

Министерство образования и науки Российской Федерации  
федеральное государственное бюджетное образовательное  
учреждение высшего образования  
РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЙ  
УНИВЕРСИТЕТ  
(РГГМУ)

Допущена к защите

Зав. кафедрой д.ф.-м.н., профессор

*Т. Р. Ерёмкина*  
Т. Р. Ерёмкина

10.06.2016

Кафедра

промышленной океанологии и охраны  
природных вод

ВЫПУСКНАЯ  
КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА  
БАКАЛАВРА

Параметры и траектории циклонов,  
приводящих к наводнениям в Финском  
заливе. (Обзор за 10 лет и моделирование)

Выполнил

А.В. Давиденко,  
гр. О-55

Руководитель

д.г.н., доцент  
А.С. Аверкиев

Санкт-Петербург 2016

## СОДЕРЖАНИЕ

	Стр.
Введение	4
1 Причины и механизмы наводнений в Финском заливе	6
1.1 Синоптические и климатические условия возникновения наводнений в Финском заливе	9
1.1.1 Повторяемость форм атмосферной циркуляции и уровень Балтики. Классификации атмосферных процессов	9
1.1.2 Формы атмосферной циркуляции	10
1.2 Барические поля над Балтикой, типичные для возникновения наводнений	12
1.2.1 Циркуляционные процессы Балтийского региона. Основные характеристики северо-западных и западных циклонов	12
1.2.2 Синоптическая ситуация, сопутствующая наводнениям в Финском заливе	14
1.3 Прогрессивная длинная волна и её влияние на наводнения в изучаемом регионе	15
1.3.1 Длинные волны на Балтийском море	15
1.4 Сейшевые колебания уровня	16
1.4.1 Сейши Балтийского моря и их связь с наводнениями	17
1.5 Влияние ветра на наводнения в Финском заливе	19
2 Анализ циклонической деятельности за 10 лет над Балтийским регионом	21
3 Параметры и траектории циклонов, приводившие к подъему уровня в Балтийском море	40

	Стр.
Заключение	46
Список использованных источников	47

## ВВЕДЕНИЕ

Побережье Финского залива – территория, страдающая от наводнений. Для жителей, проживающих в этом регионе, для предприятий, расположенных на берегу Балтийского моря, и всей инфраструктуры региона проблема опасных подъемов уровня является весьма актуальной.

Наводнения в Санкт-Петербурге – это главная научная проблема российской гидрометеорологии, прошедшая все ступени исследований – от визуальных наблюдений, описаний, измерений и накопления фактов до раскрытия причин явления и его прогноза на основе математической теории [1].

Уровень воды отсчитывается от среднего многолетнего положения водной поверхности Балтийского моря у острова Котлин. В России он принят за исходный горизонт измерения высот на суше и глубин на морях. Этот горизонт называется «нулем Кронштадтского футштока» или «нулем Балтийской системы высот».

Величины максимальных подъемов уровней распределены по Финскому заливу неравномерно. Это связано с географическим положением объекта, для которого фиксируются ход уровня моря, с морфометрическими характеристиками берегов и конкретной ситуацией, вызывающей наводнение. Учитывая этот факт, а также постоянно существующую угрозу появления опасных наводнений, разработка надежных и заблаговременных методов прогнозирования является *актуальной задачей*.

Эту задачу можно выполнить оценивая индивидуальный и общий вклад в процессы опасных подъемов уровня, а не только принимая в расчет отдельные механизмы и средства прогнозирования.

*Объектом исследования* является траектории перемещения циклонов, приводящих к подъему уровня в Финском заливе.

*Предметом исследования* являются наводненческие ситуации в Финском заливе.

Архив синоптических карт РГГМУ, полученных на факультете метеорологии, и архив наводнений в СПб послужили *исходными материалами* для работы.

Одной из основных причин наводнений в регионе является прохождение над Балтикой крупного барического образования.

*Целью работы* является выяснение параметров и траекторий циклонов, вызывавших максимальные подъемы уровня в восточной части Финского залива за последние 10 лет.

Для её достижения были поставлены *следующие задачи*

- Из архива выбрать опасные максимальные подъемы за период с 2006 по 2011 гг, вызвавшие наводнения в СПб. По данным записей датчиков уровня на КЗС выбрать максимальные подъемы за период с 2011 по 2013 гг.;
- Создать архив синоптических карт, за сроки, соответствующие времени подъемов уровня;
- Произвести анализ синоптических материалов в периоды значительных подъемов уровня в восточной части Финского залива;
- Построить сводные карты траекторий циклонов во время подъемов и таблицы изменения давления в центре;
- Привести траектории «наводненческих» циклонов в соответствии с типизацией, представленной в работе Псаломщиковой и Турыгина [3];
- Определить координаты и давление в центре циклонов, вызвавших опасные подъемы в моменты максимального подъема уровня и в моменты минимального давления в центре циклона.

## 1 Причины и механизмы наводнений в Финском заливе, приводящие к наводнениям в различных частях Балтийского моря

Наводнения в Балтийском море, и в частности в Финском заливе представляют собой очень сложное явление. При их возникновении и развитии участвуют в разных сочетаниях большое количество метеорологических и гидрологических факторов. Значение факторов и характер их сочетаний с другими факторами меняется в зависимости от случая.

При наводненческой ситуации циклоны, фронты и связанные с ними поля давления и ветра обуславливают быстрые деформационные колебания уровня. В зависимости от этих синоптических условий колебания уровня могут принимать вид либо длинной перемещающейся волны, либо приближаться к виду стоячей волны (сейше). Распространяясь в Финском заливе эти волны, под влиянием формы залива и ветра над ним в момент прохождения волны, изменяются. Во время наводнений суммируются различные виды колебаний уровня, то есть происходит наложение перемещающийся длинной волны на сейшеобразную волну. Чаще всего нарастание волны усиливается ветровым нагоном [1].

Наиболее очевидным и ярко выраженным явлением, сопровождающие подъёмы воды при наводнениях в Финском заливе, являются сильный ветер западного или юго-западного направлений.

Ранее наводнения в изучаемом регионе связали с прохождением циклонов, проходящие траектории над центральной Балтикой и Финским заливом или вдоль Балтики по линии Слупск – Турку. Циклоны, являющиеся областями низкого атмосферного давления, проходя над морем, вызывают повышение уровня воды, «всасывая» 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 км<sup>2</sup> у створа мыса Шепелевский является причиной дополнительного повышения уровня. Если же ее распространение сопровождается западным ветром, то высота подъема еще возрастает.

Еще одним фактором, способствующим повышению уровня воды, является стоячая волна в заливе, то есть сейшевое колебательное движение, которое возникает в результате «раскачивания» всей водной массы, причиной которого также может быть прохождение циклонов и длинных волн. Совпадение по фазе и направлению действия всех трёх факторов способно вызвать наибольшие подъёмы воды. Каждый из этих факторов может действовать в отдельности, но с существенно меньшим эффектом в смысле высоты наводнения.

Исходной основной причиной наводнений является атмосферная циклоническая деятельность, происходящая на границе раздела воздушных масс арктических и умеренных широт. Общее распределение по месяцам наводнений связано с сезонными изменениями траекторий движения циклонов в европейской части северного полушария. При этом сезонной

закономерностью изменения траекторий циклонов является их смещение к северу в тёплую часть года и к югу – в холодную [1].

В дальнейшем мы будем использовать типизацию наводнений по траекториям циклона, основываясь на работе Псаломщиковой и Турыгина. На рисунке 1.1 мы можем увидеть траектории перемещения циклонов и условное для них обозначение.

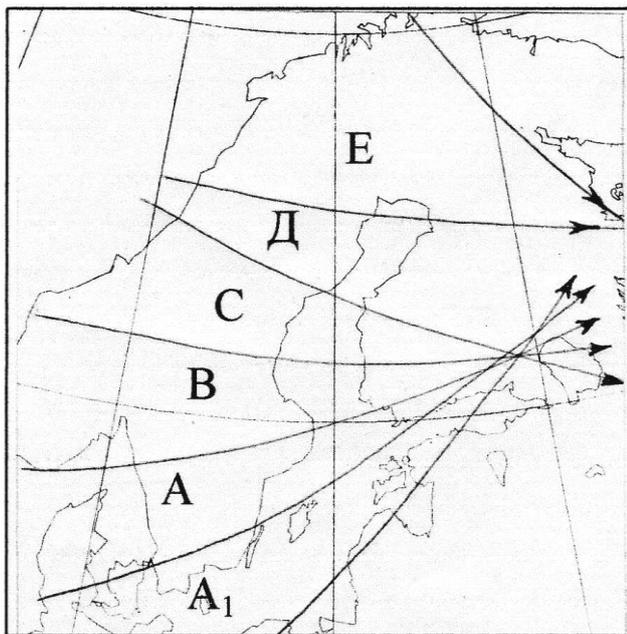


Рисунок 1.1 – Траектории наводненческих циклонов

Подводя итог, можно отметить, что формирование наводнений в Финском заливе определяется следующими условиями:

- образованием и движением циклонов на границе раздела разнородных воздушных масс;
- формированием и распространением длинной волны совместно с движением циклона в восточном направлении.
- ветровым воздействием на водную поверхность, создаваемым западным юго-западными воздушными потоками циклона;
- стоячей волной или сейшевым колебательным движением, обусловленным раскачиванием всей водной массы при прохождении длинной волны;

- трансформацией длинной волны за счёт уменьшения её длины и увеличения высоты при последовательном прохождении всё более узких и мелких частей Финского залива.

Отсюда очевидно, что, если первопричиной изучаемых наводнений является прохождение атмосферных циркуляционных образований, необходимо, прежде всего, рассмотреть повторяемость этих явлений в Северо-Западном регионе.

## 1.1 Синоптические и климатические условия возникновения наводнений в Финском заливе

### 1.1.1 Повторяемость форм атмосферной циркуляции и уровень Балтики. Классификации атмосферных процессов

Совокупность движений и процессов крупного масштаба (макромасштаба) принято называть общей циркуляцией атмосферы. Общая циркуляция атмосферы является процессом такой горизонтальной протяженности, которая сравнима с размерами материков и океанов. На данный момент нас интересует совокупность атмосферных движений и их влияние на подстилающую поверхность, в частности, над Балтийским морем. Климатические условия Балтийского моря определяются в основном макроциркуляционными процессами над атлантико-европейским сектором северного полушария. Гидрологические условия моря в большей степени зависят от изменчивости режимов Северного моря и Северной Атлантики. С помощью типизации атмосферных процессов над атлантико-европейским сектором северного полушария можно описать практически все процессы, влияющие на формирование гидрологического режима Балтийского моря и зоны проливов.

Существует ряд классификаций атмосферных процессов [1], основой которых является принцип аналогичности в локализации барических полей. В них предполагается, что после сходной начальной обстановки развитие

процессов и изменение погоды так же будут сходными. Среди существующих типизаций, отметим некоторые, по которым были получены многолетние каталоги. Типизация атмосферных процессов А.Л. Каца для атлантико-евразийской части северного полушария (от 30° з.д. до 110° в.д.). В основу данной классификации положен анализ циркуляционных характеристик средней тропосферы и использованы количественные оценки интенсивности атмосферной циркуляции.

В классификации Б.Л. Дзердзеевского в качестве признаков, определяющих тип «циркуляционного механизма атмосферы», использовалось число и сопряженность арктических вторжений в умеренные широты. Каталог циркуляционных механизмов включает период с конца 19 до конца 20 века. Типизация распространяется на внетропические районы северного полушария.

Типизация Г.Я. Вангенгейма – А.А. Гирса, позволяет анализировать атмосферные процессы в их непрерывном развитии с разделением на реальные стадии и установлением закономерностей их смены. Выделение форм атмосферной циркуляции основано на учете таких важнейших характеристик атмосферы и гидросферы, как характер длинных термобарических волн в тропосфере и нижней стратосфере, распределение аномалий атмосферного давления, температуры воздуха и осадков у поверхности Земли, уровень и температура воды в океанах и морях. Классификация Вангенгейма – Гирса хорошо отражает особенности атмосферной циркуляции над атлантико-европейским сектором северного полушария, включая Балтийское море. Типизация макросиноптических процессов основана на понятии элементарного синоптического процесса (ЭСП), в течение которого в данном географическом районе сохраняются основные выносы тепла и холода и знак основных барических полей.

