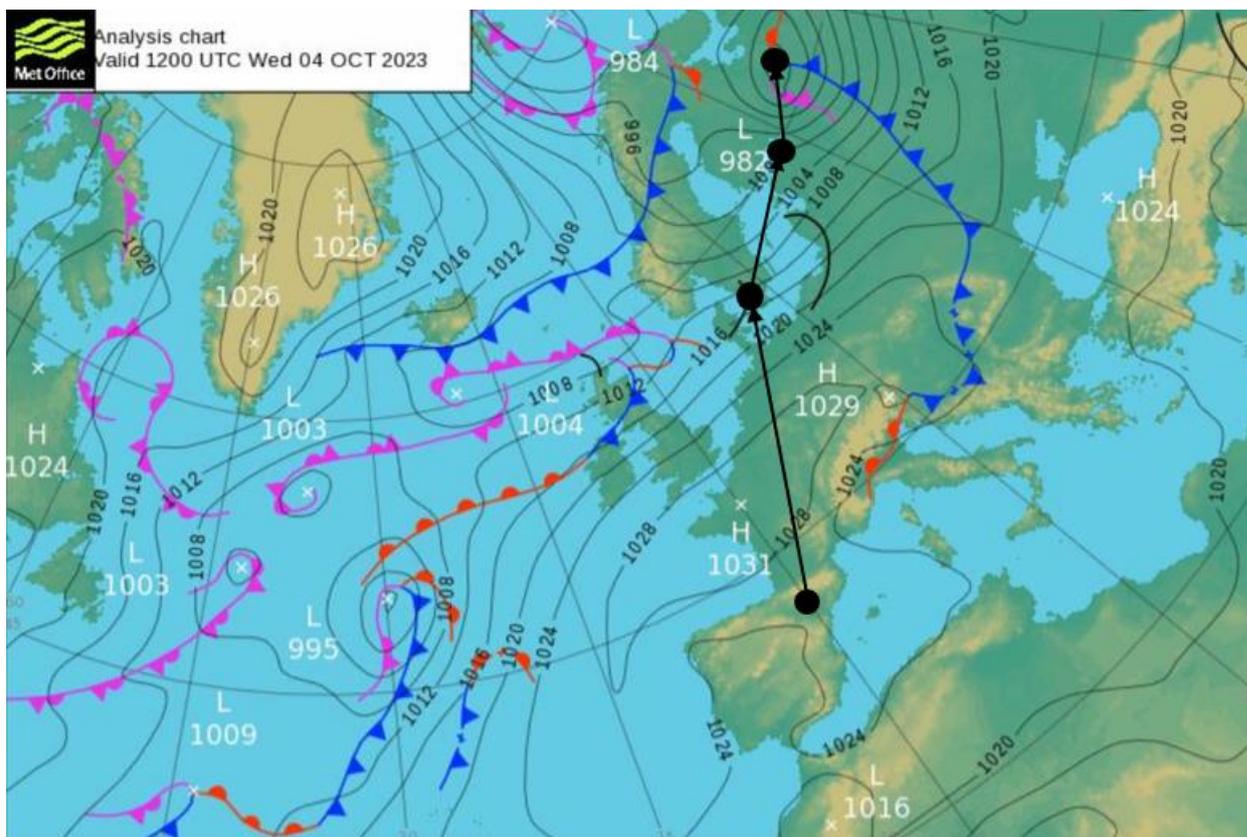


Рисунок 2.15 Синоптическая карта за период 48 часов 04 октября 2023 с траекторией циклона, который привел к подъему уровня 170 см в 16 час 00 мин МСК на внешней стороне КЗС. Указаны точки положения центра циклона за сроки 00 UTC 03 октября, 12 UTC 03 октября, 00 UTC 04 октября и 12 UTC 04 октября.

На рис.2.15 можно отметить, что циклон движется с юго-запада, тип траектории А1. Минимальное давление в центре составило 988 гПа.

