



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 Особенности штормовых нагонов в Финском заливе

Исполнитель Сергеева Светлана Александровна
(фамилия, имя, отчество)

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

Малинин Валерий Николаевич
(фамилия, имя, отчество)

«К защите допускаю»

Заведующий кафедрой


(подпись)

кандидат географических наук
(ученая степень, ученое звание)

Хаймина Ольга Владимировна
(фамилия, имя, отчество)

«19» 06 2026г.

Санкт-Петербург

2026

Оглавление

Введение	2
Глава 1. Физико-географическое описание Балтийского моря и Финского залива.....	4
1.1 История образования Балтийского моря и его географическое положение	4
1.2 Физико-географическое положение Финского залива.....	9
Глава 2. Причины и механизмы, приводящие к значительным подъемам уровня в Балтийском море и наводнениям в Финском заливе	14
2.1 Факторы подъема уровня воды восточной части Финского залива	14
2.2 Статистический анализ штормовых нагонов в Финском заливе	17
Глава 3. Исходные данные и статистические методы определения выбросов.....	23
3.1. Исходные данные	23
3.2 Оценивание выбросов статистическими методами.....	24
3.3 Гидрометеорологическая обстановка во время трех мощных наводнений	29
3.4 Результаты выделения штормовых нагонов на 4 станциях Финского залива.....	37
Заключение.....	51
Список литературы.....	54

Введение

Среди природных катастроф, обрушившихся на природные территории, штормовые нагоны занимают особое место по своей разрушительной силе. Для акватории Финского залива это явление представляет собой серьезную угрозу, так как во время нагонов затапливаются и разрушаются жилые и производственные объекты, гидротехнические сооружения, элементы транспортной инфраструктуры.

Основная цель настоящего исследования заключается в комплексном анализе природы штормовых нагонов в восточной части Балтики. В рамках работы планируется дать оценку их статистическим характеристикам.

Для достижения поставленной цели необходимо решить ряд задач: изучить теоретическую базу о механизмах возникновения штормовых нагонов, дать физико-географическую характеристику района Финского залива Балтийского моря, выделив зоны наибольшей активности явления, детально рассмотреть физические предпосылки формирования нагонной волны и факторы, которые влияют на высоту нагона.

Рассмотреть случаи экстремальных штормовых нагонов, область их формирования.

Изучить методы анализа и прогноза, оценить ущерб и риск, связанные со штормовыми нагонами.

Познакомится с описанием статистических характеристик метеорологической информации в районе Финского залива за последние десятилетия XX и первые десятилетия XXI века.

Проанализировать методики идентификации выбросов («три сигма», правило Тьюки (квартильный анализ), критерий Стьюдента).

Собрать и подготовить исходные данных наблюдений.

Произвести расчет количества выбросов используя различные статистические методы.

Рассчитать продолжительность штормовых нагонов.

Рассмотреть совпадение сроков нагонов, степень расхождения с реперным графиком наводнений Санкт-Петербурга.

Подъемы уровня воды в Санкт-Петербурге и Финском заливе относятся к категории опасных гидрометеорологических процессов. В связи с этим их анализ и разработка точных прогнозов является актуальной и практически важной задачей для специалистов в области океанологии и метеорологии.

При всей серьезности потенциальных последствий история наблюдений за нагонными явлениями в этом регионе характеризуется недостаточной изученностью, что порождает ряд дискуссионных и ошибочных гипотез о природе данного феномена, что требует проведения дополнительных, углубленных и комплексных исследований.

Глава 1. Физико-географическое описание Балтийского моря и Финского залива

1.1 История образования Балтийского моря и его географическое положение

С геологической точки зрения Балтийское море является самым молодым водоемом планеты. Его современный облик формировался около 4 тыс. лет назад. В своем развитии бассейн прошел четыре этапа развития, и два раза море было озером. Рассмотрим эти периоды, которые коренным образом меняли его гидрологический режим:

- Первая стадия - Озерная. Балтийское ледниковое озеро, 16 - 11,7 тыс. лет назад.

Зарождение началось из континентальных льдов. Сначала высвободилась территория перед краем отступающих ледников, там накапливалась талая вода, из которой начали образовываться ледниковые озера. Эти озера росли, увеличивались по площади, соединялись между собой и образовалось первичное Балтийское море - Балтийское ледниковое озеро.

- Вторая стадия - Морская. Иольдиевое море, 11,7 - 10,7 тыс. лет назад. Биллингенская катастрофа, которая произошла 11600 лет назад, привела к резким изменениям гидрологического режима Балтики. Таяние ледниковой лопасти стало причиной размыв перемычки к северу от горы Биллинген (в центральной Швеции), которая разделяла Балтийское ледниковое озеро от моря. В результате озерная вода получила короткий путь в Атлантический океан.

- Третья стадия - Озерное. Анциловое озеро, 10,7 - 9,8 тыс. лет назад. Скорость подъема суши, которая освобождалась от давления континентального льда, была выше подъема уровня океана, что привело к сокращению их связи. Иольдиевое море стало почти изолированным пресноводным водоемом - Анциловым озером.

- Четвертая стадия – Морская. Литориновое и пост-Литориновое море, 8,5 – 0 тыс. лет назад.

Уровень воды в океане поднялся настолько, что начался приток соленой воды. Наступил новый этап в развитии Балтийского моря - Литориновое и пост-Литориновое море (Рисунок 1.1.1).

Именно около 4 тыс. лет назад море приобрело черты, близкие к современным: установилась характерная береговая линия и сформировался современный солевой режим.



Рисунок 1.1.1 Литориновое море 7000 лет назад (5000 до н.э.)

Балтийское море (позднелат. Mare Balticum). В исторических хрониках славянских народов это море именовалось Варяжским или Свейским. Сегодня Балтийское море представляет собой внутриматериковое водоем Атлантического океана расположенного между Скандинавским полуостровом и глубоко впадает в северо-западную часть Европы.

Балтийское море омывает берега следующих стран: Российская Федерация, Польша, Германия, Дания, Швеция, Финляндия и страны Балтии. В его восточной части Россия обладает небольшими акваториями, такими как, Калининградский залив, частью Куршского залива (на территории Калининградской области) и восточная часть Финского залива (на территории Ленинградской области).

Балтийское море простирается в направлении с юго-запада на северо-восток, охватывая территорию от 53° до 66° параллели северной широты и от 10° до 30° восточной долготы. Максимальная ширина наблюдается на 60° с. ш. Его наибольшая длина равна 1360 км (Рисунок 1.2.1). Длина морского пути между Санкт-Петербургом и Стокгольмом составляет почти на 650 км, что немного меньше, чем длина дороги из Санкт-Петербурга до Москвы - 710 км.

По площади 419 тыс. км² и по объёму 21,5 тыс. км³ море невелико. Это один из самых мелководных бассейнов Мирового океана после Азовского и Белого морей, со средней глубиной около 50 м и максимальной 470 м [15].

Соединение с Северным морем осуществляется через систему Датских проливов (Эресунн, Большой и малый Бельт). Из-за мелководья проливов (глубины местами не превышают 7 - 18 метров) водообмен с океаном крайне ограничен. Поперечное сечение этих «порогов» составляет всего лишь 0,225 и 0,08 км², в следствии чего происходит сдерживание притока соленой воды [7].

Единственным механизмом обновления глубинных вод являются так называемые «большие затоки» – это мощные импульсы поступления соленой воды из Северного моря, насыщенной кислородом. Однако с начала 80-х годов интенсивность этих процессов резко упала (с 5 - 7 случаев за десятилетие до единичных), что привело к максимальному кислородному голоданию центральных районов Балтики. Последний значимый заток был зафиксирован в 2014 году, после одиннадцатилетнего перерыва, и вошел в историю как один из самых мощных за полтора столетия. Общий годовой приток соленых вод оценивается в 475 км^3 в год, тогда как отток пресных вод достигает 940 км^3 , это подчеркивает на слабый обмен с океаном [7].

В то же время Балтийское море активно опресняется стоком более 250 рек. Общий речной сток составляет около 472 км^3 в год. Крупнейшие артерии: Нева ($75,7 \text{ км}^3$ в год), Висла (32,6), Западная Двина (21,9) и Неман (16,8). Распределение стока неравномерно: в Ботнический залив поступает 181 км^3 в год, в Финский - 110 км^3 , в Рижский - 37 км^3 , в центральную часть Балтийского моря - 112 км^3 . Баланс атмосферных осадков (172 км^3 в год) и испарения приблизительно равны.

Соленость Балтийского моря значительно ниже океанической (35 ‰) и составляет в среднем 6 - 8 ‰ на поверхности. Это делает его самым распресненным морем в мире. Особенно низкие показатели характерны для заливов с мощным речным стоком, таких как Финский и Рижский.

Рельеф дна Балтийского моря неровный. Море целиком лежит в пределах шельфа. Дно его котловины изрезано подводными впадинами, разделенными возвышенностями и цоколями островов.



Рисунок 1.1.2 Балтийское море

1.2 Физико-географическое положение Финского залива

В северо-восточной окраине Балтийского моря находится Финский залив, который омывает берега России, Эстонии и Финляндии. Его западной границей условно принята линия, соединяющая полуостров Ханко с мысом Пысаспеа (Рисунок 1.3.1). Это самая мелководная часть Балтики, средняя глубина здесь не превышает 38 м, максимальная составляет 121 м. Глубина увеличивается в западном направлении от Невской губы. Водоем имеет объем 1103 км^3 и площадь $29,5 \text{ тыс. км}^2$. Длинна от полуострова Ханко до Санкт-Петербурга— около 420 км [23]. Ширина варьируется от 22 км в горле залива до 130 км на меридиане острова Мощный. Интересно, что водосборный бассейн залива (420 тыс. км^2) составляет четверть общей площади водосбора всей Балтики [31].



Рисунок 1.3.1 Финский залив

Рельеф дна залива отличается сложностью и обилием островов, особенно вдоль северного и северо-западного побережий, количество которых возрастает к востоку. Эти формы рельефа обязаны своим

происхождением процессами погружения и разрушения древних пород Балтийского щита. Вдоль южного берега (Восточно-Европейская платформа) доминирует блоковый рельеф, связанный с разрушением палеозойских пород [27].

Климатические условия Финского залива - умеренные, с избыточным увлажнением, переходные от морских к континентальным [27]. Из-за малой площади и объема водные массы не играют решающей роли на климатообразовании [29]. Сезонная динамика температуры воздуха типична для умеренных широт: минимум приходится на февраль, максимум – на июль. Средние месячные температуры практически однородны по акватории: в июле 17 - 18 °С, в августе 16,5 - 17,5 °С, в сентябре 11 - 12 °С, марте 1 - 2 °С, в апреле 2 - 3 °С [29]. Смена сезонов маркируется переходом температуры воздуха через 0 °С (зима), а через 10 °С (лето). Из-за частой смены воздушных масс возможны существенные аномалии.

Циркуляция атмосферы определяется влиянием переноса воздушных масс с Атлантического океана, с преобладанием циклонической деятельности западных направлений в течении всего года. Лишь в мае и июле доля антициклонов превышает 50 %. [27]. Барический режим отличается высокой изменчивостью, особенно в холодное полугодие. Согласно работе [29] годовой диапазон изменения атмосферного давления превышает 100 гПа (от 951 гПа до 1065 гПа), при этом средний годовой ход атмосферного давления невелик (около 4 гПа): максимум в мае, а минимум в июле.

Ветровой режим залива формируется преобладанием западных, юго-западных и южных потоков (повторяемость более 50 %), которые же являются и наиболее сильными [27]. Штормовые ветры (12 м/с и более) наблюдаются в зонах атмосферных фронтов и в тыловой части циклонов, достигая скоростей 25 - 30 м/с. Число дней с сильным ветром (более 9 м/с) в составляет 12 - 18 дней в год [29].

Осадков выпадает более 600 мм в год при испарении около 250 мм, это вызывает избыточное увлажнение. Около 70 % осадков приходится на

теплый период года, максимум в августе-сентябре, минимум – в январе марте [29]. Абсолютная влажность воздуха следует годовому ритму: максимум летом, а минимум зимой, причем в западной части выше чем восточной [27].