### 1.1.2 Формы атмосферной циркуляции

Все виды атмосферных процессов сгруппированы в три формы атмосферной циркуляции [1]: западная (W), восточная (E) и меридиональная (C). При западной форме циркуляции в толще тропосферы преобладают зональные движения воздуха. Преобразование процессов западной формы циркуляции в восточную или меридиональную связано с возникновением в тропосфере малоподвижных или стационарных волн большой амплитуды.

При форме циркуляции C меридиональный воздухообмен наиболее интенсивен. Над Восточной Европой локализована высотная ложбина, к западу от нее высотный гребень. Исландская депрессия ослаблена, очаг циклонической деятельности находится над ЕТР, куда с Баренцева моря могут перемещаться «ныряющие циклоны». При активных циклонах над Баренцевым морем и районом Северной Скандинавии через районы Балтики могут проходить барические ложбины и частные циклоны. Но в большинстве случаев над Скандинавией наблюдаются антициклонические поля и арктические вторжения.

При форме циркуляции W во всей толще атмосферы усиливается западный перенос, отмечается зональное смещение циклонов из Атлантического океана на восток, а в холодное время года – это приводит к теплой погоде. Градиенты давления и температуры при W направлены с юга на север и значительно превышают многолетние значения, что свидетельствует об усилении циркуляции атмосферы и ослаблении межширотного обмена воздушными массами.

Для формы циркуляции E характерно наличие в тропосфере ведущего потока восточного направления и развитие у поверхности земли антициклонов, смещающихся на европейскую территорию с северо-востока. Положение полей приземного давления при формах E и W различаются лишь тем, что при E центры циклонов и антициклонов смещены на запад [2].

Классификация Вангенгейма дает наиболее полное представление об атмосферных процессах, протекающих над атлантико-европейским сектором северного полушария.

1.2 Барические поля над Балтикой типичные для возникновения наводнений

1.2.1 Циркуляционные процессы Балтийского региона. Основные характеристики северо-западных и западных циклонов

Циркуляционные процессы региона, включающего Балтийское море, характеризуются активной циклонической деятельностью с быстрым переносом воздушных масс атлантического происхождения. Циклоническая циркуляция наблюдается около 200 дней в году. Преобладают случаи широтного переноса, с которыми приходят воздушные массы умеренных широт – около 80 %, арктические – от 6 до 17 %, и лишь 1 % – тропические. Почти все воздушные массы, проходящие над данной территорией, из-за больших скоростей ветра мало трансформируются, интенсивность атмосферной циркуляции подчеркивается большим количеством и активностью атмосферных фронтов в среднем их проходит более 170. Со второй половины 20 века отмечается интенсивный рост средней годовой продолжительности процессов зональной западной циркуляции и уменьшение продолжительности меридиональной циркуляции. Ветровой режим также обусловлен особенностями географического положения моря. Направление преобладающих ветров находится в тесной зависимости с сезонной динамикой барических центров Евразии и Северной Атлантики.

Следует помнить, что наводненческий период приходится на период времени с августа по февраль. В зимний период циклоны западных направлений нередко приносят большое количество оттепелей, что усиливает вероятность наводнений. Отсутствие крепкого ледяного покрова в Финском

заливе в мягкие зимы и частое прохождение через Балтику атлантических циклонов повышает вероятность возникновения наводненческой ситуации.

В осенне-зимний период в соответствии с общей циркуляцией атмосферы преобладают ветры южной четверти. Значительная повторяемость (около 40 %) приходится на западные ветра. В начале зимы увеличивается число случаев южных и юго-западных ветров. Юго-западный ветер является наиболее благоприятным для возникновения нагонной волны. Юго-восточные и юго-западные ветры сохраняют высокую повторяемость до конца зимы.

Ветровой режим Балтийского моря связан с поясом повышенного атмосферного давления, которое меняется в течение года. Так с ноября по февраль существует сильный перепад атмосферного давления в направлении с севера на юг. Поэтому зимой изобары направлены с юго-запада на северо-восток, хотя часто наблюдаются отклонения. К весне, с понижением давления на юге, контрасты уменьшаются.

Согласно типизации, принятой составителями справочника [2], зимы подразделяются на 4 класса: мягкие, умеренные, суровые и очень суровые. Каждому типу зим соответствует определенный вид атмосферной циркуляции.

Соответственно, в суровые и очень суровые зимы ввиду прочного ледового покрова уменьшается вероятность наводненческих ситуаций. В суровые зимы устанавливается меридиональная атмосферная циркуляция, преобладают воздействия Карского и Норвежского морей, когда арктический воздух с северными и северо-восточными потоками беспрепятственно проникает в Южную Балтику. Такое разделение используется составителями справочника «Балтийское море» и представляется целесообразным, так как в этих районах обнаруживается заметное различие атмосферных условий в зависимости от сезона.

В мягкие зимы преобладает вторжение воздушных масс с Атлантического океана. Циклоны смещаются по северу Европы через

Англию, Северное море и Скандинавию. Это наиболее вероятная синоптическая ситуация зимних наводнений.

В умеренные зимы наблюдаются черты, как мягких, так и суровых зим. При этом циклоническая деятельность над Балтийским морем прерывается прохождением антициклонических систем, чаще с Гренландского и Баренцева морей. Понижение температуры воздуха в таких случаях может быть значительным, но не продолжительным.

Наводнения в рассматриваемом регионе связаны с сильными и штормовыми циклонами. Последние, в свою очередь, помимо больших градиентов давления, характеризуются также сильными ветрами. Сильными являются ветры, скорость которых превышает 15 м/с. К штормовым относятся ветры со скоростью 20 – 25 м/с. Названия группы штормовых циклонов и антициклонов соответствуют основному направлению их движения, откуда движутся. То есть, они подразделяются на северные, северо-западные, западные, юго-западные, южные, юго-восточные, северо-восточные, восточные циклоны и антициклоны. Сильным наводнениям предшествуют, обычно, западные и северо-западные циклоны. В северной части Балтийского моря наибольшую повторяемость имеют циклоны западного направления (165 случаев из 189 за период с 1966 по 1985 годы).

### 1.2.2 Синоптическая ситуация, сопутствующая наводнениям в Финском заливе

В настоящее время картина синоптической ситуации, приводящей к наводнениям, выглядит следующим образом. Обычно наводнению сопутствует развитие западной формы циркуляции. При пересечении Балтийского моря по опасной траектории, циклон увлекает длинную волну к Ирбенскому проливу и к горлу Финского залива. Высота волны не превышает 30 – 50 см, а скорость распространения гребня сравнима со скоростью движения циклона и составляет 40 – 70 км/ч.

С подходом к вершине Финского залива высота волны возрастает, так как залив делается уже и мельче. Длинная волна пробегает залив примерно за 7 – 8 часов. Если в течение этого времени нет ветра или он очень слабый, то волна распространяется только под действием силы тяжести, т.е. как свободная волна. Однако такие случаи бывают крайне редко, обычно наводнению сопутствует сильный ветер.

Если атмосферный фронт и волна движутся с одинаковой скоростью, то фронт как бы подхлестывает волну, и уровень воды повышается еще и за счет этого. Подобная ситуация складывается в том случае, когда углубляющийся циклон, дойдя до горла Финского залива, поворачивает на восток, а центр его перемещается вдоль залива, находясь при этом севернее.

Вероятность возникновения и прохождения через Балтику наводненного циклона осенью климатически возрастает. Август является первым месяцем «наводненного периода», который заканчивается в январе. Февраль стал наводненным месяцем лишь в конце 20 века.

### 1.3 Прогрессивная длинная волна и её влияние на наводнения в изучаемом регионе

В широком смысле слова «длинными» волнами называют волновые движения, масштаб которых много больше глубины океана (моря). То есть в этот разряд попадают волны с длинами несколько сот метров (в прибрежной зоне – от нескольких десятков метров) до десятков тысяч километров. Характер длинноволновых колебаний уровня океанов и морей в значительной степени обуславливается атмосферными процессами, происходящими над соответствующей акваторией. Увеличение интенсивности атмосферной деятельности приводит к активизации динамических процессов в верхнем слое океана (моря) и возбуждению длинных гравитационных волн [2].

### 1.3.1 Длинные волны на Балтийском море

Прохождение глубоких циклонов над Балтикой часто сопровождается возникновением длинной волны. Особенно интересен для нас случай, когда длинная волна, в зависимости от траектории циклонов, формируется у побережья Швеции. Если циклоны двигаются с юго-запада на северо-восток, то длинная волна увлекается ими к горлу Финского залива и Ирбенскому заливу. Скорость ее движения зависит от глубины дна, над которым она проходит.

В.А. Берг считал, что чисто ветровые наводнения случаются достаточно часто, но они не угрожают сильными наводнениями. Они могут привести к поднятию уровня до 100 – 150 см в Санкт-Петербурге как в самом чувствительном к поднятию уровня пункте ввиду своего географического положения. Наиболее опасный тип наводнений происходит в случае смещения факторов, действующих на длинную волну.

Смешанные наводнения наиболее часто встречаются в природе. Они вызываются совместным действием барометрического давления, ветра и других метеорологических и климатических факторов. Все эти причины могут складываться и тогда на побережье Финского залива образуются катастрофические наводнения, в противном же случае высота наводнений не достигает полной возможной (максимальной) высоты.

### 1.4 Сейшевые колебания уровня

Как уже говорилось ранее, длинные волны могут быть как прогрессивными, так и стоячими. В последнем случае они называются сейшами или сейшеобразными колебаниями. Подобные колебания уровня характерны для замкнутых водоемов. В определенном приближении Балтийское море, глубоко врезавшееся в сушу и соединенное с Атлантикой довольно узкой системой Датских проливов, может быть отнесено к водоемам этого типа.

Сейши возникают в результате денивеляции уровня моря, вызванного внешними факторами (к которым чаще всего относятся достаточно длительные сгоны и нагоны воды), и последующего приведения водных масс в равновесие.

В Балтийском море выделяются два главных направления сейшевых колебаний: центральная Балтика – Финский залив и южная Балтика – Ботнический залив. Сейши разных периодов, совпадая по фазе, могут складываться, причем общая их амплитуда может достигать 140 – 150 см [2].

#### 1.4.1 Сейши Балтийского моря и их связь с наводнениями

Балтийское море с заливами представляет собой почти замкнутый бассейн. Сейши в Балтийском море возникают в результате реакции приспособления водных масс бассейна к нарушениям равновесного состояния под влиянием внешних воздействий (длительный нагон или сгон воды, резкое изменение метеорологических условий – давления, ветра – при прохождении барических образований). Сейшевые колебания охватывают всю толщу вод моря, достаточно быстро возбуждаются, а затухают на протяжении нескольких суток.

Простейший вид сейшевых колебаний – продольная одноузловая сейша, однако, в реальных бассейнах из-за сложности очертаний берегов и рельефа дна сейшевые колебания сопровождаются колебаниями более высокого порядка; двух-, трех-, и даже четырехузловыми и т.д. При этом заливы и бухты являются в определенной степени резонаторами, в которых могут возбуждаться свои собственные колебания.

Установлено несколько типов сейшевых колебаний в Балтийском море. При одной фазе колебаний максимальный уровень наблюдался в юго-западной части Балтики, а минимальный – в восточной части Финского залива, в противоположной фазе – наоборот. Амплитуда колебаний в восточной части Финского залива достигает 100 см, а в юго-западной

Балтике – 70 см. Узловая линия проходит практически по центру Балтийского моря в направлении Лиепая – Ландсорт.

Аналогичный характер имеет одноузловая сейша в системе Балтийское море – Ботнический залив. Амплитуда колебаний в Ботническом заливе достигает величин от 70 до 90 см, а в юго-западной Балтике – от 40 до 50 см. Узловая линия проходит в районе Аландских островов.

Несколько иной характер колебания уровня имеют при двухузловой сейше в системе Балтийское море – Финский залив. Амплитуда колебаний в восточной части Финского залива при таком сейше достигает от 30 до 50 см, а в юго-западной Балтике от 40 до 60 см.