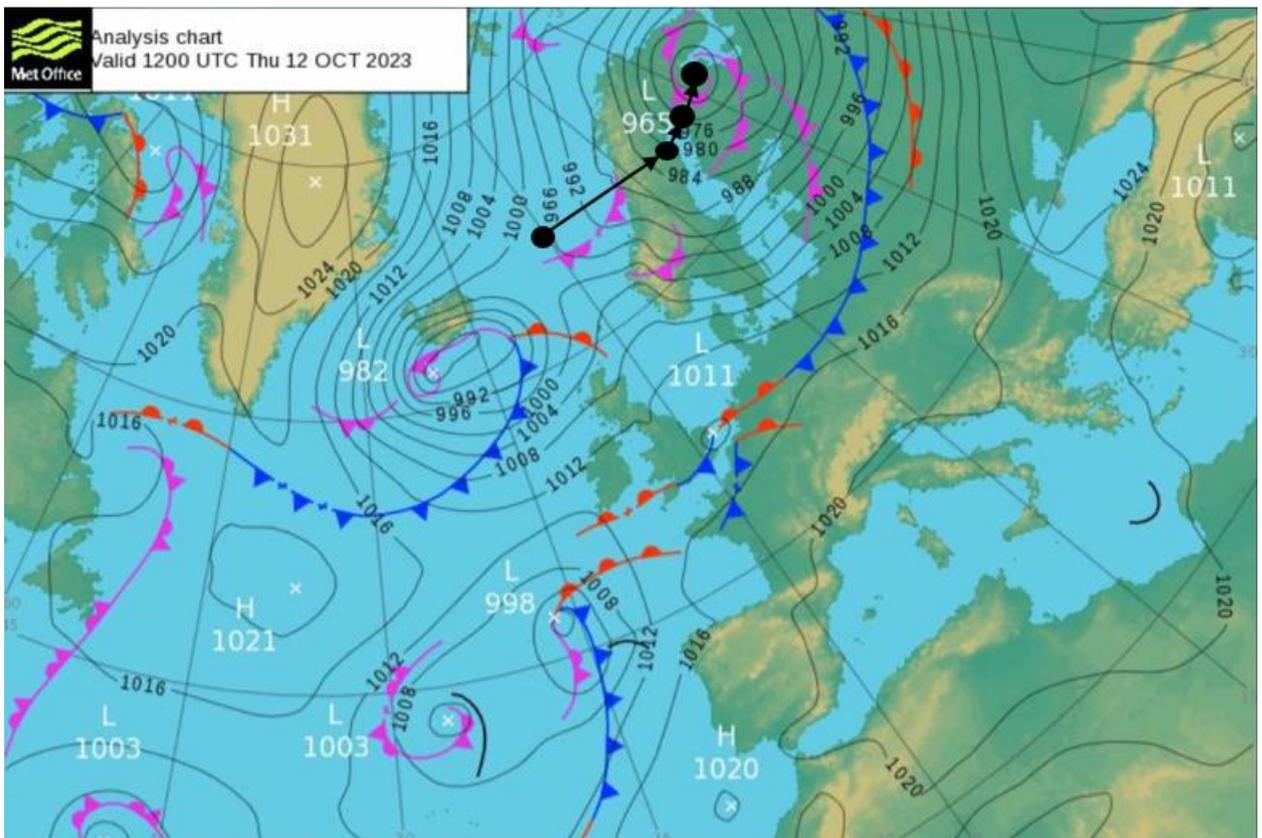


Рисунок 2.16 Синоптическая карта за период 48 часов 12 октября 2023 года с траекторией циклона, который привел к подъему уровня 212 см в 16 час 00 мин МСК на внешней стороне КЗС. Указаны точки положения центра циклона за сроки 00 UTC 11 октября, 12 UTC 11 октября, 00 UTC 12 октября и 12 UTC 12 октября.

На рис.2.16 можно отметить, что циклон движется с северо-запада, тип траектории Е. Минимальное давление в центре составило 965 гПа.