Ледовый режим Финского залива формируется под влиянием его географического положения, климата, малых глубин, ограниченностью водообмена и низкой соленостью, обусловленной речным стоком. Ежегодно устанавливается устойчивый ледяной покров, но его масштабы изменяются в зависимости от суровости или мягкости зимы. В суровые зимы лед покрывает всю акваторию, а в мягкие зимы - только в восточную часть и побережья [3]. Процесс замерзания начинается в Невской губе и в Выборгском заливе в конце ноября – начале декабря и распространяется на запад. Однако западные и юго-западные ветры могут нарушить динамику, смещая льды к востоку. Освобождение ото льда происходит с запада на восток: в апреле – в западной части, в мае – в восточной [3]. В суровые зимы толщина льда в восточной части достигает 70 –80 см, на западе - до 50 см. Около 30 % площади Финского залива покрыто торосами с надводной высотой до 3 м [3; 11].

Температура поверхности воды повторяет ход температуры воздуха. С января по март вода подо льдом близка к точке замерзания. Нагрев начинается в апреле и продолжается до июля - августа, когда температура достигает 18 - 20° С (в открытой части залива) и до 22 °С у берегов. В жаркое лето у поверхности возможна 24 - 26° С [22]. При штормах верхний перемешанный слой может достигать мощности от 1 - 4 до 15 - 20 м. Ниже термоклина температура резко падает. Придонные слои (глубже 20 м) летом сохраняют температуру 2 - 3 °С, это происходит из-за влияния затоков [22]. Охлаждение начинается в конце августа, конвекция приводит к выравниванию температуры по вертикали к октябрю – ноябрю [26]. В глубоководных зонах подслоем конвекции сохраняются более плотные придонные воды.

Распределение солёности тесно связано с речным стоком (особенно Невы и Луги). В Финском заливе солёность еще ниже, чем в открытой Балтике, и составляет менее 7 ‰ - это примерно 1 чайная ложка соли без горки в 1 литре воды.

Рассмотрим гидродинамические условия Финского залива. Атмосферные процессы, водообмен с Балтийским морем, речной сток и морфометрические характеристики залива все это оказывает очень сильное влияние на характер циркуляции вод залива и определение течений.

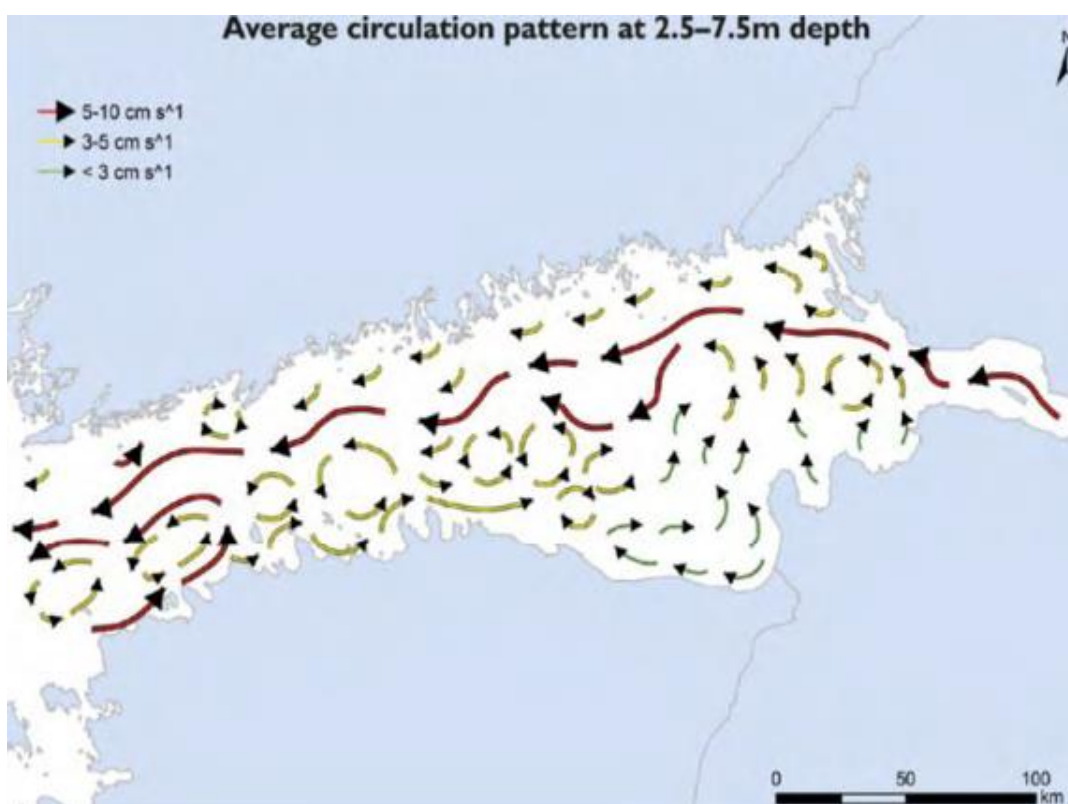


Рисунок 1.3.2 Средняя многолетняя циркуляция в поверхностном слое Финского залива. Стрелки указывают направление и скорость (см/с).

Общепринятая схема циркуляции (с 1969 года) имеет циклонический характер (Рисунок 1.3.2): воды поступают вдоль южного берега и, смешиваясь с невским стоком на востоке, уходят вдоль северного берега [20].

В системе течений выделяются наиважнейшие особенности:

1. суммарные течения имеют выносной характер, а центральная циркуляция нестабильна;

2. при северных, северо-восточных, восточных и юго-восточных ветрах стоковые течения усиливаются, в особенно в проливах;

3. западные и юго-западные ветра вызывают встречные поверхностные течения и штормовые нагоны;

4. при сильных юго-западных и западных ветрах течение на восток достигает скорости 25 см/с и, встречаясь со стоком Невы, поворачивает на юг.

В диапазоне 3 суток наблюдаются следующие типы колебаний уровня: приливные, сейшевые, сгонно-нагонные и штормовые нагоны.

Приливы имеют неправильный суточный и полусуточный характер, их амплитуда не превышает 10 - 12 см [21].

Сгонно-нагонные колебания, вызванные ветрами, могут достигать амплитуды более 2 м.

Штормовые нагоны, порождаемые длинными прогрессивными волнами и продолжительными западными ветрами, являются главной причиной катастрофических наводнений в вершине залива, чему способствует сужение залива к устью Невы и низкие берега.

Глава 2. Причины и механизмы, приводящие к значительным подъемам уровня в Балтийском море и наводнениям в Финском заливе

2.1 Факторы подъема уровня воды восточной части Финского залива

Подъемы уровня воды и в восточной части Финского залива и наводнения в Санкт-Петербурге - это сложное комплексное явление, обусловленное взаимодействием метеорологических и гидродинамических факторов, характер которых отличается высокой изменчивостью.

Циркуляции вод определяется атмосферными процессами, водообменом, речным стоком и морфометрические особенности залива, такие как площадь, глубина, конфигурация и характер берегов. Согласно классической схеме 1969 года, воды здесь движутся по кругу, как в циклоне [20]. Балтийская вода с восточным течением заходит с юга и, смешивается с невской водой на востоке, затем уходит на север.

Приливные колебания неправильные суточные/полусуточные, амплитуда до 10 - 12 см [21].

Сейшевые колебания одноузловыми, двух и более узловыми, с периодами около 1 суток, амплитуда до 100 см [24].

Сгонно-нагонные колебания, вызванные сильными ветрами, амплитуда более 2 м.

Штормовые нагоны дают наибольшие подъем уровня.

Опасность штормовых нагонов заключается в их способности вызывать катастрофические наводнения [16]. Они возникают при прохождении мощных циклонов с западными ветрами над акваторией Балтики. В зоне пониженного атмосферного давления формируется нагонная волна, которая, распространяется в сторону вершины Финского залива, усиливается на мелководье и сужения акватории. Важную роль играют частотные свойства бассейна, определяющие периоды собственных колебаний и их затухание.

Статистический анализ показывает, что основной причиной наводнений является ветер. Также отмечается возможный резонансный эффект «раскачивания» собственных колебаний, соответствующих основной фундаментальной сейшевой моде Финского залива с периодом 27 ч, при повторных атмосферных возмущениях, с периодом 1-2 суток. Однако стоячие волны - это лишь один из механизмов. При критических ситуациях подъемов вод, активную роль играют циклоны, фронты и связанные с ними поля давления и ветров, вызывающие интенсивные деформационные колебания уровня. В зависимости от синоптических условий, колебания могут переходить от длинной прогрессивной волны к стоячей. При наводнениях происходит наложение преобразованной длинной волны на сейшевый компонент, причем ветровой нагон часто усиливает эффект [1].

Подъемы воды сопровождается сильными западными или юго-западными ветрами. Циклоны с низким давлением «всасывают» воду в свою воронку, а ветровые потоки по касательной создают ветровой нагон. По водной поверхности распространяется длинная поступательная волна (Рисунок 2.1.1). В центральной Балтике ее высота составляет 30 - 50 см, а скорость 40 - 60 км/ч. При совпадении направления движения циклона и длинной волны, то эта волна может подпитываться энергией циклона и усиливаться. Трансформация волны зависит от поперечного сечения залива. Последовательное уменьшение площади сечения (от 4,5 у Ханко до 0,6 км² у мыса Шепелевский) приводит к замедлению фронта и дополнительному росту высоты, а западный ветер усиливает подъем еще сильнее [1].

С одной стороны, штормы играют положительную роль, облегчая перемешивание вод и затоки кислородосодержащей соленой воды. С другой стороны – они наносят разрушения берегам.



*Глубины Финского залива
и северо-восточной части Балтийского моря
(цифры показывают глубину в метрах;
стрелкой указано направление движения длинной волны)*

Рисунок 2.1.1 Глубины Финского залива и направление движения длинной волны

2.2 Статистический анализ штормовых нагонов в Финском заливе

Наибольший урон от штормовых нагонов приходится на Санкт-Петербург и Ленинградскую область. До 1982 года наводнением считался подъем уровня свыше 150 см относительно среднего многолетнего уровня у Горного института. В настоящее время критическим порогом служит отметка 160 см относительно нуля Кронштадтского футштока (средний многолетний уровень Кронштадта).

По данным Санкт-Петербургского гидрометцентра, за период с 1703 по 2011 гг. в городе зарегистрировано 311 наводнений. Из них 234 были опасными (160 - 210 см), 71 - особо опасные (211 - 300 см) и 3 - катастрофические (более 301 см). Исторический максимум зафиксирован 19(7) ноября 1824 г. и составил 421 см. Специалисты института «Ленгидропроект» рассчитали подъем, что уровень может достигать 4.87 м (вероятностью 1 раз в 1000 лет) и 5.40 м (1 раз в 10000 лет).

Из 311 случаев 237 (76%) произошли в осенние и раннезимние месяцы (сентября - декабрь. На январь-март приходится 45 наводнений (15%), на апрель-август - лишь 26 случаев (9%). Такое распределение связано с изменением интенсивности циклонической деятельности в атмосфере, а зимой, с развитием ледяного покрова.