Наиболее часто встречается сейша в Финском заливе с периодом 24 и 8 часов. После катастрофического наводнения 23 сентября 1924 года сформировалась гипотеза возникновения на Балтике так называемой «прогрессивной волны», которая в настоящее время носит название длинной.

Влияние сейш на подъём уровня при формировании наводнений в Балтийском море изучались В.П.Дуровым.

В.П. Дубов, предполагая участие сейш в наводнениях, исследовал в каждом случае промежуток времени между минимумом стояния воды до наводнения и минимумом после. Минимумы на мареографах более ярко выражены, чем максимумы. В работе исследовался период наводнений, а также повторяемость наводнений данного периода. Статистическая обработка данных показала, что самый высокий максимум повторяемости наводнений приходится на период 25 часов, что совпадает с периодом наиболее распространенной двухузловой сейши Балтики, следующий по высоте максимум совпадает с периодом в 30 часов (период двухузловой сейши). То есть, если глубокий циклон совпадает по периоду изменения метеовеличин с периодом сейшевых колебаний, то ветровой нагон и барический фактор будут нивелировать сейшевое колебание, образуя, таким образом, стоячую волну, которая и будет являться причиной наводнений [3, 4].

В.П. Дубовым был сделан вывод, что наводнение может быть крупным по своим размерам только в том случае, если метеорологические условия (барический режим, ветер) изменяются с периодом близким к периодам сейш.

### 1.5 Влияние ветра на наводнения в Финском заливе

Штормовой нагон – это очень пологая волна, длина которой в сотни раз превышает глубину водоема. Она образуется под действием перемещающихся систем штормовых ветров. Существует два основных фактора штормового нагона – это сильные ветра и мелководье.

Мелководная зона океанов и морей называется шельфом. Белое, Балтийское и Северное моря лежат целиком на шельфе. В умеренном поясе северного полушария находится 19 миллионов квадратных километров шельфа из 26, имеющих на Земле. На низких берегах опасность затопления наступает уже при повышении уровня на 1.0 – 1.5 м выше обычного.

Штормовой нагон – движение вынужденное, определяемое воздействием внешних сил касательного напряжения ветра (определяющую роль при взаимодействии ветра с поверхностью воды играют касательные напряжения) и атмосферного давления. В открытом глубоководном океане основную роль в генерации длинных волн играет атмосферное давление, а в мелководных областях – ветер [4].

В морях без приливов во время сильных ветров происходят значительные колебания уровня, называемые сгонно-нагонными колебаниями. Ветер считался основной причиной этих колебаний. Механизм возникновения объяснялся следующим образом: если ветер дует с моря, он нагоняет воду на берег и повышает уровень, при направлении ветра с берега, он отгоняет воду от него в море и понижает уровень. Чем сильнее и продолжительнее ветер, тем больше величина сгона или нагона.

Каждый ветер сопровождается волнами на поверхности моря. Частицы воды при волнении совершает движение по орбитам, близким к круговым. Так как вода не является идеальной жидкостью, а обладает определенной вязкостью, то орбиты эти не замкнуты, и частицы водной массы имеют некоторое поступательное движение. Если на пути движения водных масс встречается препятствие, они начинают скапливаться у него и повышать уровень. Данное явление может служить основой для объяснения повышения уровня в направлении вершин узких заливов и бухт [4].

В природе, колебания уровня являются результатом действия многих сил. Изменение элементов волн (периодов, длин, высот) при переходе на мелководье в прибрежную зону зависят одновременно от многих факторов: от скорости ветра, глубины, трения о дно, уклона дна, начальных элементов волн [6]. Поэтому, в настоящее время механизм возникновения ветровых нагонов описывается различными гидродинамическими моделями. Наиболее популярна для описания и прогноза штормового нагона – система уравнений мелкой воды. Уравнения мелкой воды позволяют учитывать помимо ветра и другие факторы, влияющие на экстремальные повышения уровня. В настоящее время, в практике ГМЦ, используется модель д.ф.-м.н. К.А. Клеванного, которая основана на уравнениях мелкой воды.

Итак, ветровой нагон создает продолжительные сильные ветры. Сильные ветры характерны для глубоких циклонов. Проходящий над водоемом циклон создает не только сгон и нагон, но также и длинную волну и сейшу. Совершенно ясно, что причиной сильного или катастрофического наводнения является сложение факторов, воздействующих на водные массы. Ветровой нагон, по мнению многих факторов, имеет основное значение.

## 2. Анализ циклонической деятельности за 10 лет над Балтийским регионом

Таблица 2.1 является архивом наводнений в Санкт – Петербурге. В ней приведены наводнения с 2006 по 2013 годов. До 2011 года данные по подъему уровня сверялись с Кронштадским футштоком. После 2011 года замеры подъема уровня брали на КЗС.

Таблица 2.1 – Высота, время и порядковый номер подъема уровня в Финском заливе

Номер по СЗУГМС	Год	Дата	Высота подъема уровня (см)	Время
300	2006	28 октября	225	05:26
301	2006	15 декабря	191	05:50
302	2007	10 января	223	15:10
303	2007	16 января	179	02:20
304	2007	16 января	168	21:30
305	2007	18 января	171	19:10
306	2008	3 февраля	198	15:24
307	2008	16 ноября	186	03:50
308	2010	16 ноября	180	06:22
309	2011	28 ноября	195 С-1 (171 прогн)	07:00
310	2011	26 декабря	261 прогн	17:00
		27 декабря	223 прогн	17:00
312	2013	29 октября	216 В-5 , 196 С-1	15:45

Продолжение таблицы 2.1

Номер по СЗУГМС	Год	Дата	Высота подъема уровня (см)	Время
313	2013	17 ноября	151 С-1	15:00
			166 С-2	16:00
314	2013	13 декабря	191 С-1	08:30

На наводненческие ситуации 2014-2015 года информацию не смогли получить, так как они теперь не распространяются (в закрытом доступе), но мы не могли не взять их во внимание.

Поэтому мы использовали даты предотвращенных наводнений:

- 02.01.2015;

-13.01.2015;

-05.12.2015;

-06.12.2015;

-07.12.2015;

-10.12.2015;

-26.10.2015;

Чтобы провести анализ циклонической деятельности за десять лет над Балтийским регионом были нарисованы карты траекторий перемещения циклонов и построены таблицы со временем прохождения циклона определенной точки и размером минимального давления в центре циклона, а также выделены точки, где давление было минимальным.

Проведена типизация каждой представленной синоптической ситуации по классификации Турыгина и Псаломщиковой [5].

Разберем каждое наводнение по отдельности, построим карты перемещения траектории циклона и запишем полученные данные в таблицу.

а) наводнение 28 октября 2006 (рисунок 2.1 и таблица 2.2)

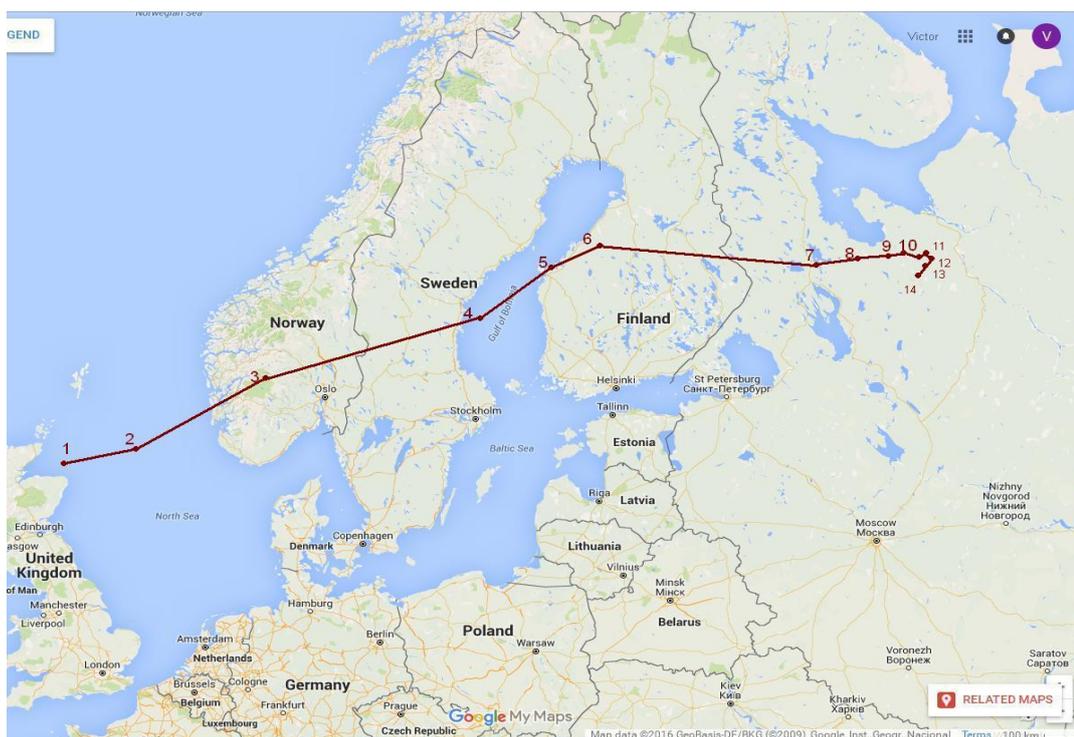


Рисунок 2.1 – Перемещение циклона. Подъем уровня №1.

В данной ситуации циклон перемещается от британских островов до района реки Тегра.

Таблица 2.2 – Давление в центре циклона в определенное время

№ точки	1	2	3	4	5	6	7
Время, дата	06:00 26.10 2006	18:00 26.10 2006	00:00 27.10 2006	06:00 27.10 2006	12:00 27.10 2006	18:00 27.10 2006	00:00 08.10 2006
P	976.4	976.2	981.6	977.4	972.3	975.2	976.8

№ точки	8	9	10	11	12	13	14
время	03:00 28.10 2006	06:00 28.10 2006	09:00 28.10 2006	12:00 28.10 2006	15:00 28.10 2006	00:00 29.10 2006	12:00 29.10 2006
P	977.5	979	978.9	979.2	980	980.7	980.2

Тип наводнения по синоптической ситуации: В

б) Наводнение 15 декабря 2006 (рисунок 2.2 и таблица 2.3)

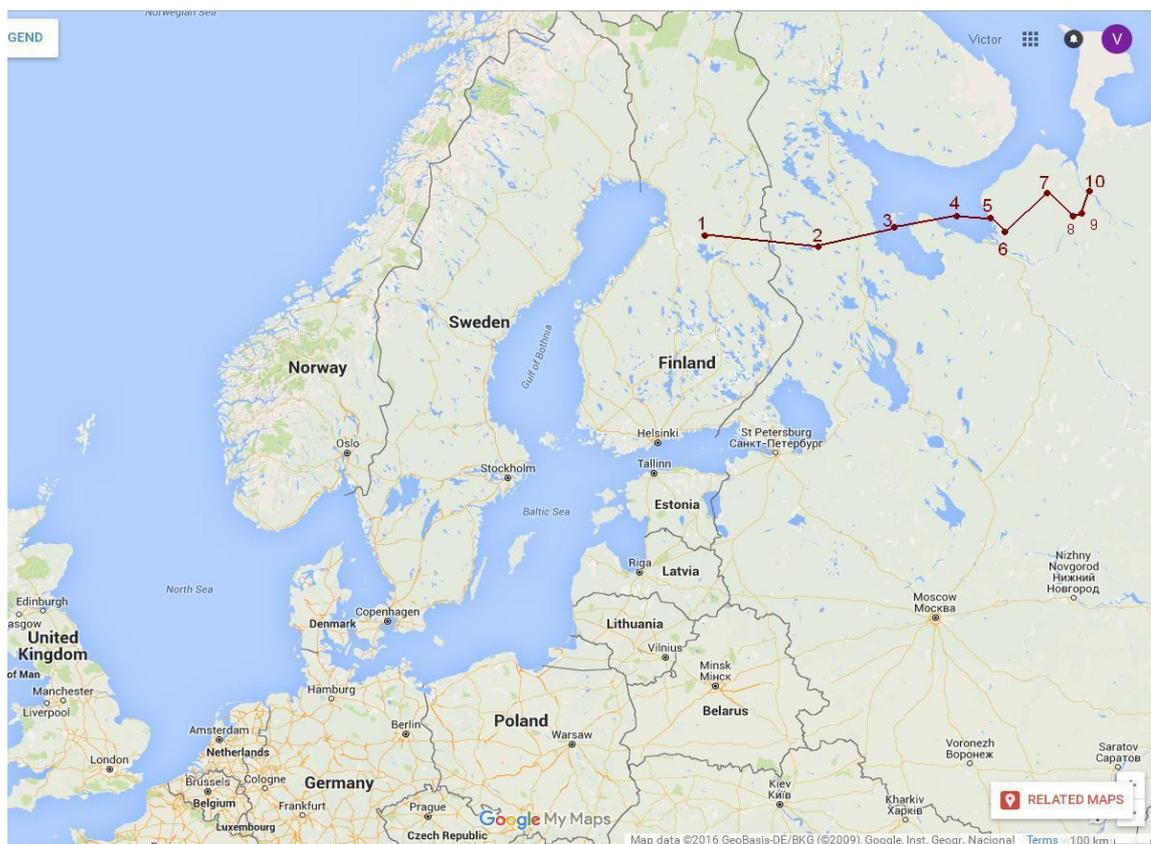


Рисунок 2.2 – Перемещение циклона. Подъем уровня №2.