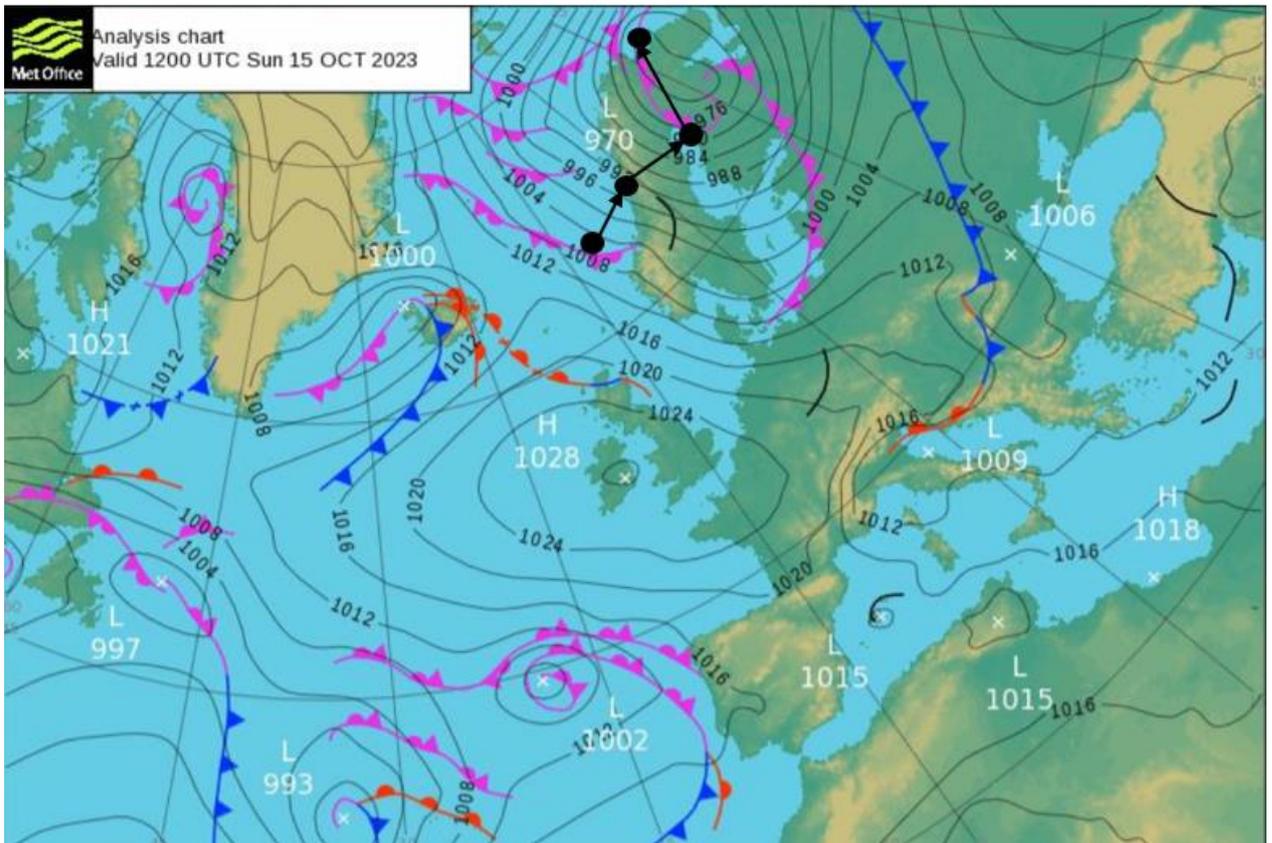


Рисунок 2.17 Синоптическая карта за период 48 часов 15 октября 2023 с траекторией циклона, который привел к подъему уровня 222 см в 03 час 00 мин МСК на внешней стороне КЗС. Указаны точки положения центра циклона за сроки 00 UTC 14 октября, 12 UTC 14 октября, 00 UTC 15 октября и 12 UTC 15 октября.