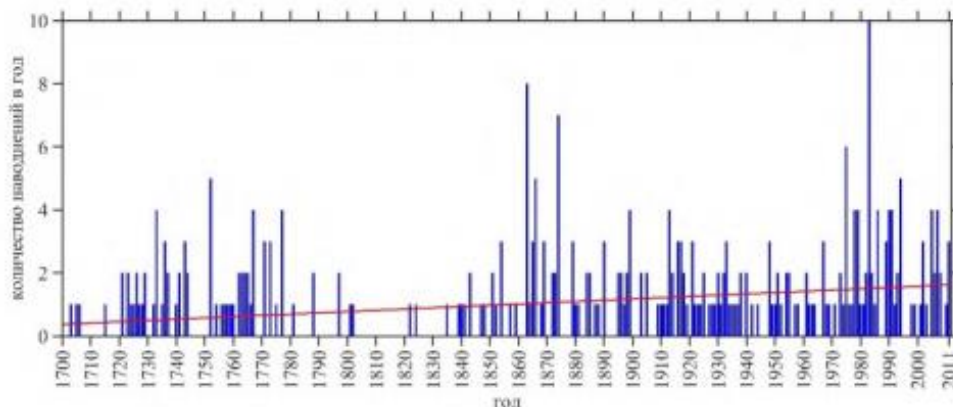


Рисунок 2.2.1 Распределение случаев Невских наводнений по годам

На рисунке 2.2.1 продемонстрировано распределение количества случаев наводнений по годам, начиная с 1703 по 2011 гг. Здесь показано, что в XVIII столетии произошло 75, в XIX - 77, в XX - 138 наводнений, причем в первой половине XX столетия - 57, а во второй - 81 наводнение. В XXI веке, до ввода КЗС за 11 лет произошло 22 наводнения.

Скорость подъема и спада уровня, а также продолжительность стояния высоких вод зависят от высоты наводнения:

- при высоте 150-200 см скорость подъема 20 - 25 см/ч, спада 15 - 20 см/ч
- при уровнях выше 200 см скорость подъема 25 - 30 см/ч, а спад 20 - 25 см/ч.

Максимальная скорость подъема (до 100 см/ч) отмечена 15 октября 1929 г. и 1 октября 1994 г.; минимальная скорость спада - 90 см/ч. Обычно время спада бывает в 1,1 - 1,3 раза превышает времени подъема [19].

Средняя продолжительность стояния высокого уровня (выше 160 см) при 190 см составляет 2,5 часа, при 210 см - 3,5 часа, 260 см - 5,5 часа и при 310 см - 7,5 час. Во время наводнения 24-25 ноября 1903 г. (уровень 269 см) высокий подъем удерживался 13,5 часа - это исторический максимум [28].

Общая продолжительность наводнения (от начала подъема и до конца спада) в среднем 24 -30 часов, минимум 10 - 12 часов, максимум 70 - 75 часов [28].

Повторяемость наводнений по годам может значительно меняться. Рекорд - 10 случаев в 1983 г. По 8 и 7 случаев было в 1863 г. и в 1874 г. Соответственно. Встречаются периоды отсутствия наводнений, например, 1745 - 1751, 1808 - 1821, 1881 - 1894, 1900 - 1902, 1906 - 1908, 1945 - 1947, 1951 - 1953, 1959 - 1960, 1965 - 1966, 1987 - 1988, 1995 - 1997, 2000, 2004, 2009, 2012 и 2014 гг.

Таблица 2.2.1

Повторяемость невских наводнений в 1703-2008 гг.

Класс наводнения	Количество	Месяцы года												Всего
		I	II	III	IV	V	VI	VII	VIII	IX	X	XI	XII	
Опасные 160-210 см	Число случаев	22	7	7	1	4	5	1	10	25	56	57	39	234
	%	9	3	3	<1	2	2	0	4	11	24	24	17	100
Особо опасные 211-299 см	Число случаев	8	1	0	0	1	0	0	4	10	19	21	7	71
	%	11	1	0	0	1	0	0	6	14	27	30	10	100
Катастрофические, выше 301 см	Число случаев	0	0	0	0	0	0	0	0	2	0	1	0	3
	%	0	0	0	0	0	0	0	0	67	0	33	0	100
Всего	Число случаев	30	8	7	1	5	5	1	14	37	75	78	46	308
	%	10	3	2	<1	2	2	<1	4	12	24	25	15	100

В 90 % случаев наводнения происходят при сильных западных/юго-западных ветрах. Наибольшее число (29 наводнений) случилось при скорости ветра ~12 м/с, а катастрофические - при 15 - 25 м/с. Однако зафиксированы подъемы уровня выше 160 см при слабом или даже восточном ветре, а также в штиль. [17]. Но бывали наводнения и при очень слабом локальном западном ветре в районе Невской губы, при полном его отсутствии и, даже, при восточном и северо-восточном ветре [28]. Случаи подъемов уровня в Невской губе выше 160 см при штиле и даже сгонных ветрах восточных румбов отмечались многократно [17].

Для Балтики применяются разные критерии штормового нагона. В Германии это подъем ≥ 100 см. В Северо-Западном УГМС для Финского залива порог варьировался от 50 до 135 см, что, однако, недостаточно репрезентативно из-за разной дисперсии уровня в разных частях моря. Например, в Стокгольме превышение в 70 см - редкое событие, а на востоке Финского залива - частое, даже без шторма.

В Северо-Западном управлении Росгидромета для восточной части Финского залива действовал крайне размытый критерий оценки штормовых нагонов: пороговые значения уровня воды варьировались от 0,5 до 1,35 метра в зависимости от года и конкретного пункта наблюдений.

Однако такой разброс делает методику малоприменимой для всего Балтийского моря, поскольку амплитуда колебаний водной поверхности в разных его районах

отличается кардинально. То, что для Стокгольма является аномалией века (подъем на 70 см), для восточной оконечности Финского залива - рядовая ситуация, нередко случающаяся даже при вполне спокойной погоде.

Известно, что подавляющее большинство (около 90%) наводнений в устье Невы происходит в холодное полугодие и сопровождается штормами, интенсивным ветроволновым перемешиванием и осенне-зимней конвекцией. Долгое время считалось, что в таких условиях мелководный залив со средней глубиной около 60 метров лишен устойчивой стратификации, так как его воды полностью перемешиваются. Тем не менее, некоторые волны, провоцирующие подъем воды у берегов Петербурга, по своей природе относятся к бароклинным топографическим. Но физика этих волн такова, что они способны зарождаться и эволюционировать исключительно при наличии четко выраженной стратификации вод, что вступает в противоречие с устоявшимся мнением.

Чтобы разрешить это противоречие и изучить реальную стратификацию в периоды опасных нагонных явлений, ученые обратились к глобальным океанографическим базам данных, а также к материалам реанализа. Проблема, однако, в том, что получить надежные контактные измерения в разгар шторма – задача почти невыполнимая: работы судового оборудования в таких условиях крайне затруднены. Это подтверждает статистика: с 1990 года в архивах экспедиций удалось найти лишь шесть зондирований, выполненных финскими исследователями на судне «Aranda» в 1998 и 2007 годах именно во время наводнений. При этом в открытой части Балтики в проливах за тот же период было проведено 296 подобных измерений.

Оценка стратификации вод и ее временной изменчивости в условиях штормовых нагонов, вызывающих экстраординарные подъемы уровня моря в Невской губе, сопряжена со значительными методологическими трудностями.

Это обусловлено тем, что проведение инструментальных судовых измерений океанографических характеристик в штормовых условиях, как правило, затруднено. Анализ баз данных судовых экспедиционных исследований термохалинной структуры вод Финского залива за период с 1990 года по настоящее время выявил ограниченное количество данных – всего 6 зондирований, выполненных финскими специалистами в штормовых условиях, совпавших с наводнениями в Санкт-Петербурге (в 1998 и 2007 годах). В противоположность этому, в открытой Балтике и ее проливах в аналогичные периоды было проведено значительно большее количество судовых измерений – 296 (Рисунок 2.2.2) [30].

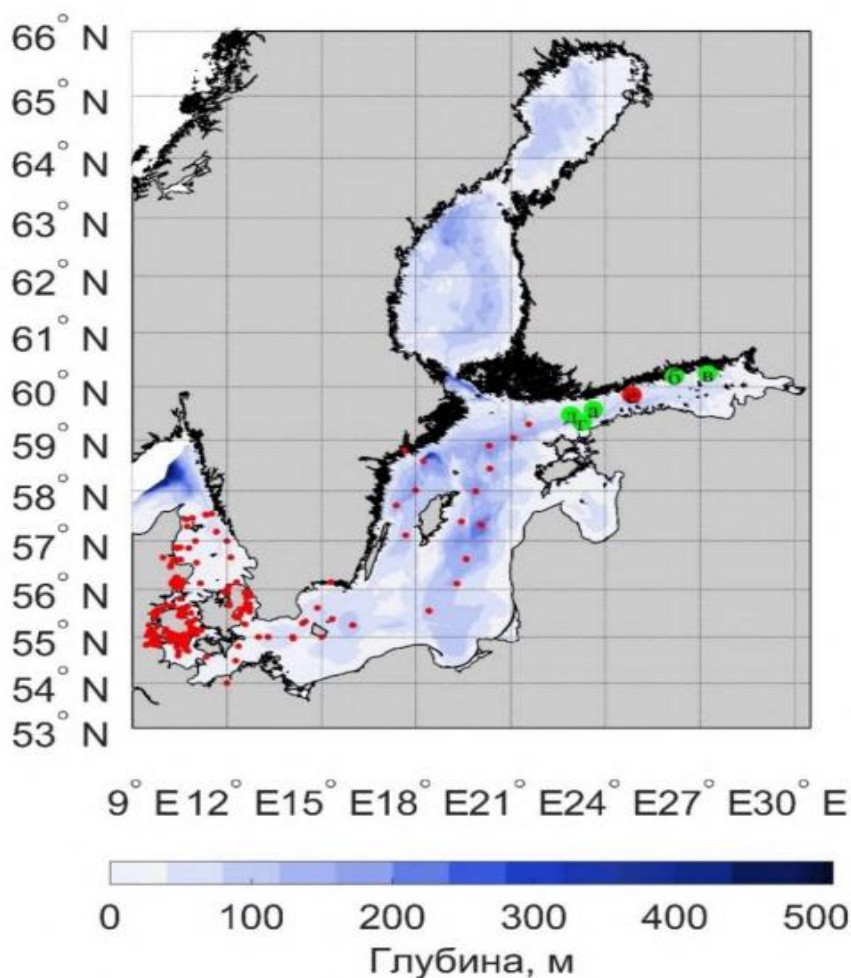


Рисунок 2.2.2 Карта судовых измерений температуры и солености морской воды в период наблюдавшихся в Санкт-Петербурге опасных подъемов уровня моря, красным цветом – данные с ресурса Copernicus Marine Service (<http://marine.copernicus.eu>), зеленым из базы das.

На основе измеренных значений температуры и солености была рассчитана плотность морской воды. Для этого использовалось уравнение состояния UNESCO 1983 (EOS 80), которое определяет плотность как функцию температуры, солености и гидростатического давления. Таким образом, плотность (ρ , в кг/м^3) зависит от температуры (T , в $^{\circ}\text{C}$), солености (S , psu) и давления (P , дб).

Интересно отметить, что во время наводнений, например, в центральной части Финского залива в 2007 году и в его западной части в 1998 году, интенсивное турбулентное перемешивание приводило к формированию мощного, почти однородного слоя воды. Этот слой мог достигать глубины 55-65 метров. Под ним располагался четко выраженный пиноклин – слой с резким изменением плотности, который отделял более соленые придонные воды (Рисунок 2.2.2). Разница в температуре и солености между этим верхним однородным слоем и придонными водами составляла от 1,0 до 4,5 $^{\circ}\text{C}$ и от 0,3 до 1,4‰ соответственно.

В западной части залива распределение температуры и солености было более сложным. Здесь верхний квазиоднородный слой был значительно тоньше, чем в центральной части, его толщина варьировалась от 12 до 32 метров. Ниже этого слоя наблюдалась заметная температурная инверсия, где температура изменялась на 0,4 $^{\circ}\text{C}$. Соленость от поверхности до дна менялась ступенчато, с общим перепадом от 0,5‰ до 2,5‰ (Рисунок 2.2.2). В целом, толщина верхнего квазиоднородного слоя могла составлять от 35 до 55 метров, а разница в температуре и солености между ним и придонными слоями могла достигать 4 $^{\circ}\text{C}$ и 7‰ соответственно [30].

Глава 3. Исходные данные и статистические методы определения выбросов

3.1. Исходные данные

Для определения выбросов, которые являются параметром штормовых нагонов в Финском заливе, и для их оценки были подготовлены следующие исходные данные - ряды ежечасных измерений уровня моря на 4 станциях: Ханко, Хельсинки, Хамина, Шепелево.