В данной ситуации циклон перемещается с центра Финляндии до Архангельска.

Таблица 2.3 – Давление в центре циклона в определенное время.

№ точки	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Время, дата	00:00 15.12 2006	03:00 15.12 2006	06:00 5.12 2006	09:00 15.12 2006	12:00 15.12 2006	15:00 15.12 2006	18:00 15.12 2006	21:00 15.12 2006	00:00 16.12 2006	03:00 15.12 2006
P	975.7	972.9	973.9	972.4	969.3	969.7	968	969.1	968.5	969.6

Тип наводнения по синоптической ситуации: Е

в) Наводнение 10 января 2007 (рисунок 2.3 и таблица 2.4)

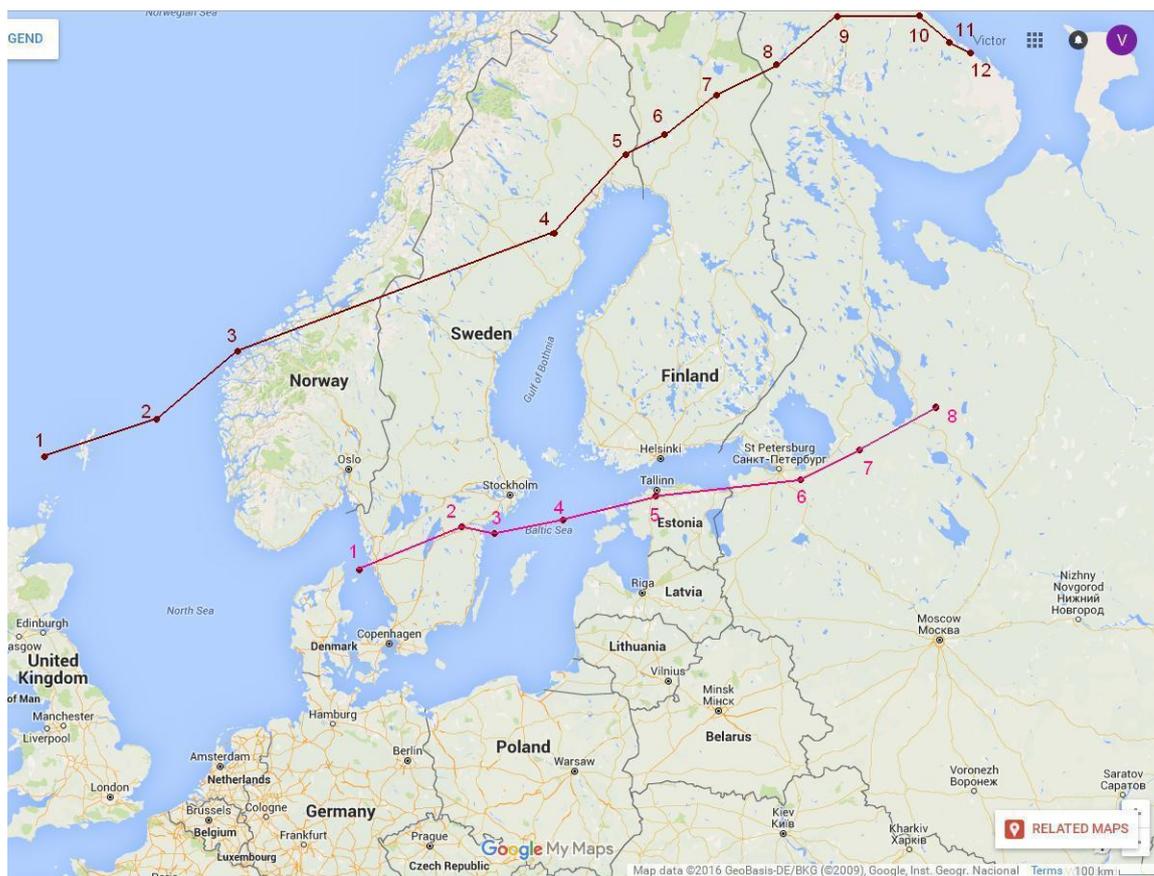


Рисунок 2.3 – Перемещение циклона. Подъем уровня №3.

В данной ситуации циклон с западных берегов Швеции перемещается до восточных берегов Онежского озера.

Таблица 2.4 – Давление в центре циклона в определенное время.

№ точки	1	2	3	4	5	6	7	8
Время, дата	15:00 11.01 2007	18:00 11.01 2007	21:00 10.01 2007	00:00 11.01 2007	03:00 11.01 2007	06:00 11.01 2007	12:00 11.01 2007	18:00 11.01 2007
P	991,8	988,4	985,8	984,8	983,1	981,6	979	974,6

Тип наводнения по синоптической ситуации: А

г) Наводнения 16 и 18 января 2007 (рисунок 2.4 и таблица 2.5, 2.6, 2.7)



Рисунок 2.4 – Перемещение циклона. Подъем уровня №4.

В данной ситуации перемещение сразу трех циклонов привело к двум подъемам уровня. 16 и 18 января 2007 года.

Таблица 2.5 – Давление в центре циклона в определенное время.

1.

№ точки	1	2	3	4	5	
Время, дата	12:00 14.01 2007	18:00 14.01 2007	00:00 15.01 2007	06:00 15.01 2007	12:00 15.01 2007	23:20 15.01 2007
P	977.4	977.6	984.4	989.6	993.4	179 см

Таблица 2.6 – Давление в центре циклона в определенное время.

2.

№ точки	1	2	3	4	5	6	7	8
Время, дата	12:00 18.01 2007	15:00 18.01 2007	18:00 18.01 2007	00:00 19.01 2007	03:00 19.01 2007	06:00 19.01 2007	12:00 19.01 2007	12:00 19.01 2007
P	967,5	964.8	964.2	963.9	962.9	962.4	963.1	964.1

Таблица 2.7 – Давление в центре циклона в определенное время.

3.

№ точки	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Время, дата	18:00 17.01 2007	00:00 18.01 2007	03:00 18.01 2007	06:00 18.01 2007	09:00 18.01 2007	12:00 18.01 2007	15:00 18.01 2007	18:00 18.01 2007	00:00 18.01 2007	03:00 19.01 2007
P	971.6	969.5	971.7	972.4	970.4	967.5	965.5 171см	965.6	967.5	968.8

Тип наводнения по синоптической ситуации: 1–С 2–А 3–Д

д) Наводнение 3 февраля 2008 (рисунок 2.5 и таблица 2.8)

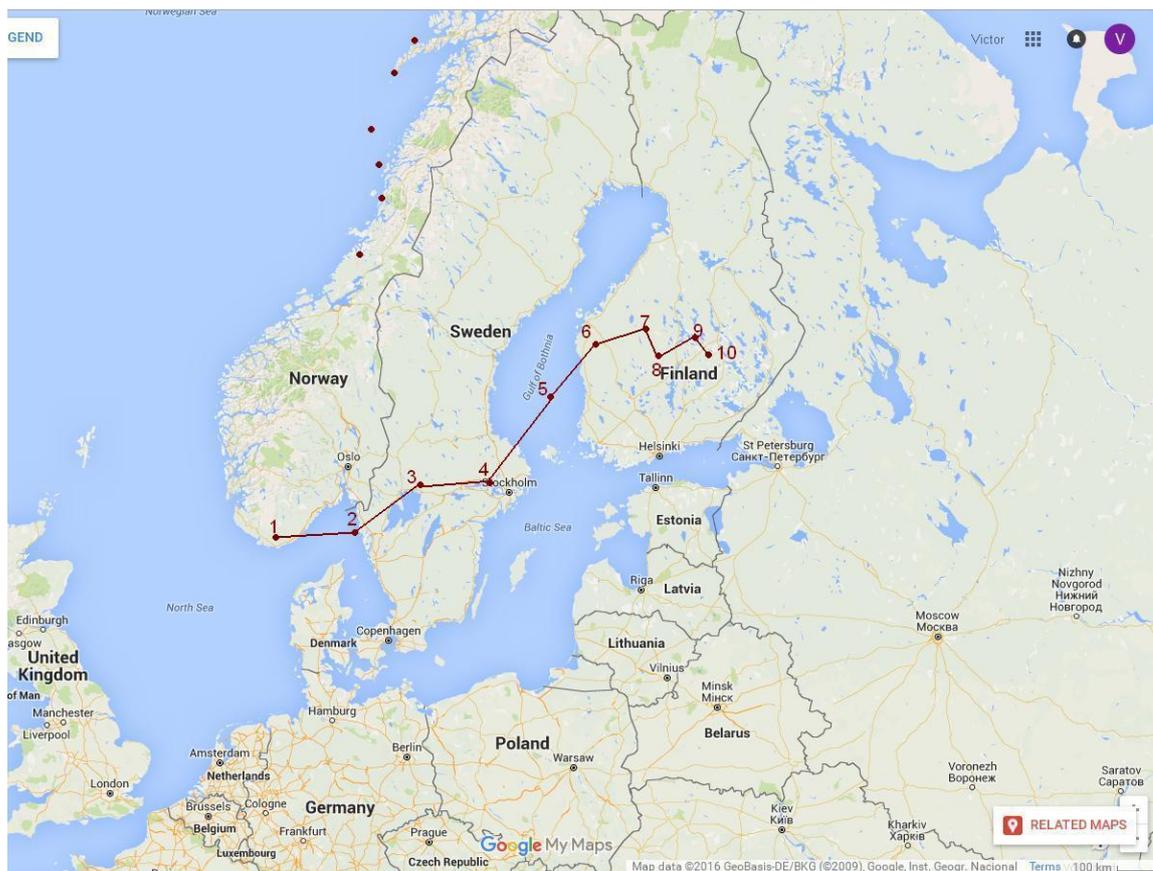


Рисунок 2.5 – Перемещение циклона. Подъем уровня №5.

В данной ситуации циклон перемещается с южных берегов Норвегии до финского озера Хаукивеси.

Таблица 2.8 – Давление в центре циклона в определенное время.