На рисунке 2.17 можно отметить, что циклон движется с северо-запада, тип траектории Е. Минимальное давление в центре составило 970 гПа.

Далее была составлена таблица 2.1, в которой приведены все случаи подъемов уровня за период с января 2018 по декабрь 2023 года. В таблице указаны даты и время наступления максимального подъема уровня, положение центра циклона, приведшего к этому повышению уровня во время минимального давления в центре и во время максимального подъема уровня (по данным Дирекции КЗС), тип траектории по классификации

Псаломщикова и др [13]. Для дальнейшего анализа мы объединили типы, представленные в статье [13], и называем траектории А и А1 – юго-западные, Д и Е – северо-западные, В и С – западные. Из анализов всех случаев наводнений, наиболее опасными являются западные траектории В и С.

Таблица 2.1 – Архив данных, включающих даты и время (МСК) максимального подъема уровня, типа синоптической ситуации, положения центров циклонов, минимальное давление и направление движения циклона с 2018 по 2023 гг.

№ П/П	Дата, время (МСК), значение макс. подъема уровня	Координаты положения центра циклона при макс. подъеме уровня °с.ш./°в.д.	Дата, время (МСК) при мин. давлении в центре циклона	Координаты положения центра циклона при мин. давлении в центре °с.ш./°в.д.	Значение мин. давления гПа.	Тип траектории по направлению
1	08.01.18 15:00 214 см	59.5 °/30.3 °	07.01.18 15:00	64.8 °/12.2 °	991	Запад (С)
2	26.09.18 22:00 218 см	66.3 °/28.7 °	27.09.18 03:00	64.3 °/35.1 °	975	Северо-запад (Е)
3	09.03.19 10:51 181 см	65.5 °/32 °	09.03.19 03:00	64.4 °/24.5 °	975	Юго-запад (А)
4	15.09.19 20:51 170 см	62.9 °/29.1 °	14.09.19 15:00	63.6 °/-23.3 °	977	Северо-запад (Е)
5	01.10.19 13:00 165 см	64.4 °/19.5 °	01.09.19 03:00	61.8 °/21.7 °	979	Юго-запад (А)
6	19.12.19 00:13 236 см	61.4 °/38.1 °	18.12.19 15:00	60.1 °/23.8 °	984	Юго-запад (А)
7	23.02.20 01:00 196 см	64.6 °/24.6 °	22.02.20 03:00	64.3 °/-1.1 °	958	Северо-запад (Д)
8	24.02.20 03:00 172 см	59.6 °/30.6 °	23.02.20 03:00	61.9 °/-13.4 °	987	Юго-запад (А)
9	22.10.21 23:40 218 см	62.5 °/42.2 °	22.02.21 03:00	62 °/22.5 °	969	Юго-запад (А)
10	24.11.21 170 см	63.8 °/42.7 °	24.11.21 03:00	65.8 °/25.3 °	988	Северо-запад (Е)
11	18.02.22 21:20 167 см	67.2 °/32.4 °	17.02.22 15:00	57.9 °/22 °	960	Юго-запад (А)
12	25.02.22 174 см 21:00	62.3 °/35 °	25.02.22 03:00	58.2 °/17 °	981	Юго-запад (А)
13	17.10.22 03:00 170 см	60.5 °/21.7 °	16.10.22 03:00	58.7 °/-3.9 °	992	Запад (С)
14	10.02.23 184 см	61.6 °/16 °	10.02.23 03:00	59.5 °/-1.52 °	983	Северо-запад (Д)
15	04.10.23 16:00, 170 см	63.7 °/39 °	04.10.23 21:00	64.2 °/41.3 °	988	Юго-запад (А1)
16	12.10.23 16:00 212 см	65.7 °/28.6 °	12.10.23 03:00	65.3 °/25.3 °	965	Северо-запад (Е)
17	15.10.23 03:00, 222 см	65.6 °/23.4 °	15.10.23 3:00	65.6 °/23.4 °	970	Северо-запад (Е)

В приложении А приведена таблица для циклонов, приводивших к наводнению в Санкт-Петербурге и восточной части Финского залива с 2006 по 2023 год в том же формате, что и таблица 2.1.