Данные для 3 финских станций (Ханко, Хельсинки, Хамина) были получены с ресурса Copernicus Marine Service (<http://marine.copernicus.eu>), а данные измерений уровня с российской станции (Шепелево) были предоставлены Северо-Западным управлением Федеральной службы по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды (СЗ УГМС Росгидромета) (<http://www.meteo.nw.ru>).

В разделе «Остановленные наводнения» на сайте Дирекции комплекса защитных сооружений г. Санкт-Петербурга Министерства строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации <https://dambaspb.ru/flood> были выбраны три даты предотвращенных наводнений в Санкт-Петербурге:

1. 29 октября 2013 года, ураган "Святой Иуда". Прогнозируемый уровень воды в Санкт-Петербурге у Горного института +267 см.
2. 5 декабря 2015 года, шторм "Десмонд". Прогнозируемый уровень воды в Санкт-Петербурге у Горного института +268 см.
3. 26 сентября 2018 года. Прогнозируемый уровень воды в Санкт-Петербурге у Горного института +214 см.

Также были собраны среднесуточные данные о метеорологических условиях, таких как атмосферное давление, скорость ветра, в течении месяца, года, в которых происходили выбранные штормовые нагоны. Информация была получена из архива данных погоды Погодных сервисов (<https://pogoda-service.ru/.ru/>).

3.2 Оценивание выбросов статистическими методами

Для точного определения и последующей оценке показателей штормовых нагонов в акватории Финского залива требуется тщательный анализ пиковых значений подъема уровня моря. Эти пики являются индикаторами статистических колебаний уровня залива и отражают его динамические изменения.

Аномальные значения, или «выбросы», представляют собой значения или набор значений в подборке данных, который сильно отличается от остальных данных в выборке. Их присутствие в статистических рядах является достаточно частым явлением. Такие выбросы могут свидетельствовать как об экстремальных проявлениях изучаемого феномена, также и быть результатом ошибок, возникших в процессе измерений, расчетов, а также при ручной или автоматизированной обработки данных. Особый интерес для нас представляют выбросы первого типа, поскольку они напрямую связаны с природными стихийными явлениями. Следовательно, учет экстремальных стихийных процессов в статистических расчетах критически важен для получения адекватного представления о произошедших чрезвычайных событиях [18].

Существуют ряд методик для идентификации выбросов. Например, простейшая из них – визуальный или «физический анализ», при котором выбросы определяются путем естественного осмотра ряда данных. Однако, если различия между данными не очень велики, тогда точно и безошибочно выявить пиковые выбросы становится очень затруднительно. В таких случаях необходимо применить специализированные статистические подходы, к которым относятся: метод «трех сигм», квантильный анализ, критерий Стьюдента и робастный подход. Рассмотрим более детально первые три из них:

1. «Правило трех сигм»

Предположим, что случайные ошибки подчиняются нормальному закону распределения, плотность вероятности этих ошибок описывается следующей формулой:

$$f(\delta) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{\frac{-\delta^2}{2\sigma^2}} \quad (3.2.1)$$

Правило «трех сигм» утверждает, что для нормального распределения случайной величины практически все значения, примерно 99,7%, лежат в интервале от $|\bar{x} - 3\sigma|$ до $|\bar{x} + 3\sigma|$, где

$\bar{x}$ - среднее арифметическое выборки;

σ - стандартное отклонение (мера рассеивания значений относительно среднего).

Вероятность того, что случайная величина будет отклоняться от математического ожидания более чем на три стандартных отклонения, обычно, не превышает 0,28%, то есть является незначительной.

Таким образом, если выполняется условие:

$$|\bar{x} - x_n| > 3\sigma, \quad (3.2.2)$$

где x_n – крайнее значение в ряду, то его следует исключить. Важно отметить, что в некоторых задачах данный критерий может быть излишне строгим. В этих случаях используется менее жесткое условие:

$$|\bar{x} - x_n| > 2\sigma, \quad (3.2.3)$$

которому соответствует вероятность появления случайной ошибки в исследуемом ряду, равная приблизительно 5 % [18].

2. Квантильный анализ – метод Тьюки

Это метод выявления выбросов в наборе данных, основанный на использовании межквартильного размаха, в котором используется IQR – межквартильный интервал.

В рамках квантильного анализа, точка, резко выделяющаяся из общей совокупности классифицируется как выброс, если для нее выполняются следующие условия:

- для положительных аномалий: $x_{\text{выб}} > x_{0,75} + kQ$,
- для отрицательных аномалий: $x_{\text{выб}} < x_{0,25} - kQ$,

где k – подгоночный коэффициент, называемый коэффициентом выбросов. В пакете «Статистика» по умолчанию он принимается равным $k = 1,5$. Для случайной выборки, имеющей нормальное распределение, в диапазоне $\pm kQ$ содержится 99 % значений выборки. Если принять величину $k = 3$, то в диапазоне $\pm 3Q$ содержится - 99,9997 % значений выборки [18].

Алгоритм, как найти выбросы:

- Отсортировать данные в возрастающем порядке;
- Вычислить первый квартиль Q_1 (0,25-квартиль) и третий квартиль Q_3 (0,75-квартиль);
- Рассчитать межквартильный размах: $IQR = Q_3 - Q_1$;
- Определить границы выбросов:
нижняя граница $Q_1 - 1,5 * IQR$;
верхняя граница $Q_3 + 1,5 * IQR$.
- Отсеять все значения, которые лежат за пределами этих границ, эти значения считаются выбросами.

Коэффициент 1,5 - это не строго зафиксированное значение. В большинстве случаев применяют данный коэффициент, так как она покрывает большинство наблюдений, которые располагаются близко к центру.

По чувствительности метода квартильный анализ бывает: «мягкий» и «жесткий». При «мягком» (близком) варианте используются значения в диапазоне от 1,5 до 3 интерквартильных размахов выше верхнего и нижнего квартиля. При «жестком» (далеком) - удалены от значений квартилей на расстояние > 3 интерквартильных размахов.

3. Критерий Стьюдента

Предположим, что имеется вариационный ряд $x_1, x_2, \dots, x_n$, где значение x_n заметно отличается от остальных. Тогда необходимо решить вопрос о принадлежности x_n к остальным наблюдениям, которые мы исследуем в данной выборке. Для этого формируется нулевая гипотеза вида $H_0: |\bar{x} = x_n|$, проверка которой при условии исходных данных осуществляется с помощью критерия Стьюдента:

$$t = \frac{|\bar{x} - x_n|}{\sigma}, \quad (3.2.4)$$

Здесь выборочные характеристики $\bar{x}$ и σ рассчитываются без учета величины x_n . После этого проверяется выполнение неравенства $t > t_{кр.}(\alpha, v = n - 1)$. Если это неравенство соблюдается, то нулевая гипотеза отвергается и делается вывод, что резко отличающееся наблюдение x_n входит в противоречие с данной выборкой и поэтому может быть из нее исключено. Если это неравенство не выполняется, то можно предположить, что крайнее наблюдение x_n нецелесообразно исключать. После исключения крайнего значения, данную процедуру необходимо повторить и для следующего по абсолютной величине максимального отклонения, но обязательно предварительно пересчитать $\bar{x}$ и σ для выборки нового объема $n - 1$. В некоторых случаях для малых выборок вместо (3.2.4) вычисляется отношение:

$$t = \frac{|\bar{x} - x_n|}{\sigma \sqrt{\frac{(n-1)}{n}}}, \quad (3.2.5)$$

Далее процедура обнаружения грубых погрешностей и ошибок аналогична представленной выше. Введение множителя $\sqrt{\frac{(n-1)}{n}}$ учитывает смещенность оценок при малых объемах выборки. Данный способ выявления грубых ошибок достаточно прост и его легко применять на практике, но он имеет значительные недостатки. Например, он оказывается нечувствительным, если в исследуемой выборке выбросы группируются

вместе, но они отстоят довольно далеко от основной массы наблюдений. Кроме того, далеко не всегда исходная выборка имеет нормальное распределение [18].

Каждый из рассмотренных методов имеет свои преимущества и недостатки.

Правило «трех сигм» является очень простым в применении, но эффективность его работы очень сильно зависит от нормального распределения данных. При изменении числа стандартного отклонения, этот метод может быть слишком жестким или более мягким, что влияет на процент случайных ошибок, возможны пропуски реальных выбросов.

Квантильный анализ опирается на порядковые статистики (квантили), то есть он более устойчив к ненормальности распределения. Его можно использовать для обнаружения выбросов, когда данные ассиметрично распределены. Выбор коэффициента k позволяет регулировать чувствительность метода от мягкого до жесткого.

Для критерия Стьюдента распределение данных должно быть близко к нормальному, поэтому гипотезу о принадлежности подозрительного значения можно проверить более формально. Для выполнения перерасчета характеристик выборки обязательно исключение подозрительного значения.

Для анализа штормовых нагонов Финского залива, которые представляют собой экстремальные явления с возможностью отклонения от нормального распределения, желательно использовать комбинацию методов. Это позволит идентифицировать критические события, оценить их статистическую значимость, это является основным фактором для понимания динамики штормовых нагонов, и как они влияют на прибрежные территории.

3.3 Гидрометеорологическая обстановка во время трех мощных наводнений

Подготовлены графики, на которых представлены ежечасные измерения уровня моря на 4 станциях: Ханко, Хельсинки, Хамина, Шепелево за октябрь 2013 года, декабрь 2018 года, сентябрь 2018 года, диаграммы среднесуточных измерений атмосферного давления, гПа на 4 станциях за те же периоды, график скорости ветра на 4 станциях на тот же интервал. Представлены изображения направления ветра, полученные с сайта Ventusky (<https://www.ventusky.com/>), на 3 даты самого максимального подъема уровня воды в Финском заливе 29.10.2023, 05.12.2015, 26.09.2018.

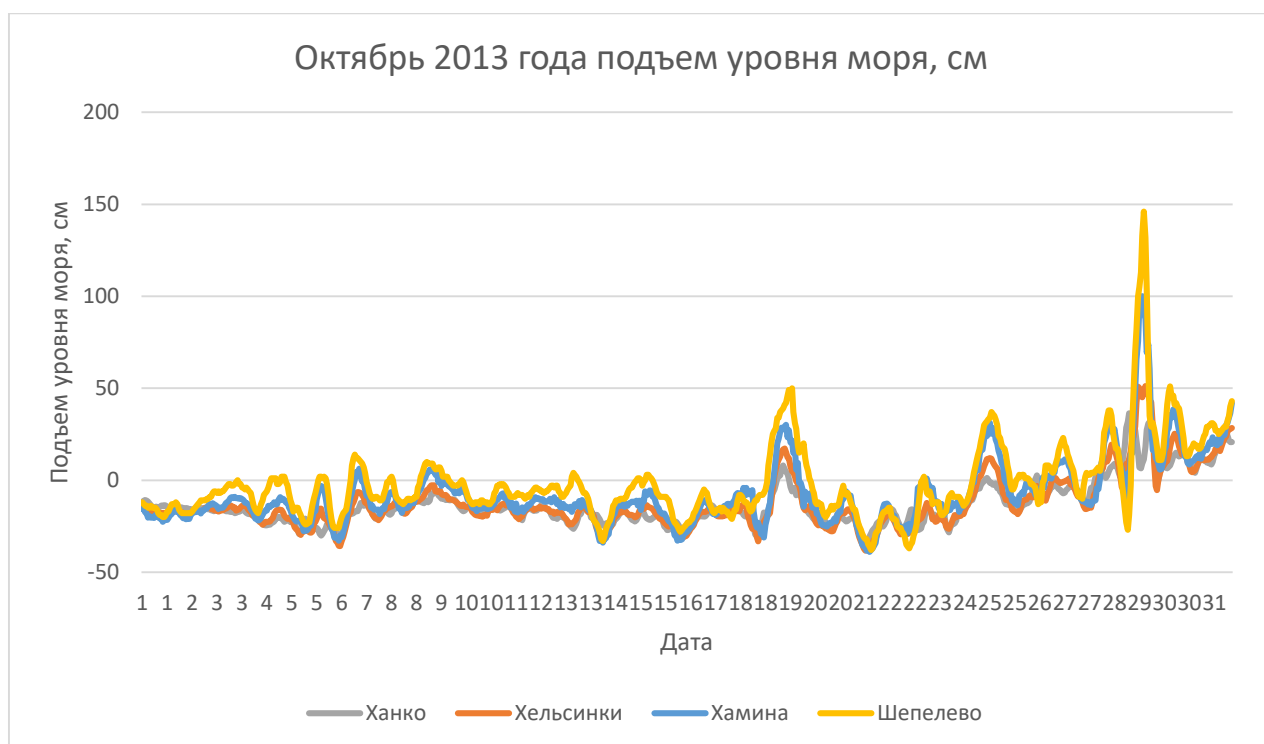


Рисунок 3.3.1 Ежечасные измерения уровня моря на 4 станциях: Ханко, Хельсинки, Хамина, Шепелево за октябрь 2013 года