№ точки	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
Время	12:00	18:00	00:00	06:00	12:00	18:00	00:00	03:00	06:00	09:00	12:24
дата	01.02.2008	01.02.2008	02.02.2008	02.02.2008	02.02.2008	2.02.2008	03.02.2008	03.02.2008	03.02.2008	03.02.2008	03.02.2008
P	960	968,5	971,5	974,4	978	981,9	983,4	983,4	986,2	989,3	198 см

Тип наводнения по синоптической ситуации: В

е) Наводнение 16 ноября 2008 (рисунок 2.6 и таблица 2.9)

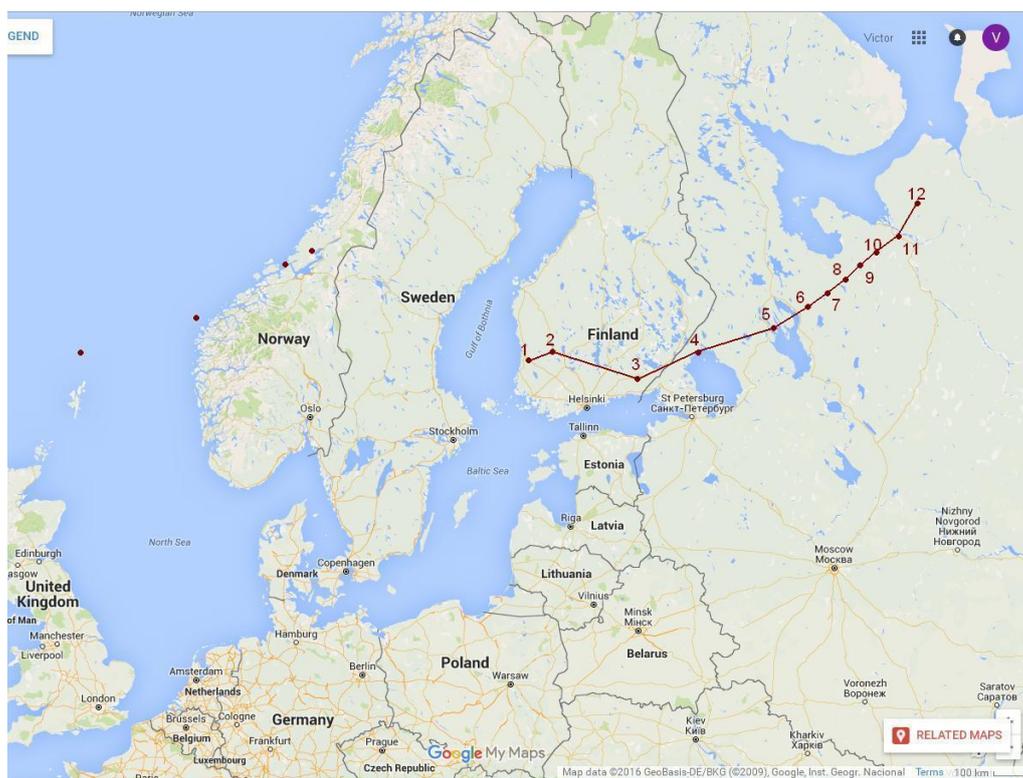


Рисунок 2.6 – Перемещение циклона. Подъем уровня №6.

В данной ситуации циклон перемещается от финского города Пори и поднимается за Архангельск.

Таблица 2.9 – Давление в центре циклона в определенное время.

№ точки	1	2	3	4	5	6	7
Время, дата	15:00 15.11 2008	18:00 15.11 2008	21:00 15.11 2008	00:00 16.11 2008	06:00 16.11 2008	09:00 16.11 2008	12:00 16.11 2008
P	987.3	986.9	983.9	984.3 186 см	982.1	981.2	983.1

8	9	10	11	12
15:00	18:00	21:00	00:00	06:00
16.11	16.11	16.11	17.11	17.11
2008	2008	2008	2008	2008
981.6	982.7	982.3	983.1	984.7

Тип наводнения по синоптической ситуации: С  
ж) Наводнение 28 ноября 2011 (рисунок 2.7 и таблица 2.10)

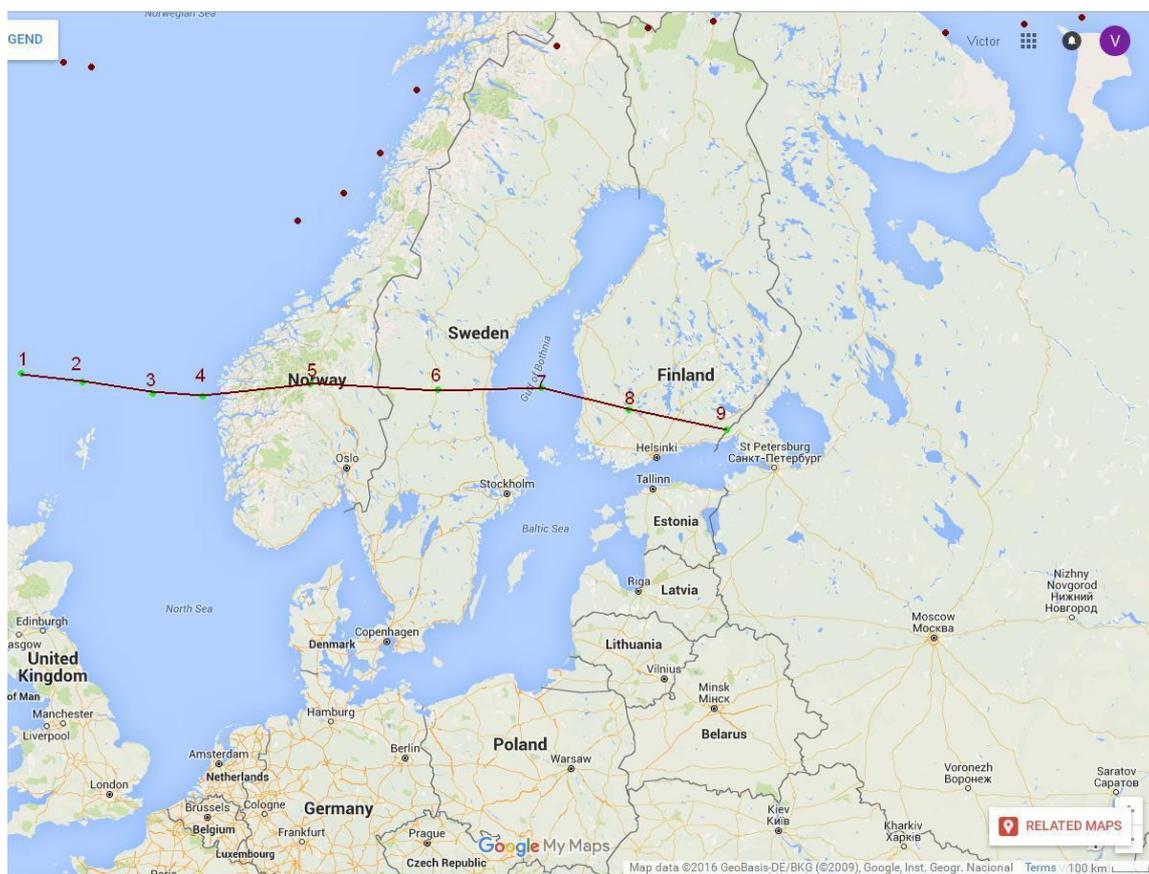


Рисунок 2.7 – Перемещение циклона. Подъем уровня №7.

В данной ситуации циклон перемещается от Фарерских островов и доходит почти до Выборга.

Таблица 2.10 – Давление в центре циклона в определенное время.

№ точки	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Время, дата	21:00 26.11 2011	00:00 27.11 2011	03:00 27.11 2011	06:00 27.11 2011	09:00 27.11 2011	12:00 27.11 2011	15:00 27.11 2011	18:00 27.11 2011	21:00 27.11 2011
P	974.6	974.3	972.8 195 см	968.8	972.1	970.4	967	763.9	969.5

Тип наводнения по синоптической ситуации: С

з) Наводнения 26 и 27 декабря 2011 (рисунок 2.8 и таблица 2.11)

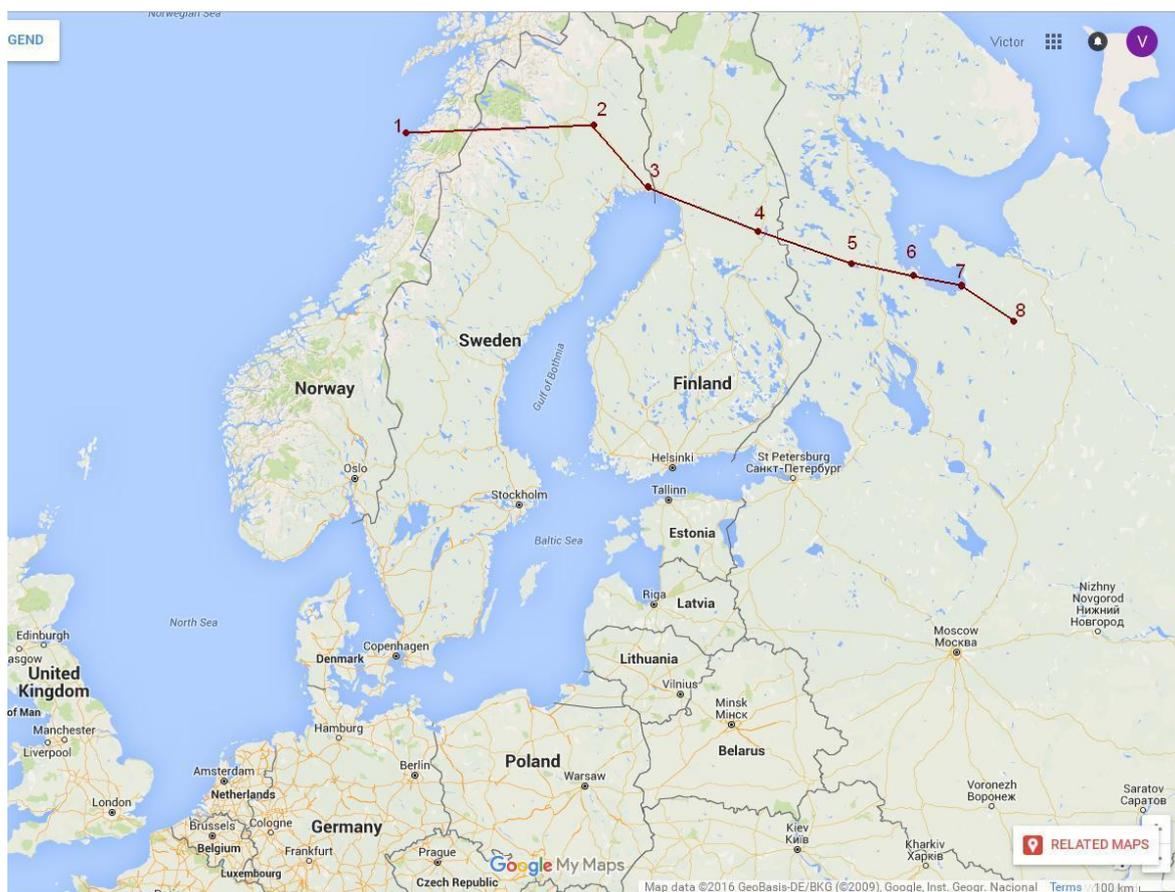


Рисунок 2.8 – Перемещение циклона. Подъем уровня №8.

Сразу два подъема уровня вызваны перемещением циклона от норвежского острова Вега до района реки Онега.

Таблица 2.8 – Давление в центре циклона в определенное время.