Таким образом, исходя из полученных данных, можно сделать вывод, что всего было зафиксировано 17 случаев опасного поднятия уровня с 2018 по 2023 гг. Наиболее часто циклоны подходили к г. Санкт-Петербург по траектории А – 7 случаев в направлении с юго-запада. Всего в направлении с юго-запада было зафиксировано 8 случаев, а с северо-запада - 7. Наименьшее количество зафиксированных наводнений было выявлено по траектории С с запада – 2 случая.

По траекториям А и А1 можно выделить, что максимальное поднятие уровня изменялось от 167 до 223 см. Минимальное давление в центре от 960 до 988 гПа.

По траекториям Д и Е можно отметить, что максимальное поднятие уровня изменялось от 170 до 222 см. Минимальное давление в центре от 958 до 988 гПа.

По траектории С можно отметить, что максимальное поднятие уровня изменялось от 170 до 214 см. А минимальное давление в центре колебалось от 991 до 992 гПа.

Как уже было сказано выше, наиболее опасные и значительные подъемы уровня в ВЧФЗ происходят при западных траекториях циклонов. За рассматриваемый период с близкой к западной траекторией отмечено только два циклона, поэтому особенно сильных подъемов, выше 250 см не было зафиксировано.

Глава 3. Анализ циклонической деятельности над районом Балтийского моря и повторяемости наводнений в Финском заливе в период с 1879 по 2023 гг.

Для того, чтобы рассчитать частоту возникновения наводнений в г. Санкт-Петербурге, были использованы архивы с зафиксированными случаями поднятия уровня выше 150 см с 1879 по 2006 год. Затем, к имеющемуся количеству были добавлены более поздние случаи, исходя из полученных данных с сайта Дирекции КЗС [8].

Анализ частоты поднятия уровня выше 150 см представлен на рисунке 3.1 и проводится по пятилетиям с 1879 по 2023 год. Анализируем повторяемость наводнений с конца XIX века, так как до этого фиксация наводнений была менее точна и надежна.



Рисунок 3.1 Частота возникновения наводнений с уровнем выше 150 см с 1879 по 2023 гг. по пятилетиям.

Исходя из полученных данных и рисунка 3.1, можно сделать вывод о том, что повторяемость возрастает по близкому к линейному закону от 4-5

случаев в конце XIX века до 12 в среднем случаев в последние пятилетки. То есть средняя повторяемость наводненческих ситуаций возросла в три раза.

Всего с 1879 года было зафиксировано 218 опасных поднятий уровня выше 150 см.

Для более точного анализа изменений состояния уровня в ВЧФЗ в последние десятилетия, связанных с климатическими изменениями, последние 120 лет были поделены на сорокалетия. С 1904 по 1943 было выявлено 51 наводнение. Среднее количество за пятилетие составило 6,375. Наибольший показатель был достигнут в пятилетие с 1919 по 1923 год, где общее количество случаев составило 10.

С 1944 по 1983 гг. число случаев поднятия уровня составило 49. Среднее значение количества случаев за пятилетие составило 6,125. То есть повторяемость наводнений до 80-х годов XX века оставалась приблизительно на одном уровне. Наибольшее количество наводнений пришлось на период с 1974 по 1978 год и составило 10.

С 1984 по 2023 гг. частота случаев заметно возросла. Среднее количество наводнений за пятилетие составило 11,75 случаев, что выше средних значений предыдущих сорокалетий. Общее количество наводнений составило 94. С 1984 по 1988 год был достигнут максимум количества случаев и он составил 20.