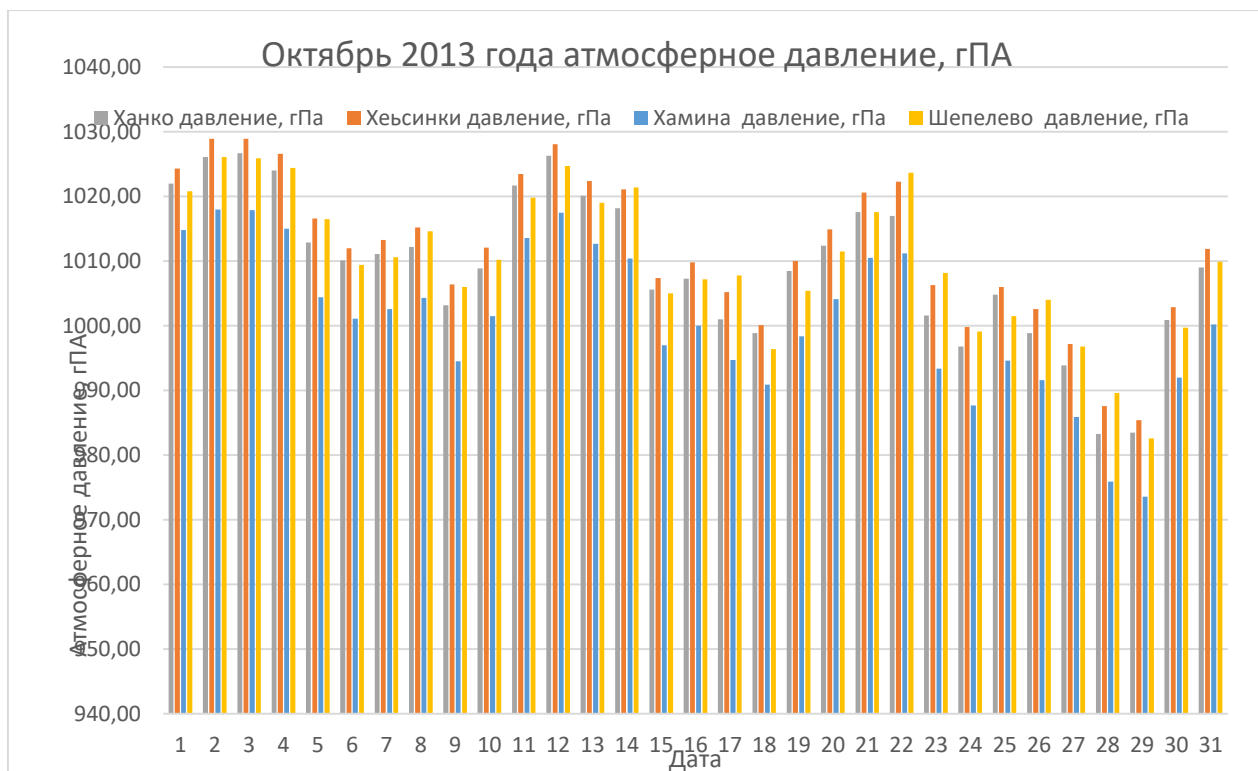


Рисунок 3.3.2 Среднесуточные измерения атмосферного давления, гПа на 4 станциях: Ханко, Хельсинки, Хамина, Шепелево за октябрь 2013 года

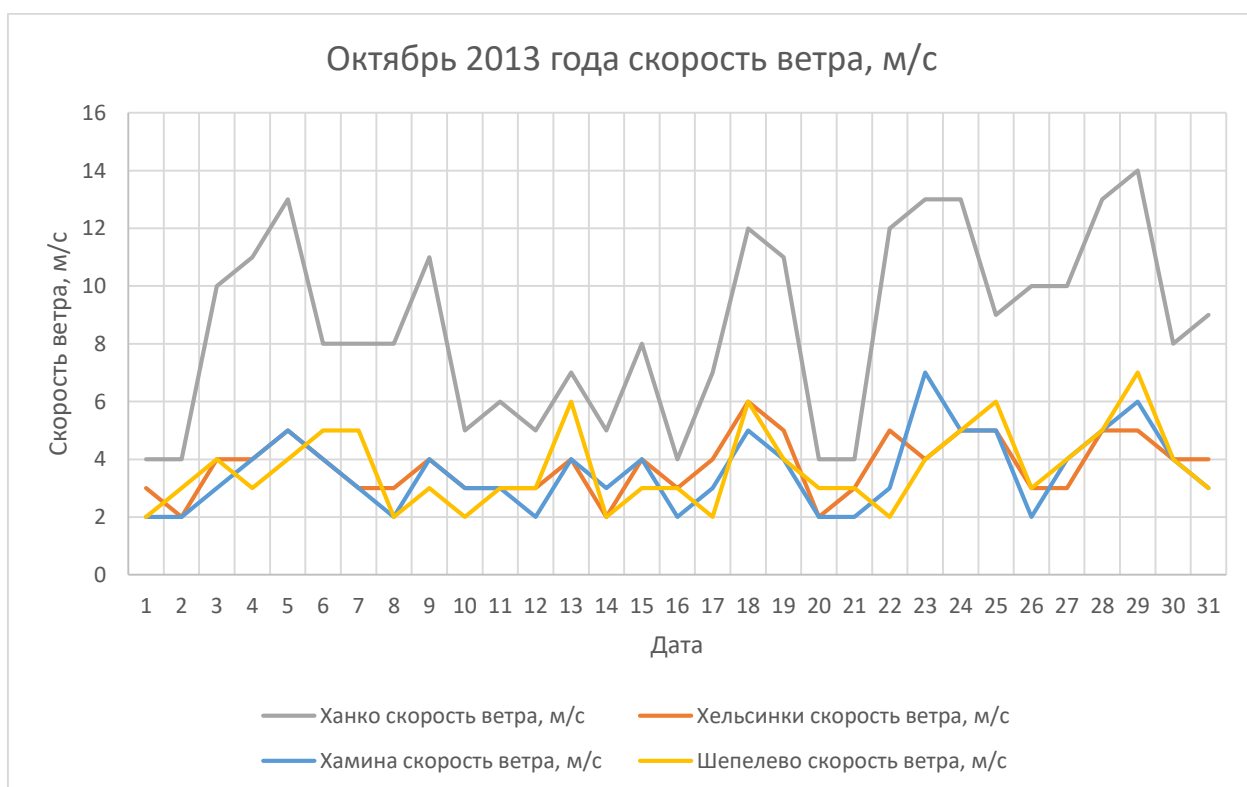


Рисунок 3.3.3 Среднесуточная скорость ветра м/с на 4 станциях: Ханко, Хельсинки, Хамина, Шепелево за октябрь 2013 года

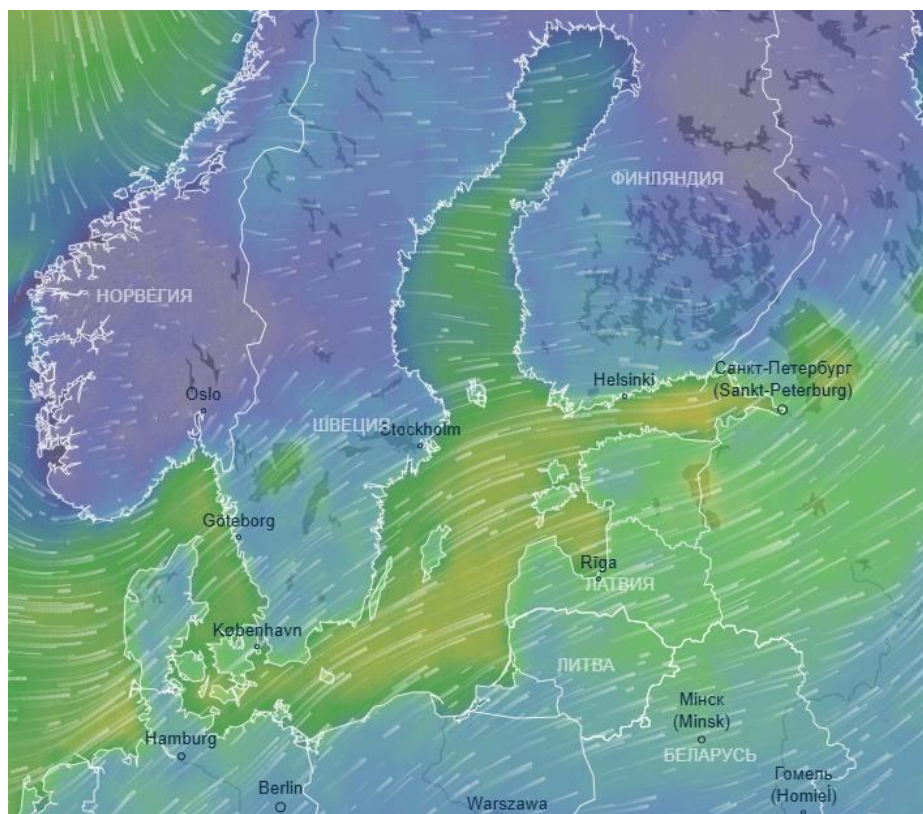


Рисунок 3.3.4 Карта ветра над акваторией Балтийского моря на 29 октября 2013 года

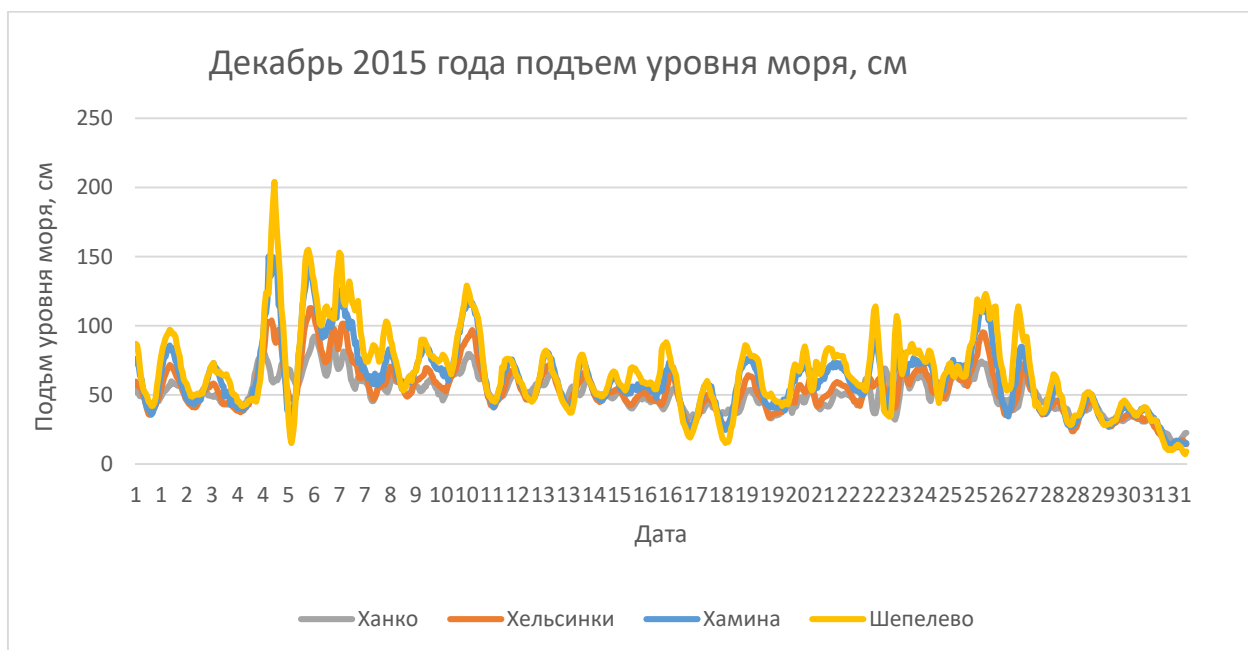


Рисунок 3.3.5 Ежечасные измерения уровня моря на 4 станциях: Ханко, Хельсинки, Хамина, Шепелево за декабрь 2015 года