№ точки		1	2	3	4	5	6		7	8
Время, дата	14:00 26.12 2011	21:00 26.12 2011	00:00 27.12 2011	03:00 27.12 2011	06:00 27.12 2011	09:00 27.12 2011	12:00 27.12 2011	14:00 27.12 2011	15:00 27.12 2011	21:00 27.12 2011
P	261 см	974,8	976,4	975,2	974,4	972,9	971,1	223 см	972,7	970,1

Тип наводнения по синоптической ситуации: Е

и) Наводнение 29 октября 2013 (рисунок 2.9 и таблица 2.12)

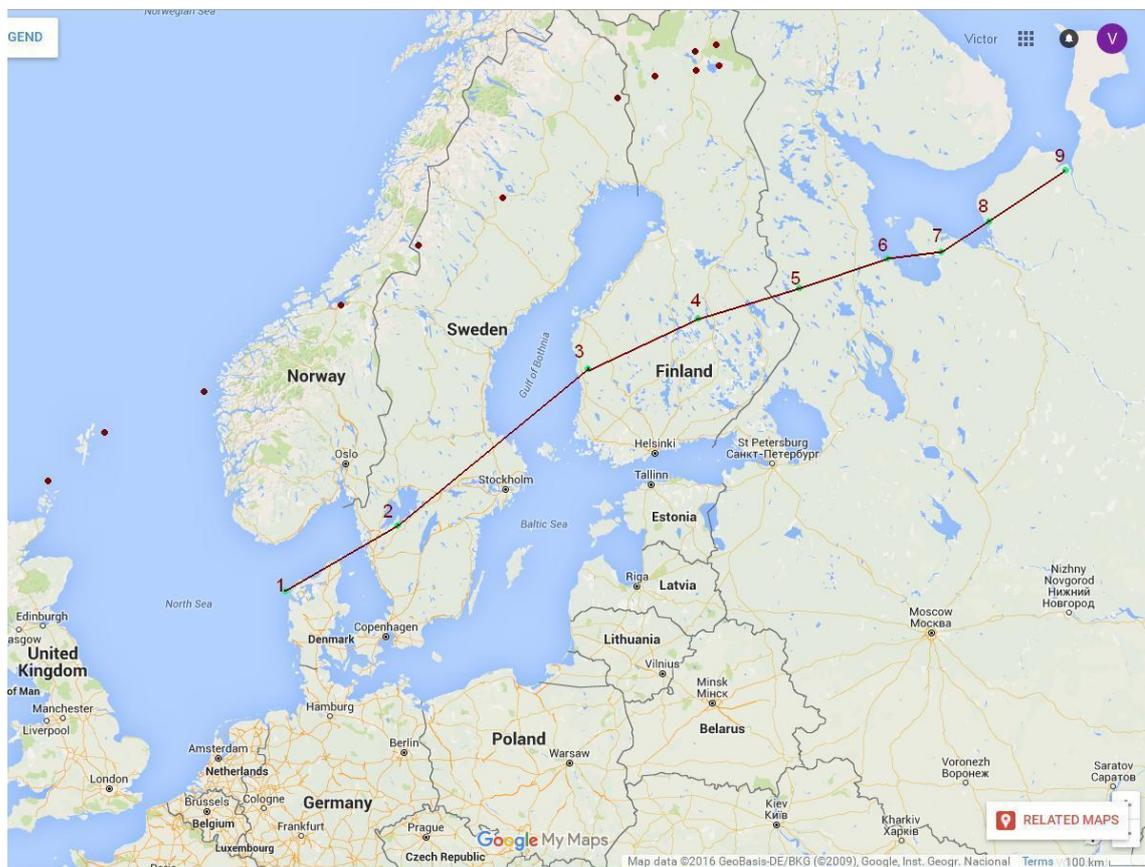


Рисунок 2.9 – Перемещение циклона. Подъем уровня №9.

В данной ситуации циклон перемещается от северо-западного побережья Дании (Национальный парк Тю) до города Мезень.

Таблица 2.12 – Давление в центре циклона в определенное время.

№ точки	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Время, дата	12:00 28.10 2013	18:00 28.10 2013	00:00 29.10 2013	06:00 29.10 2013	09:00 29.10 2013	12:00 29.10 2013	15:00 29.10 2013	18:00 29.10 2013	21:00 29.10 2013
P	977.5	969.8	971.3	973.3	976.3	974.9 196 см	976.5	976.7	977.6

Тип наводнения по синоптической ситуации: В  
 к) Наводнение 13 декабря 2013 (рисунок 2.10 и таблица 2.13)

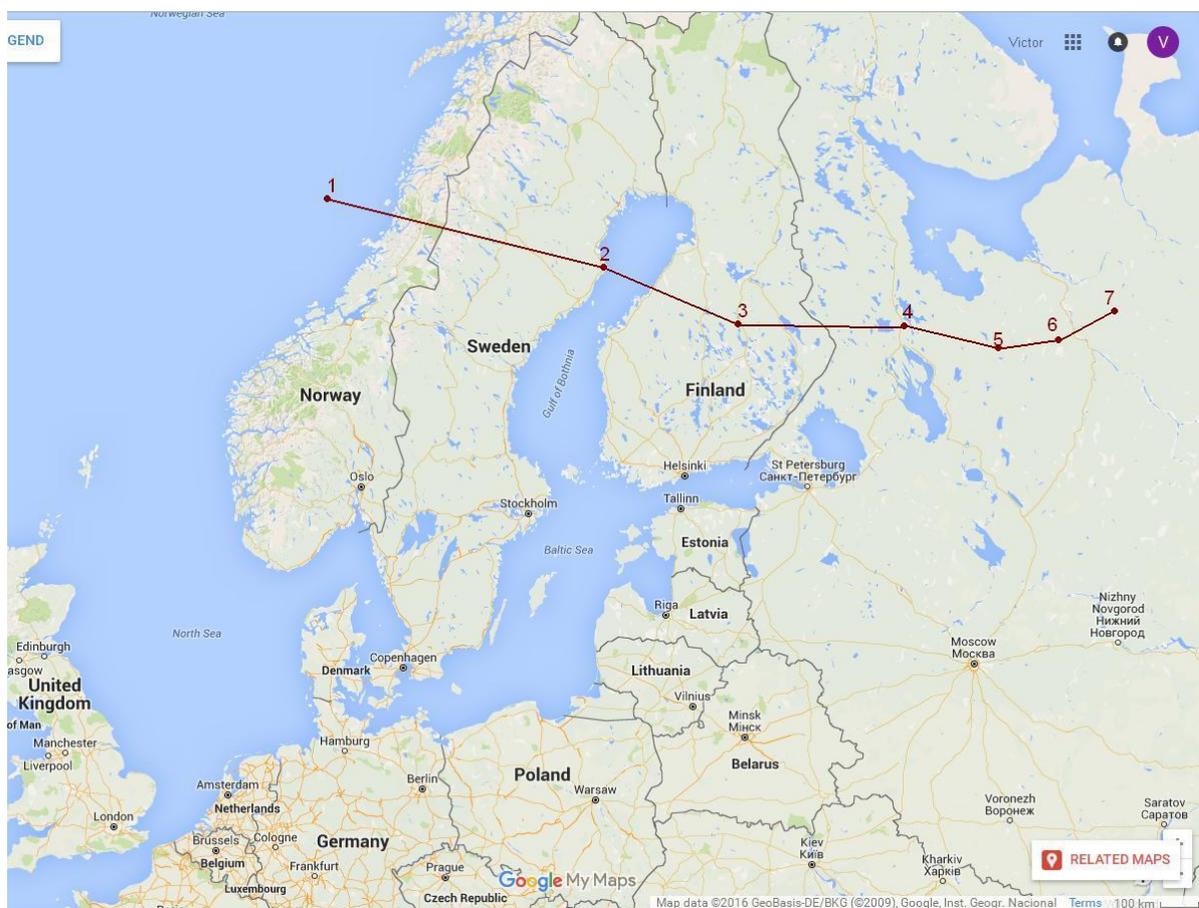


Рисунок 2.10 – Перемещение циклона. Подъем уровня №10.

В данной ситуации циклон перемещается от Норвежского моря до реки Северная Двина.

Таблица 2.13 – Давление в центре циклона в определенное время.

№ точки	1	2	3	4	5.0	5	6	7
Время, дата	12:00 12.12 2013	18:00 12.12 2013	00:00 13.12 2013	03:00 13.12 2013	05:30 13.12 2013	09:00 13.12 2013	12:00 13.12 2013	15:00 13.12 2013
Р	984.7	981.2	978.6	975.3	975.5 191 см	973.1	973.5	972.2

Тип наводнения по синоптической ситуации: Д

л) Наводнение 2 января 2015 (рисунок 2.11 и таблица 2.14)

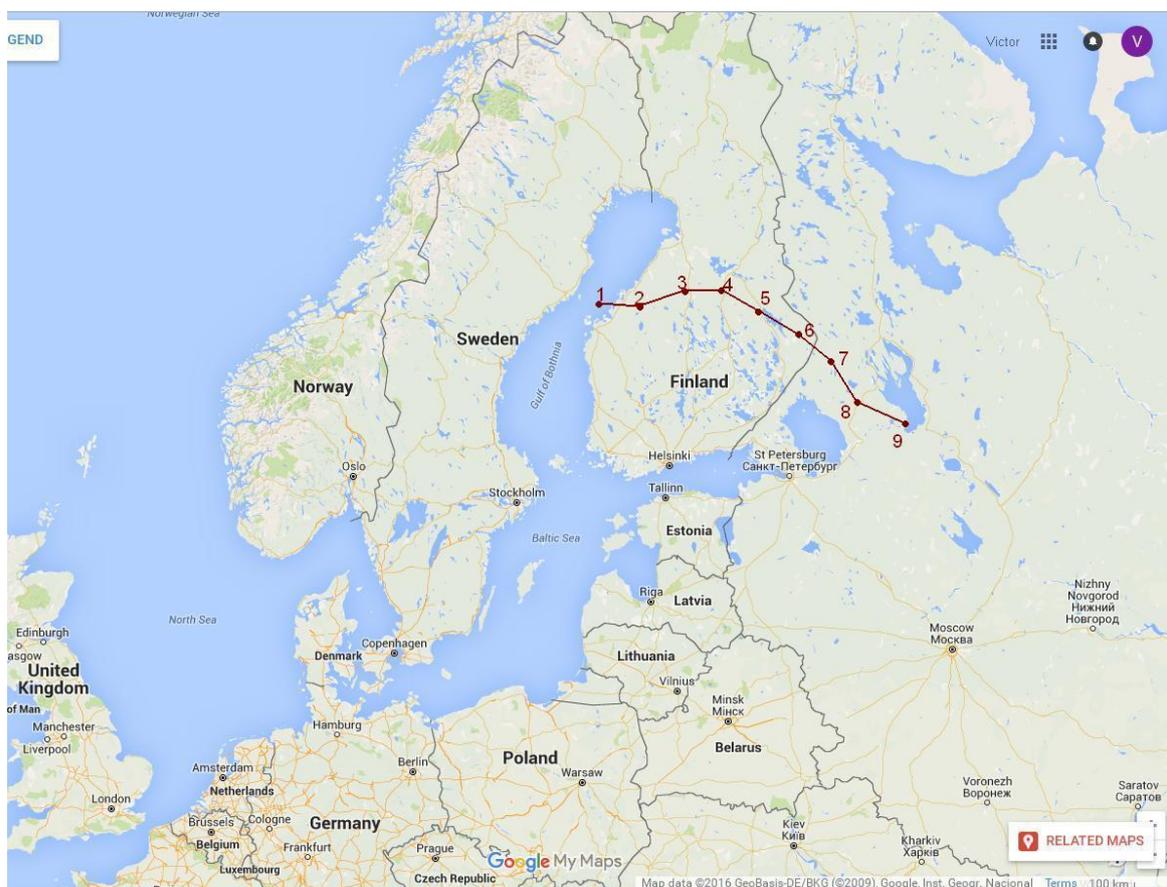


Рисунок 2.11 – Перемещение циклона. Подъем уровня №11.

В данной ситуации циклон перемещается от финского города Вааса до южных берегов Онежского озера.

Таблица 2.14 – Давление в центре циклона в определенное время.