Таким образом, частота случаев опасных поднятий уровня росла не равномерно. Так, начиная с 80-х годов, отмечается значительно большее количество случаев поднятия уровня в сравнении с предыдущими годами. За последние 40 лет частота наводнений по пятилетиям в среднем, увеличилась более чем на 5,3 случаев за пятилетие или почти в два раза по сравнению с частотой в предыдущие 80 лет.

Такое увеличение повторяемости опасных подъемов уровня очевидно связано с общими климатическими изменениями в системе океан-атмосфера. Причем для бассейна Балтийского моря климатические изменения приводят, по всей видимости, к более активной циклонической деятельности над

Атлантико-Европейским регионом, усилению западно-восточного переноса, к увеличению повторяемости ветров западного сектора и соответственно более частым нагонным явлениям в Финском заливе.

Заключение

Сформулируем основные выводы, полученные в работе.

1. Произведен анализ синоптических ситуаций и траекторий циклонов, приведших к опасным подъемам уровня в восточной части Финского залива с 2018 по 2023 гг.

За этот период произошло 17 подъемов уровня выше критических значений в ВЧФЗ, при этом к опасным подъемам в 7 случаях приводили циклоны с северо-западной траекторией движения и в 8 случаях с юго-западной траекторией. Примерно такая же ситуация наблюдалась с 2006 по 2017 гг. Из наиболее опасных, близких к западным траекторий циклонов, отмечено только два случая. Поэтому все подъемы уровня в ВЧФЗ не превышали 236 см, то есть не относились к категории особо опасных и катастрофических.

2. Произведен анализ повторяемости опасных подъемов уровня по 5-ти летним периодам с 1904 по 2023 гг. с 1984 года наблюдается значительное увеличение количества наводнений или опасных подъемов уровня.

За последнее сорокалетие с 1984 года случаи опасных поднятий уровня наблюдались почти в два раза чаще, чем в такие же сорокалетние периоды XX века. С 1904 по 1943 – 51 случай, с 1944 по 1983 – 49 случаев, а с 1984 по 2023 – 94 случая.

Это объясняется, по-видимому, современными изменениями климата, что привело к более частым случаям прохождения активных циклонов над бассейном Балтийского моря и Финского залива.

Список использованных источников

1. Аверкиев А.С. Определение траекторий и скоростей циклона, приводящих к максимальным подъемам воды в Финском заливе // А.С. Аверкиев, К.А. Клеванный // Метеорология и гидрология.–2007.– № 8.–С.55 – 63.
2. Аверкиев А.С. Оценка влияния циклонической активности на колебания уровня воды в Невской губе // Уч. зап. РГГМУ, 2011, № 18. С. 100-111
3. Аверкиев А.С. Колебания уровня воды в Финском заливе и типы атмосферной циркуляции в сборнике: Гидрометеорология и экология: достижения и перспективы раз-вития /МГО 2020 имени Л. Н. Карлина. труды IV Всероссийской конференции. Санкт-Петербург, 2020. С. 5-9.
4. Архив карт Британской метеослужбы : офиц. сайт. – URL: <https://www.metoffice.gov.uk/services/data>
5. Богданов В. И. Кронштадтский футшток и его Шепелевский дублер. -С-Петербургский Научный центр РАН, 2015. - 248 с.
6. 8. Гордеева С.М., Малинин В.Н. Изменчивость морского уровня Финского залива. –СПб.: РГГМУ, 2014. –179с.
7. Дмитриев А.А., Дубравин В.Ф., Беязо В.А. «Атмосферные процессы Северного полушария (1891–2018 гг.), их классификация и использование».- СПб., СУПЕР Издательство, 2018.-306с.
8. Дирекция комплекса защитных сооружений Санкт-Петербурга : офиц. сайт. - URL: <https://dambaspb.ru/#intro>
9. Ефимова Ю.В. Моделирование полей ветра и давления для гидродинамического прогноза штормовых нагонов: Дис. ... канд.геогр.наук: 25.00.30; защищена 2003/ Ефимова Юлия Викторовна.– СПб., 2003.–136 с.
10. Захарчук Е.А., Сухачев В.Н., Тихонова Н.А. Механизмы опасных подъёмов уровня моря в Финском заливе. Изд. «Петербург-XXI век», С-

Петербург, 2017.-152с.