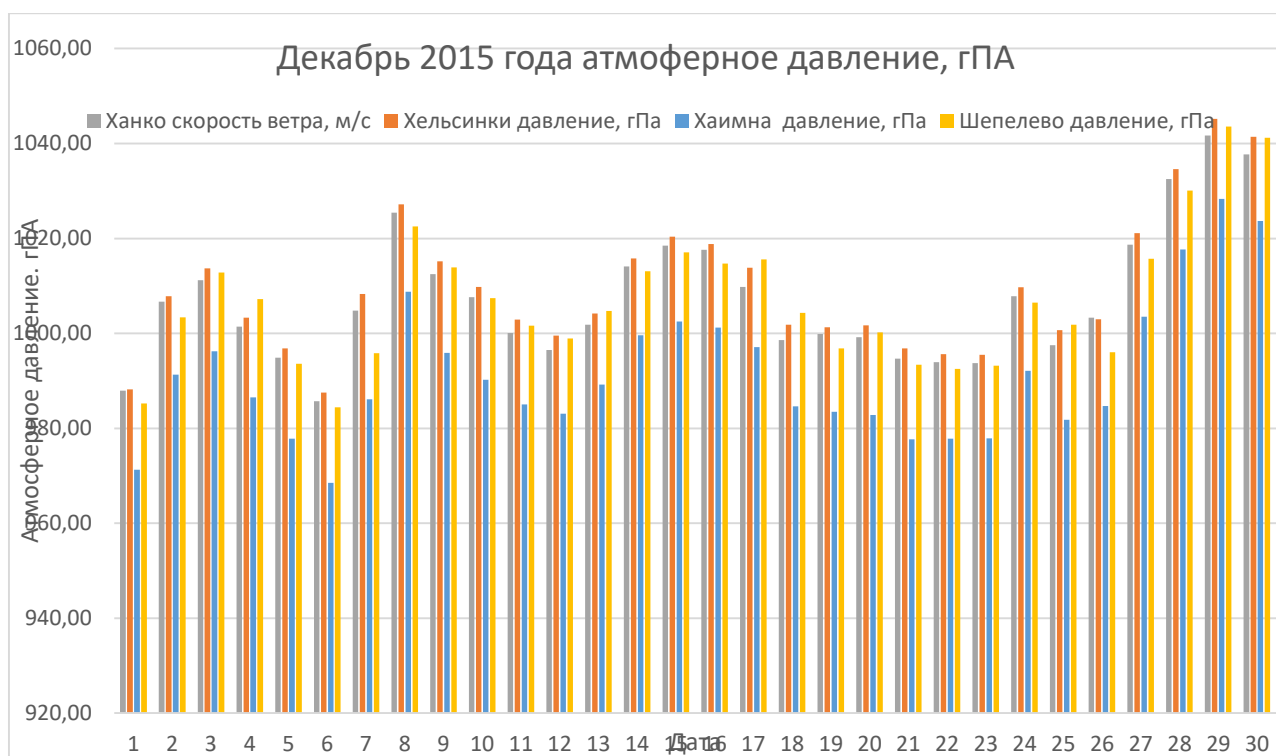


Рисунок 3.3.6 Среднесуточные измерения атмосферного давления, гПа на 4 станциях: Ханко, Хельсинки, Хамина, Шепелево за декабрь 2015 года

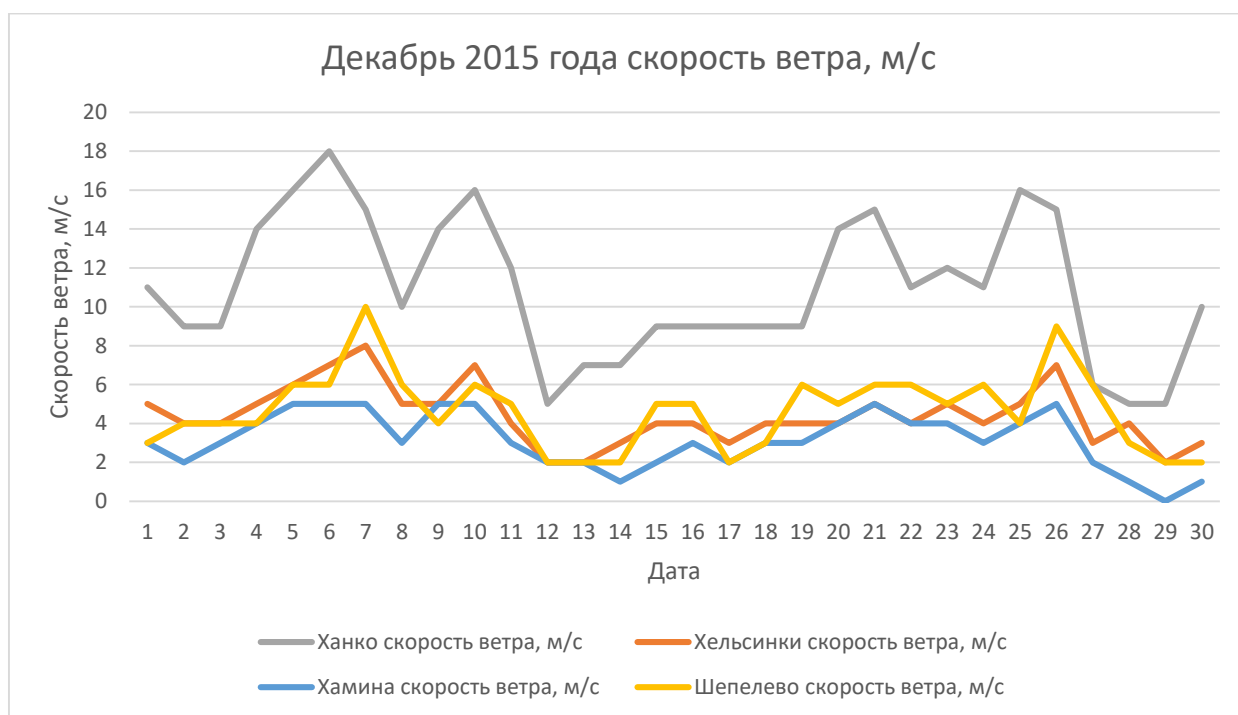


Рисунок 3.3.7 Среднесуточная скорость ветра м/с на 4 станциях: Ханко, Хельсинки, Хамина, Шепелево за декабрь 2015 года

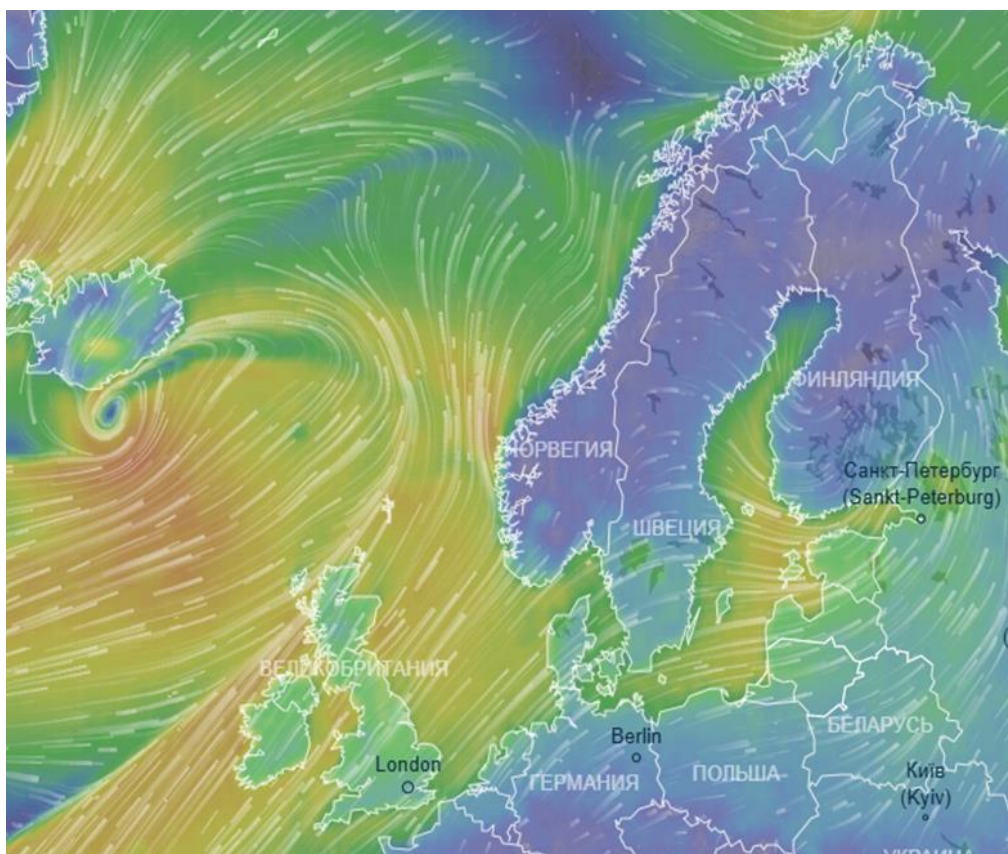


Рисунок 3.3.8 Карта ветра над акваторией Балтийского моря на 5 декабря 2015 года

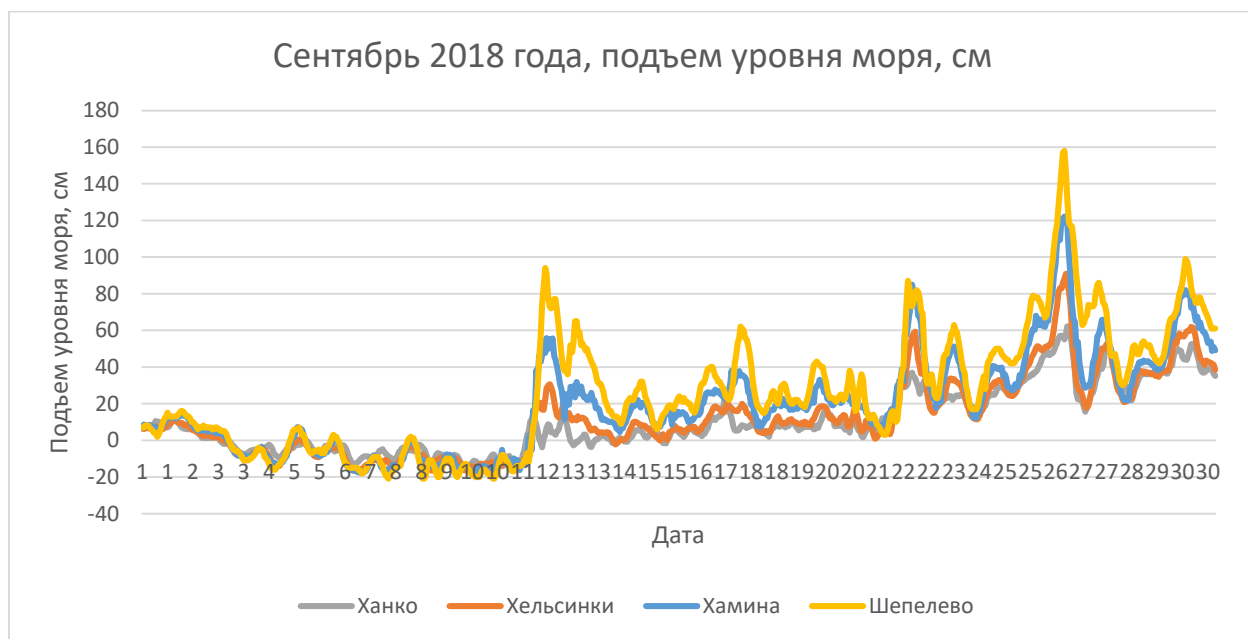


Рисунок 3.3.9 Ежечасные измерения уровня моря на 4 станциях: Ханко, Хельсинки, Хамина, Шепелево за сентябрь 2018 года