№ точки	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Время, дата	09:00 02.01 2015	12:00 02.01 2015	15:00 02.01 2015	18:00 02.01 2015	00:00 03.01 2015	03:00 03.01 2015	06:00 03.01 2015	12:00 03.01 2015	18:00 03.01 2015
P	966.8	965	962.5	959.8	959.9	960.2	960.8	964.2	968.5

Тип наводнения по синоптической ситуации: Д

м) Наводнения 5, 6, 7 декабря 2015 (рисунок 2.12 и таблица 2.15)

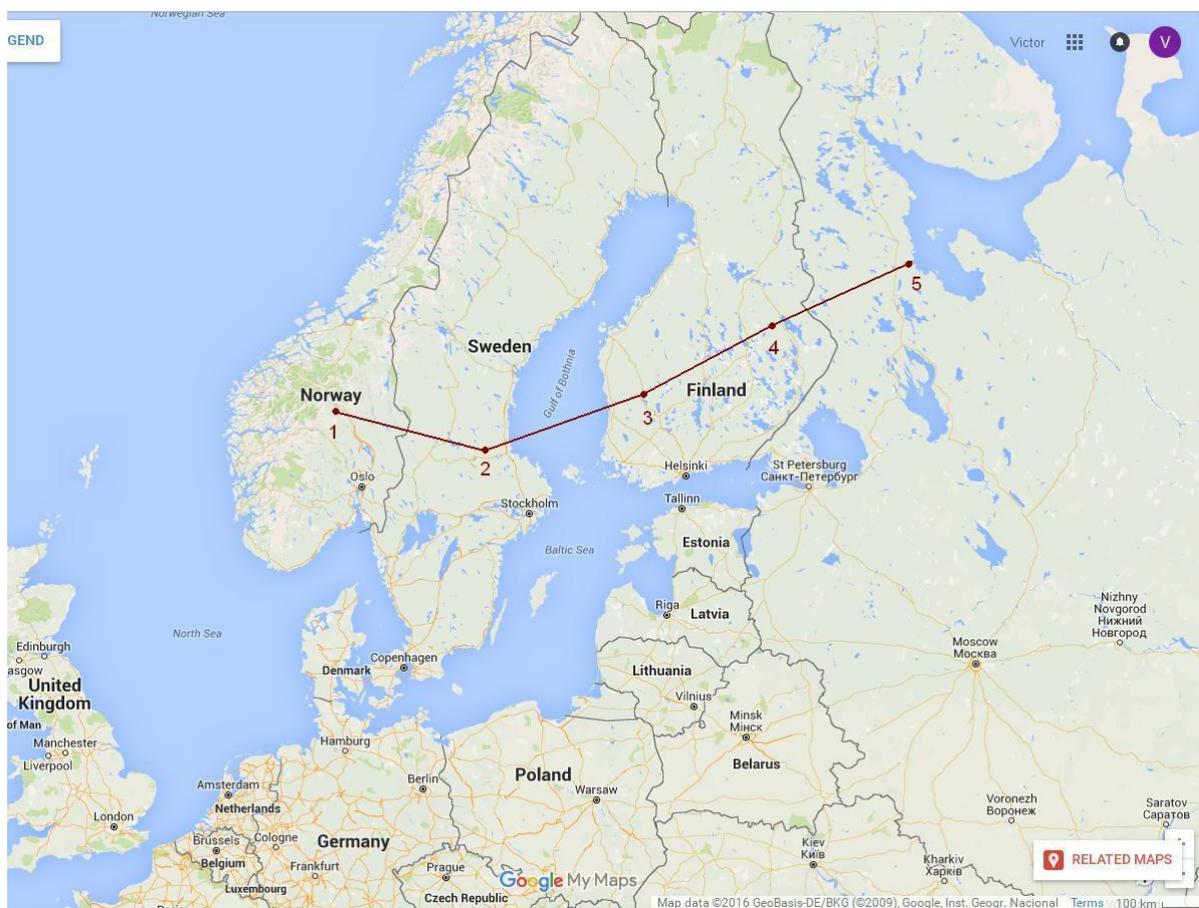


Рисунок 2.12 – Перемещение циклона. Подъем уровня №12.

С центральной части Норвегии циклон перемещается Онежской губе.

Таблица 2.15 – Давление в центре циклона в определенное время.

№ точки	1	2	3	4	5
Время, дата	06:00 04.12 2015	12:00 04.12 2015	18:00 04.12 2015	00:00 05.12 2015	03:00 05.12 2015
P	992,6	987,1	984,9	984	983,6

Тип наводнения по синоптической ситуации: В

В данном случае циклон смещался над Скандинавией (синоптическая ситуация В), а антициклон проходил южнее Балтийского моря, что совместно вызвало повышение уровня до опасного значения.

н) Наводнение 13 января 2015 (рисунок 2.13 и таблица 2.16)

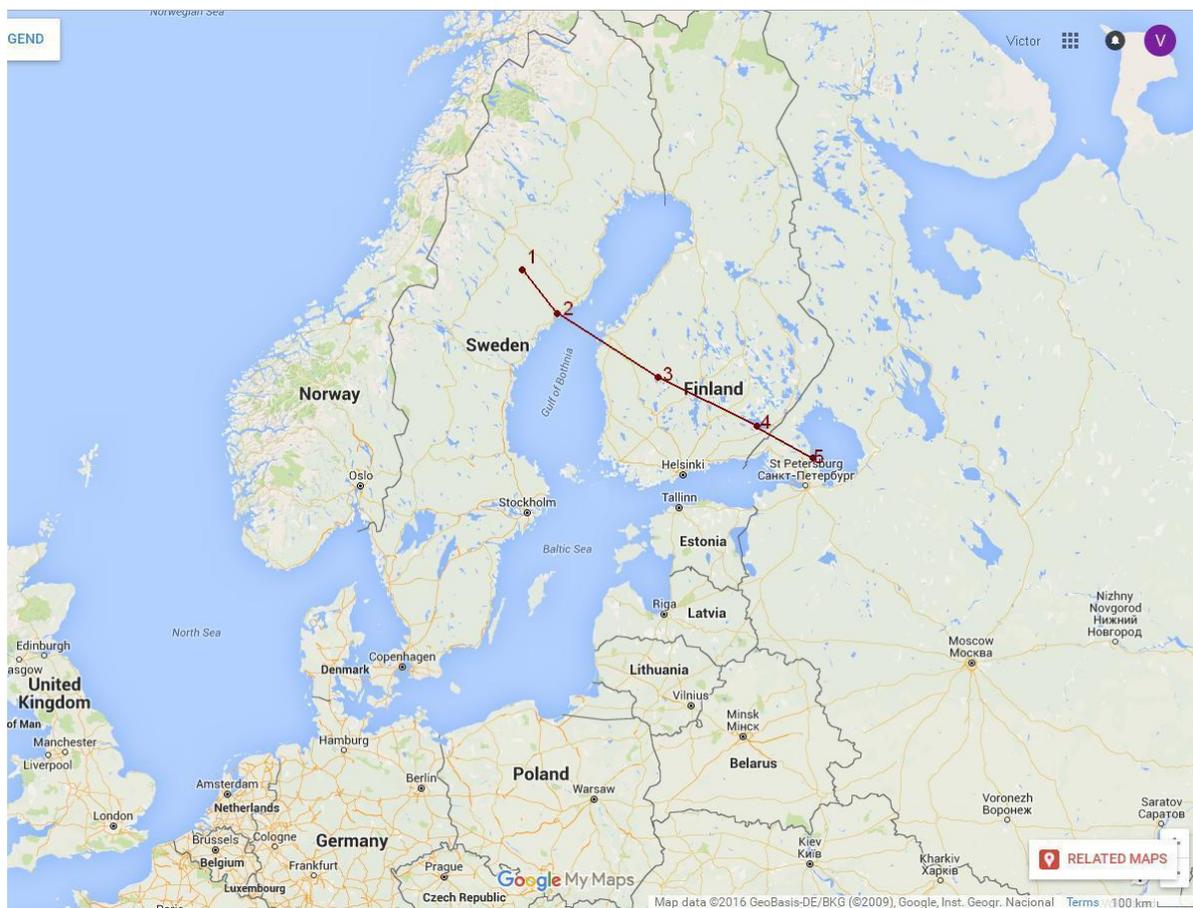


Рисунок 2.13 – Перемещение циклона. Подъем уровня №13.

В данной ситуации циклон перемещается от шведского озера Сторуман до Ладожского озера.

Таблица 2.16 – Давление в центре циклона в определенное время.

№ точки	1	2	3	4	5
Время, дата	18:00 12.01 2015	00:00 13.01 2015	03:00 13.01 2015	06:00 13.01 2015	09:00 13.01 2015
P	977.7	976.9	977	978	983.4

Тип наводнения по синоптической ситуации: Д

о) Наводнение 10 декабря 2015 (рисунок 2.14 и таблица 2.17)

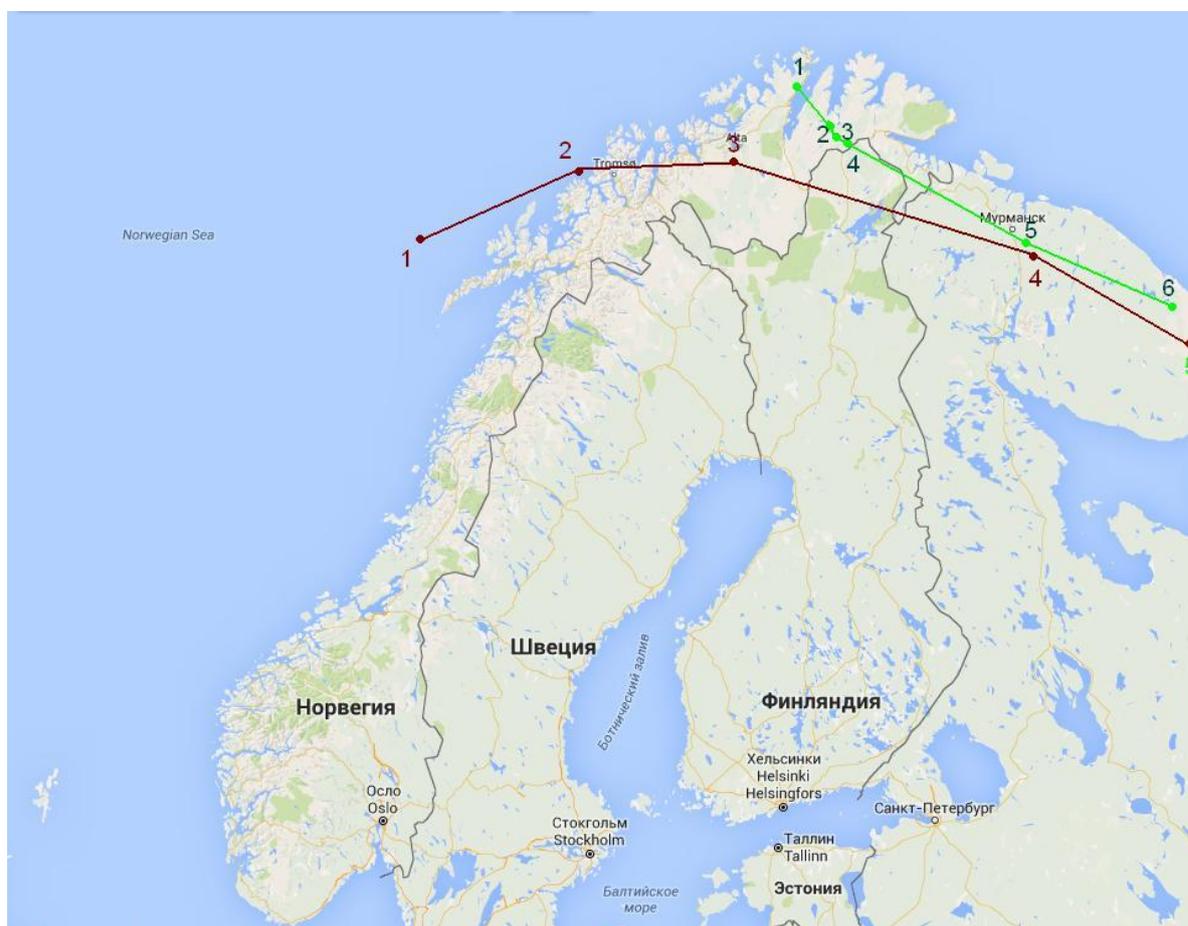


Рисунок 2.14 – Перемещение циклона. Подъем уровня №14.

В данной ситуации два циклона перемещаются по северной части Норвегии в направлении города Мурманск и уходит на Кольский полуостров.

Таблица 2.17 – Давление в центре циклона в определенное время.