11. Лопатухин Л.И., Миронов М.Е., Померанец К.С., Трапезников Ю.А., Чернышова Е.С. Оценки экстремального ветра и волнения в восточной части Финского залива // Известия ВНИИГ им. Б.Е.Веденеева. Гидравлика гидротехнических сооружений. 2006. Т. 245. С.145-155.
12. Мостаманди, М.С.В. Моделирование полей ветра и давления для гидродинамического прогноза штормовых нагонов: Дис. ... канд.геогр.наук: 25.00.30; защищена 2013/ Мостаманди Мохаммад Сулейман Вахидулла.– СПб., 2013.–113 с.
13. Псаломщикова Л.М., Н.П.Мироничева, Г.Н. Бессан, Н.Р. Швецова. Метеоспектр №10 – статья "Характеристики значительных наводнений в устье Невы при разных синоптических ситуациях", 2010.

Приложение А

Таблица, включающая даты и время (МСК) максимального подъема уровня, типы синоптической ситуации, положения центров циклонов, минимальное давление и направление движения циклона с 2006 по 2017 гг.

№ п/п	Дата, время (UTC), значение максимального подъема уровня в СПб или на КЗС	Дата и время (UTC) минимального давления в центре циклона	Тип синоптической ситуации	Положение центра циклона при максимальном подъеме уровня		Положение центра циклона при минимальном давлении в центре	
				широта	долгота	широта	долгота
1	28.10.2006 02:26 225 см	27.10.06 12:00	В	62.5	38.5	63,5	22.5
2	15.12.2006 02:50 191 см	15.12.2006 12:00	Е	65	35.5	65	40
3	10.01.2007 12:10 223 см	11.01.2007 18:00	А	57.5	11	65.5	35.5
4	15.01.2007 23:20 179 см	14.01.2007 12:00	С	—	—	60	18.5
5	16.01.2007 18:30 168 см	19.01.2007 06:00	А	—	—	57	29
6	18.01.2007 16:10 171 см	18.01.2007 15:00	Д	62	25.5	62	25.5
7	16.10.2008 00:50 186 см	16.11.2008 09:00	С	61.5	30.5	62.5	36
8	28.11.2011 04:00 195 см	27.11.2011 18:00	С	62	1.5	61	23.5
9	26.12.2011 14:00 261 см	27.11.2011 21:00	Е	—	—	63	40.5

10	27.12.2011 14:00 223 см	27.11.2011 21:00	Е	–	–	63	40.5
11	29.10.2013 12:45 196	28.10.2013 18:00	В	65.5	35	58.5	13
12	13.12.2013 05:30 191 см	13.12.2013 15:00	Д	63	36.5	63.5	40
13	2.01.2015 15:30 175 см	01.01.15 00:00	С	62.8	37.3	64	22.7
14	13.01.15 16:00 158 см	11.01.15 00:00	В	63.4	34.3	59.8	24.6
15	10.12.15 22:00	09.12.15 00:00	Д	66.4	11	64.5	2.5
16	27.12.15 00:00	26.12.15 00:00	Е	62.3	47.3	70.9	39.3
17	27.08.16 00:00	29.09.16 00:00	А	54.4	5.6	62.3	40
18	05.12.16 00:00	05.12.16 00:00	Д	60.8	29.8	60.8	29.8
19	12.12.17 00:00	13.12.17 00:00	А	57.8	19.5	68.7	29
20	22.12.17 03:00 174 см	22.12.17 00:00	В	65.6	22.4	65.6	22.4
21	23.12.17 14:30	24.12.17 00:00	Е	62.6	40.2	60.1	13.8