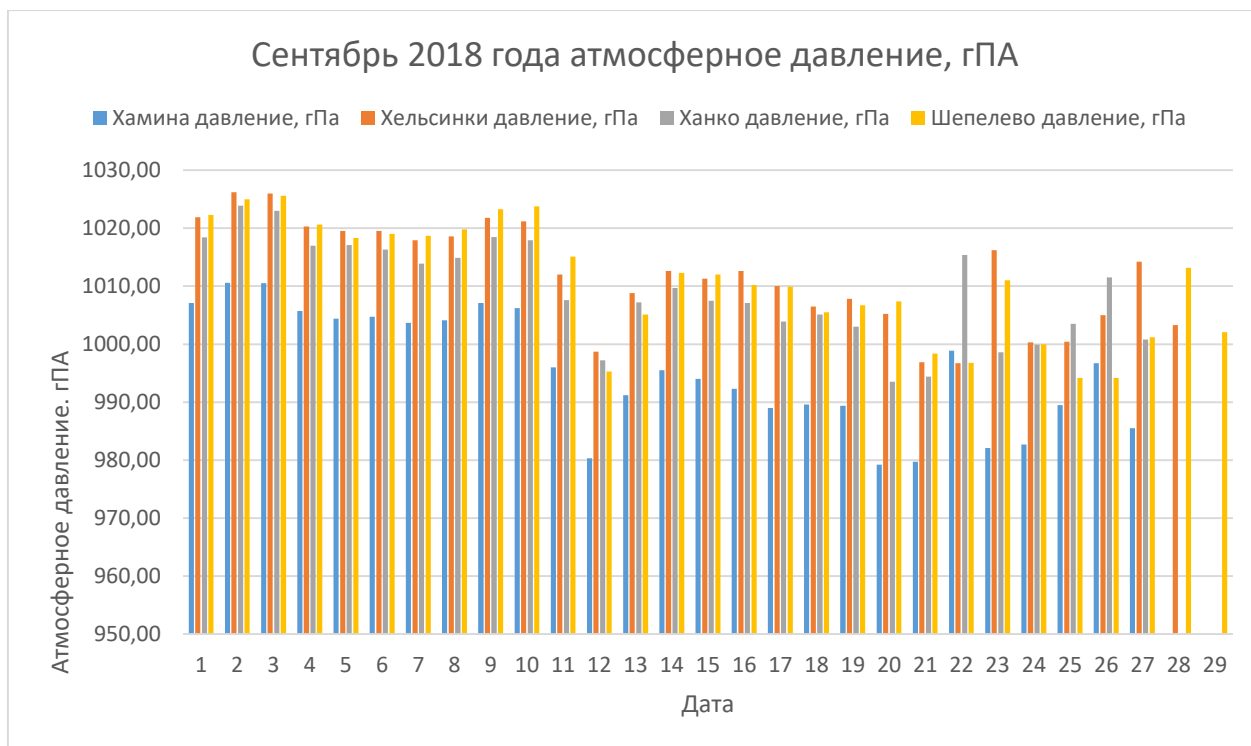


Рисунок 3.3.10 Среднесуточные измерения атмосферного давления, гПа на 4 станциях: Ханко, Хельсинки, Хамина, Шепелево за сентябрь 2018 года

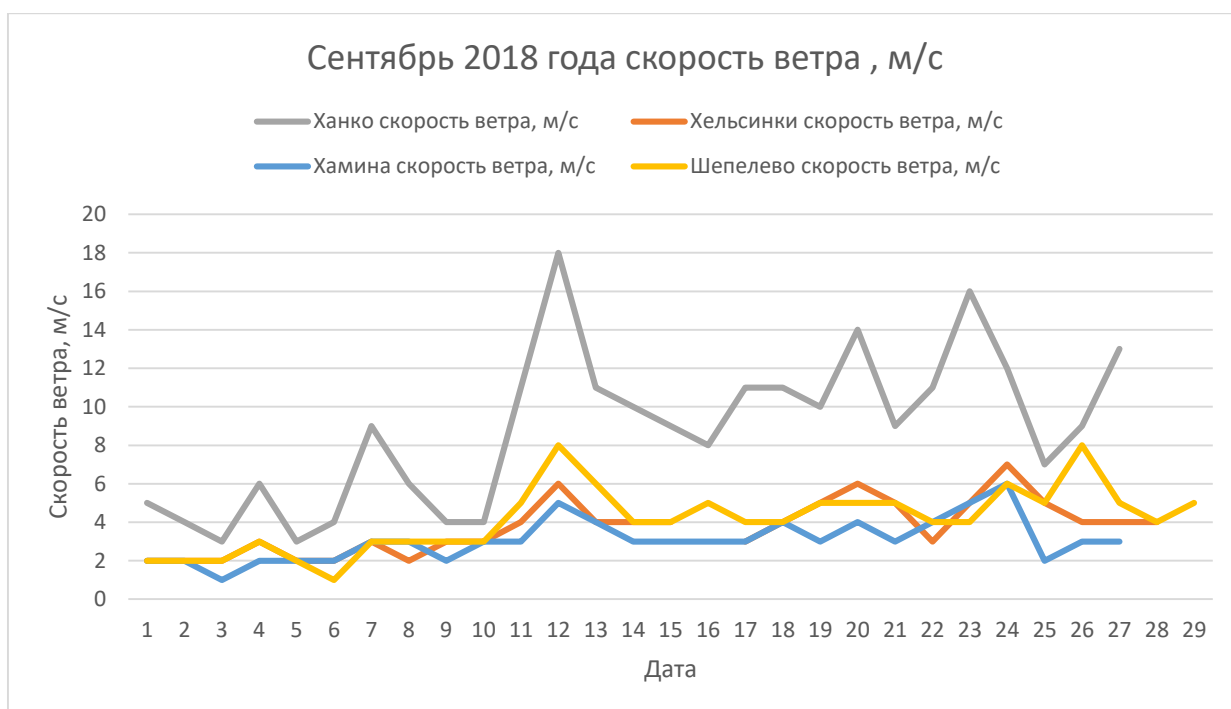


Рисунок 3.3.11 Среднесуточная скорость ветра м/с на 4 станциях: Ханко, Хельсинки, Хамина, Шепелево за сентябрь 2018 года

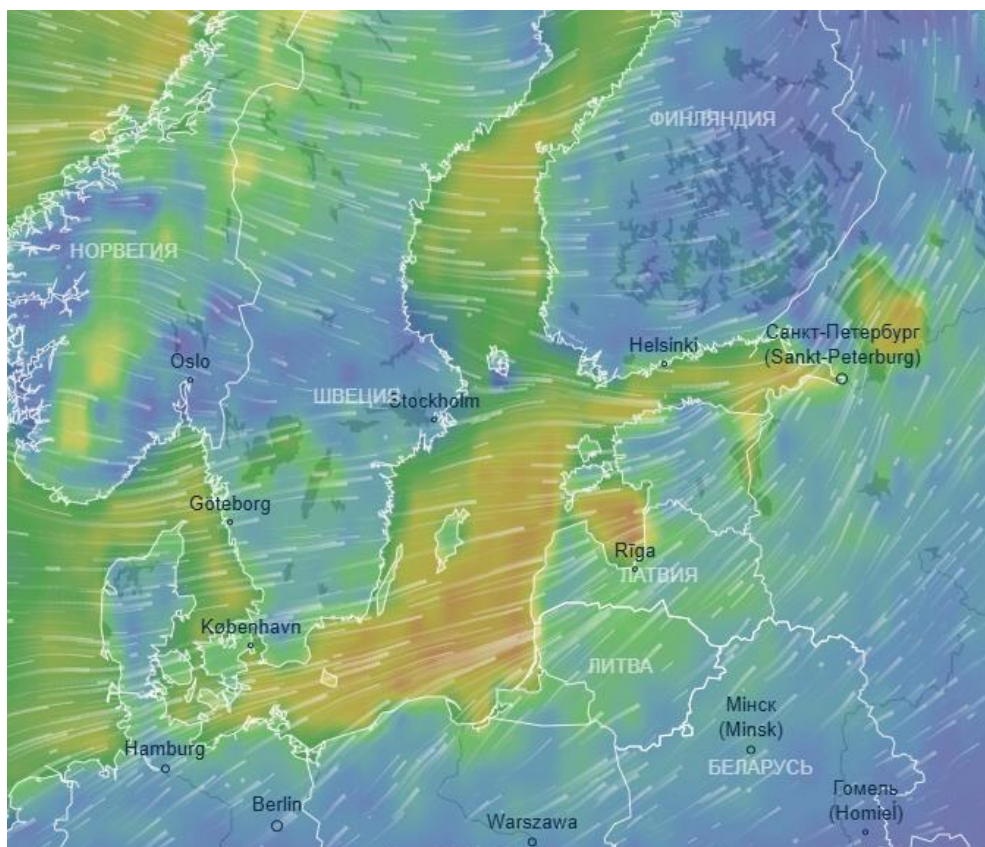


Рисунок 3.3.12 Карта ветра над акваторией Балтийского моря на 26 сентября 2018 года

При рассмотрении всех представленные изображений видно, что максимальные подъемы уровня Финского залива на графиках, построенных на основе исходных данных по выбранным трем отрезкам времени, совпадают с датами опасных событий 29.10.2023, 05.12.2015, 26.09.2018. Это относится к диаграммам атмосферного давления (рисунок 3.3.2; 3.3.6; 3.3.10), в даты экстремального периода давление понижено, так же к скорости ветра (рисунок 3.3.3; 3.3.7; 3.3.11), здесь заметно увеличение скорости ветра в рассматриваемые даты, особенно это ярко выделено на станции Ханко. Можно обратить внимание, что в декабре 2015 года высокие подъемы воды, понижение давление и сильное повышение скорости ветра растянуто на 3 суток, это подтверждает, что 5, 6, 7 декабря продолжался ураган «Десмонд», о чем указано в архиве остановленных наводнений за 2015 год дирекции КЗС. Подкрепляет это на карте ветра над акваторией Балтийского моря наличие на северо-западе сильного циклона. На представленных картах ветра на

акваториях Балтийского моря (рисунок 3.3.4; 3.3.8; 3.3.12) заметно преобладание ветров юго-западного, западного направлений.

Предоставленные данные с четырех станций Финского залива качественно и количественно хорошо согласуются с известными характеристиками штормовых нагонов, которые были остановлены КЗС. Графики (Рисунок 3.3.1; 3.3.5; 3.3.9) наглядно демонстрируют картину развития нагонных явлений в восточной части Финского залива.

Рассматривая наводнение от 29.10.2013 (ураган «Святой Иуда»), на графике хорошо виден резкий подъем уровня воды с пиком, приходящимся на 29 октября. Максимальный подъем, зафиксированный на станции Шепелево, составляет 146 см, что указано на графике (Рисунок 3.3.1). Шепелево находится на окраине залива и ниже чем центральная часть Горный институт, где прогнозировался подъем уровня +267см. Длился около 10 часов.