№ точки	1	2	3	4	5
Время, дата	06.00 09.12 2015	12.00 09.12 2015	18.00 09.12 2015	00.00 10.12 2015	03.00 10.12 2015
P	993.8	988	988.6	987.2	984.7

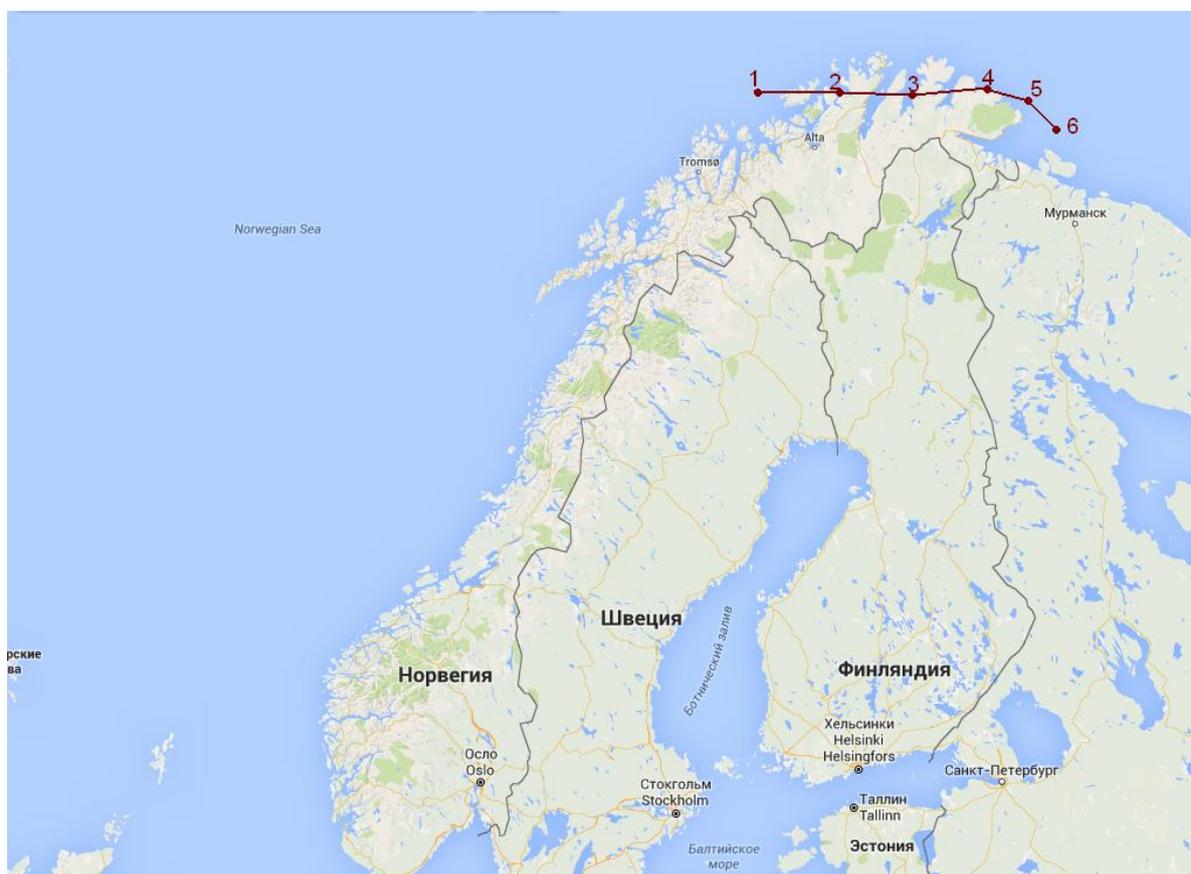
№ точки	1	2	3	4	5	6
Время, дата	15.00 10.12 2015	21.00 09.12 2015	00.00 09.12 2015	06.00 09.12 2015	12.00 09.12 2015	18.00 09.12 2015
Р	997.8	999.5	999.6	999	1015	999.8

### Тип наводнения по синоптической ситуации Е

Наводнение в данном случае было вызвано тем, что два циклона прошли по одной траектории и тем самым создали длительный подъем уровня.

*п) Наводнение 26 декабря 2015 (рисунок 2.15 и таблица 2.18)*

Рисунок 2.15 – Перемещение циклона. Подъем уровня №15.



В данной ситуации циклон перемещается по северной части Норвегии.

Таблица 2.18 – Давление в центре циклона в определенное время.

№ точки	1	2	3	4	5	6
Время, дата	12:00 25.12 2015	18:00 25.12 2015	00:00 26.12 2015	13:00 25.12 2015	06:00 25.12 2015	09:00 25.12 2015
P	974.6	971.6	967.8	967.2	965.2	976.8

Тип наводнения по синоптической ситуации Е (фактически траектория циклона проходила севернее, чем траектории типа Е).

В данном случае найти центр циклона очень трудно. Центр мало смещался. Фронт прошел над Санкт - Петербургом четко с запада на восток.

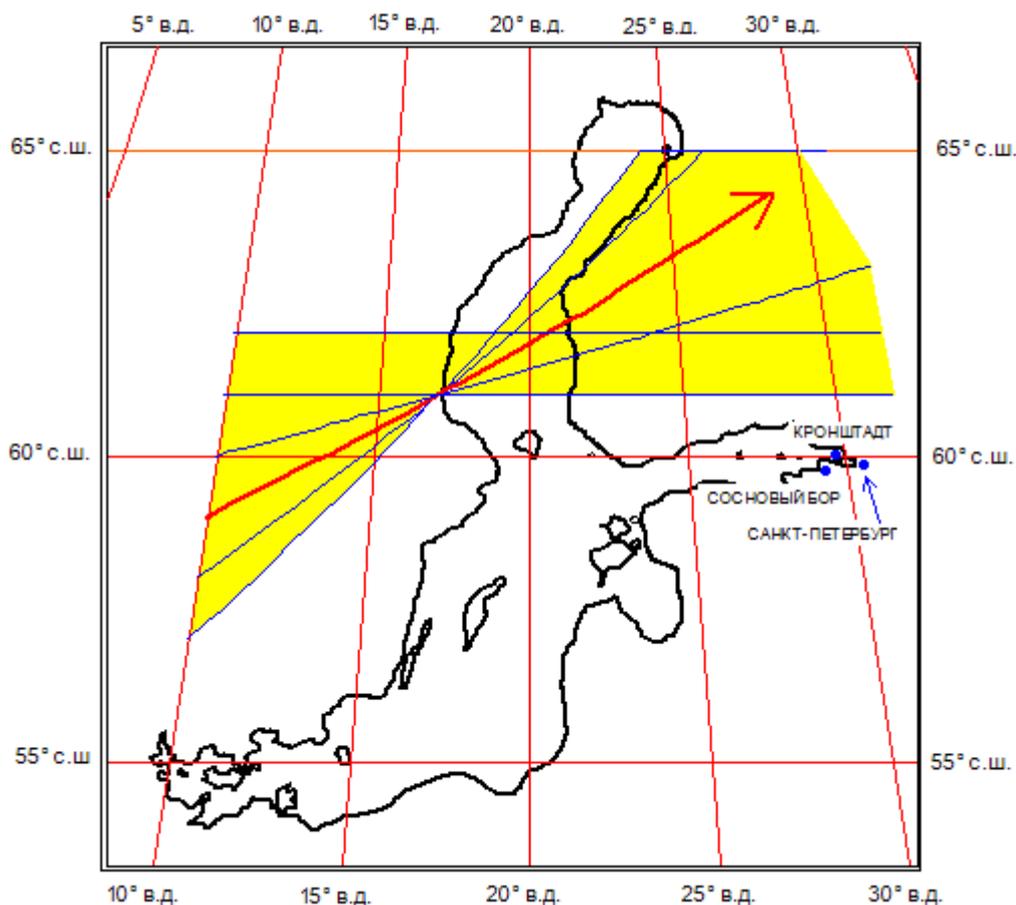
Желтым цветом выделены моменты времени, когда давление в центре было минимальным.

Зеленым цветом выделено время, когда наблюдался максимальный подъем уровня в Санкт- Петербурге.

### 3. Параметры и траектории циклонов, приводившие к подъему уровня в Балтийском море

Опасные подъемы в восточной части Финского залива возникают, если циклон смещается в достаточно широком секторе с северо-запада, запада или юго-запада и проходит севернее оси залива. Подъемы уровня достигают максимума при движении циклона по примерной траектории от  $59^{\circ}$  с.ш.  $10^{\circ}$  в.д. со скоростью 4 м/с на север и 14 м/с на восток. Она обозначена на графике (рисунок 3.1) красной стрелкой. Остальные траектории циклона в желтом секторе также очень опасны и отличаются лишь в величине пика уровня (разброс от 30 до 50 см) и во времени его достижения.

Рисунок 3.1 – Опасные траектории перемещения циклона для Санкт-Петербурга.



Для анализа параметров циклонов, которые приводили к опасным подъемам уровня в восточной части Финского залива составлена сборная таблица 3.1 по материалам, представленным в предыдущем разделе. Выбирались время и координаты положения центров циклонов в моменты максимального подъема уровня в СПб или на КЗС и в моменты минимального давления в центре циклона.

За десятилетие с 2006 по 2015 наблюдалось 15 опасных подъемов, в некоторых случаях наблюдались два пика при прохождении одного циклона и его фронтов. Из них 9 - после вступления в строй КЗС. Соответственно при работе КЗС наводнения были предотвращены и подъемы уровня наблюдались на внешней стороне КЗС, в Финском заливе. К сожалению, не удалось получить или найти данные о фактических максимальных подъемах уровня за 2015 год.

Опасные подъемы наблюдались при прохождении активных циклонов по траекториям, представленным в разделе 2.

Максимальные подъемы, главным образом, наблюдались при значениях минимального давления в центре 965.5 – 991.8 гПа.

Из 15 наводненческих ситуаций по классификации Турыгина и Псаломщиковой [5] в двух случаях наблюдались траектории с синоптической ситуацией А, в четырех случаях – В, в трех случаях – С, в трех случаях – Д, в пяти случаях – Е.

В одной ситуации, не описанной выше, произошел подъем уровня, вызванный антициклоном, проходящим строго южнее Балтийского моря и Финского залива соответственно. Дата и время этого подъема – 16.10.2010 3:22 (UTC). Подъем уровня достиг отметки 180 см.

В основном максимальный подъем в восточной части Финского залива происходит тогда, когда циклон приближается с запада к меридиану Санкт - Петербурга, или находится на расстоянии от 80 до 100 км к западу.

Однако из 15 проанализированных ситуаций таких случаев было пять.







В 10 случаях максимальный подъем наблюдался тогда, когда центр циклона уже миновал меридиан СПб и продвинулся на восток.

Минимальное значение в центре циклона по теории также наблюдается при приближении циклона с запада. В рассмотренных случаях такая ситуация наблюдалась девять раз.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В заключение сформулируем выводы

- Создан архив синоптических карт, за сроки, соответствующие времени подъемов уровня;
- Произведен анализ синоптических материалов в периоды значительных подъемов уровня в восточной части Финского залива;
- Построены сводные карты траекторий циклонов во время подъемов и таблицы изменения давления в центре;
- Траектории наводненческих циклонов приведены в соответствие с типизацией, представленной в работе Псаломщиковой и Турыгина;
- В результате анализа синоптических ситуаций и траекторий циклонов получены значения параметров циклонов, приводящих к максимальным подъемам уровня. Максимальные подъемы наблюдались при значениях минимального давления в центре 965.5 – 991.8 гПа. За последние десять лет максимальная глубина циклона составила 965.5 гПа;
- В момент максимального подъема уровня центр циклона обычно приближается с запада к меридиану Санкт - Петербурга, или находится на расстоянии от 80 до 100 км к западу. В большинстве проанализированных случаях максимальный подъем наблюдался тогда, когда центр циклона уже миновал меридиан СПб и продвинулся на восток. Но вероятно ряд наблюдений за опасными циклонами недостаточен для окончательного вывода.

## СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1 Мостаманди, М.С.В. Моделирование полей ветра и давления для гидродинамического прогноза штормовых нагонов [Текст]: Дис. ... канд.геогр.наук: 25.00.30; защищена 2013/ Мостаманди Мохаммад Сулейман Вахидулла.–СПб., 2013.–113 с.

2. Ефимова Ю.В. Моделирование полей ветра и давления для гидродинамического прогноза штормовых нагонов [Текст]: Дис. ... канд.геогр.наук: 25.00.30; защищена 2003/ Ефимова Юлия Викторовна.– СПб., 2003.–136 с.

3. Псаломщикова Л.М., Турыгин К.П. Метеоспектр №10 – статья "Характеристики значительных наводнений в устье Невы при разных синоптических ситуациях", 2010.

4. 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.

5 Аверкиев, А.С. Определение траекторий и скоростей циклона, приводящих к максимальным подъемам воды в Финском заливе [Текст] / А.С. Аверкиев, К.А. Клеванный // Метеорология и гидрология.–2007.– № 8.–С.55 – 63.