Наводнение от 05.12.2015 (шторм «Десмонд») со сложной структурой штормового нагона, присутствует три пика, что придает уникальность этого явления. На графике указан многопиковый характер этого нагона и максимальный подъем в районе Шепелево 204 см 05.12.2015, при угрозе наводнения с прогнозируемым подъемом +268 см (Рисунок 3.3.5). Длительность нагона 4 часа.

У наводнения от 26.09.2018 виде короткий, но четко выраженный пик нагона в вечернее время. В Шепелево максимальный подъем 158 см, прогнозируемый +214 см (Рисунок 3.3.9). Продолжительность штормового нагона 4 часа 46 минут. Соответственно, хорошо видно, что данные станций отлично отражают эпизоды опасных событий.

Гидрометеорологические данные в целом хорошо отображают предпосылку штормовых нагонов. В каждом из трех случаев метеоданные четко указывают на следующие факторы: сильный и продолжительный ветер, который направлен вдоль оси Финского залива (с запада, юго-запада). Также зафиксировано падение атмосферного давления, особенно в двух случаях (2013 и 2018). Все это показывает причину штормовых нагонов.

3.4 Результаты выделения штормовых нагонов на 4 станциях Финского залива

Используя исходные данные для определения количества выбросов, определяющие критичность штормовых нагонов, изучим три статистических метода: правило трех сигм, квантильный анализ (метод Тьюки) и по критерию Стьюдента.

Произведены расчеты, построены гистограммы, для определения количества выбросов по методу трех сигм. Результаты по 4 станциям (Ханко, Хельсинки, Хамина, Шепелево) за октябрь 2013 года представлены на рисунках 3.4.1, 3.4.2, 3.4.3, 3.4.5.

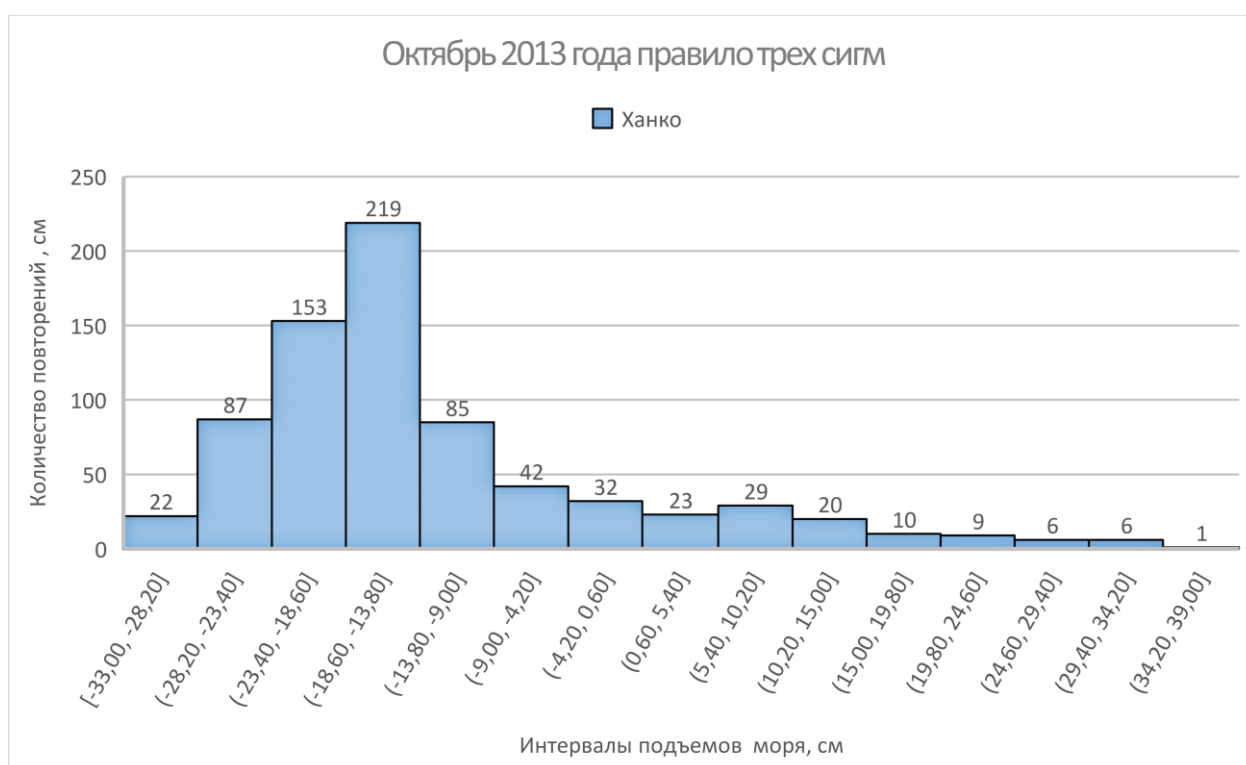


Рисунок 3.4.1 Количество повторений выбросов на станции Ханко за октябрь 2013 года



Рисунок 3.4.2 Количество повторений выбросов на станции Хельсинки октябрь 2013 года



Рисунок 3.4.3 Количество повторений выбросов на станции Хаина октябрь 2013 года

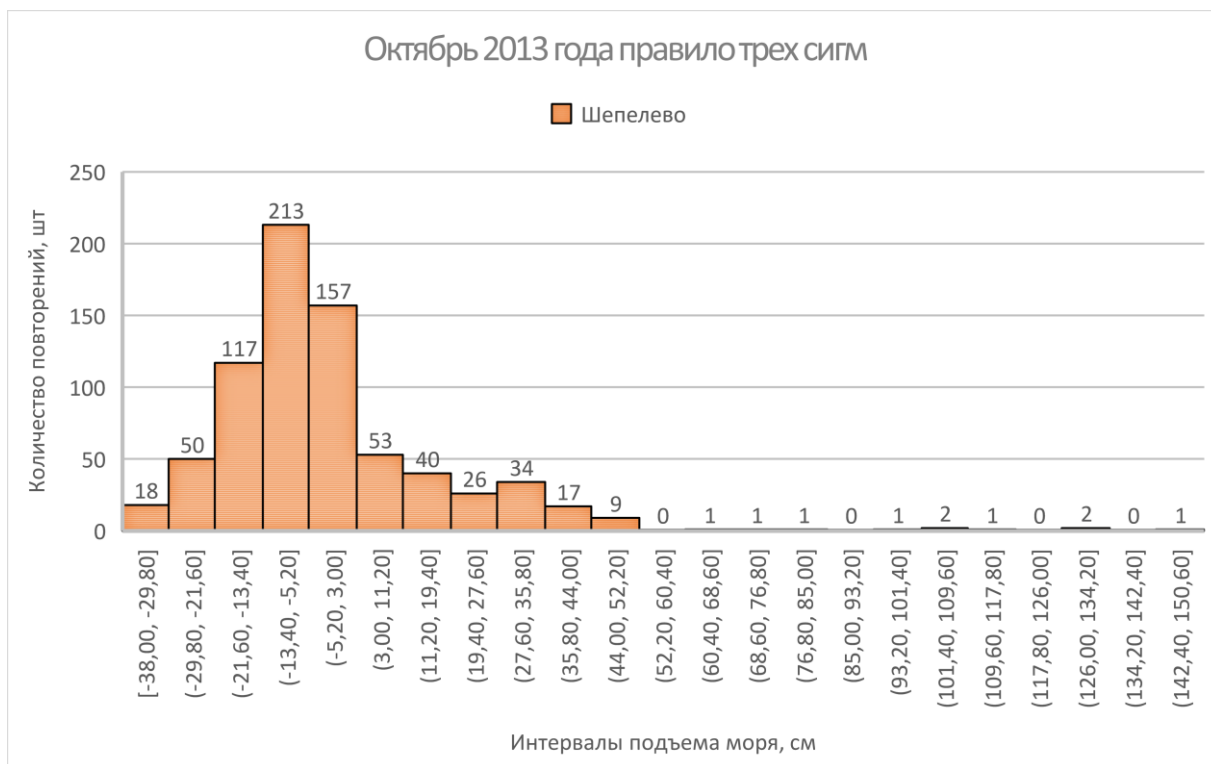


Рисунок 3.4.4 Количество повторений выбросов на станции Шепелево октябрь 2013 года



Рисунок 3.4.5 Месячное количество выбросов по правилу трех сигм по 4 станциям (Ханко, Хельсинки, Хаимна, Шепелево) за периоды, октябрь 2013 года, декабрь 2015 года, сентябрь 2018 года

По исходным данным за три периода произведены расчеты по методу трех сигм и составлена общая гистограмма о количестве выбросов в течении месяца по каждой из 4 станций за периоды октябрь 2013 года, декабрь 2015 года, сентябрь 2018 года (рисунок 3.4.5). Самое большое количество выбросов - 46 за октябрь 2013 года, самое меньшее - 24 за сентябрь 2018 года. Используя правило трех сигм, рассчитаны значения, которые выходят за пределы $\pm 3\sigma$ от среднего имеющие примерно 99.72% долей значения, они считаются редкими и указывают на необычные события, то есть выявлены аномалии (выбросы).

Кроме того, для выявления выбросов можно воспользоваться квантильным анализом (методом Тьюки). По умолчанию применяется коэффициент выброса $k=1,5$ (Рисунок 3.4.6;), и более жесткий вариант $k=3,5$ (Рисунок 3.4.7).

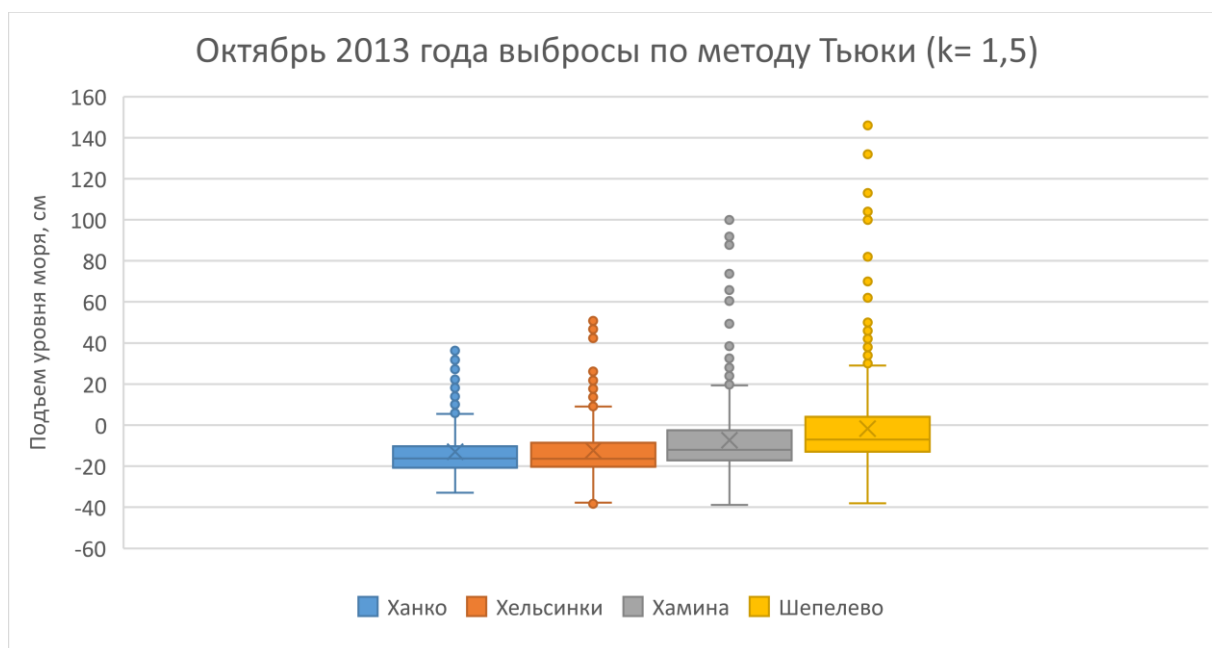


Рисунок 2.4.6 Ящик с усами $k=1,5$ за октябрь 2013 года

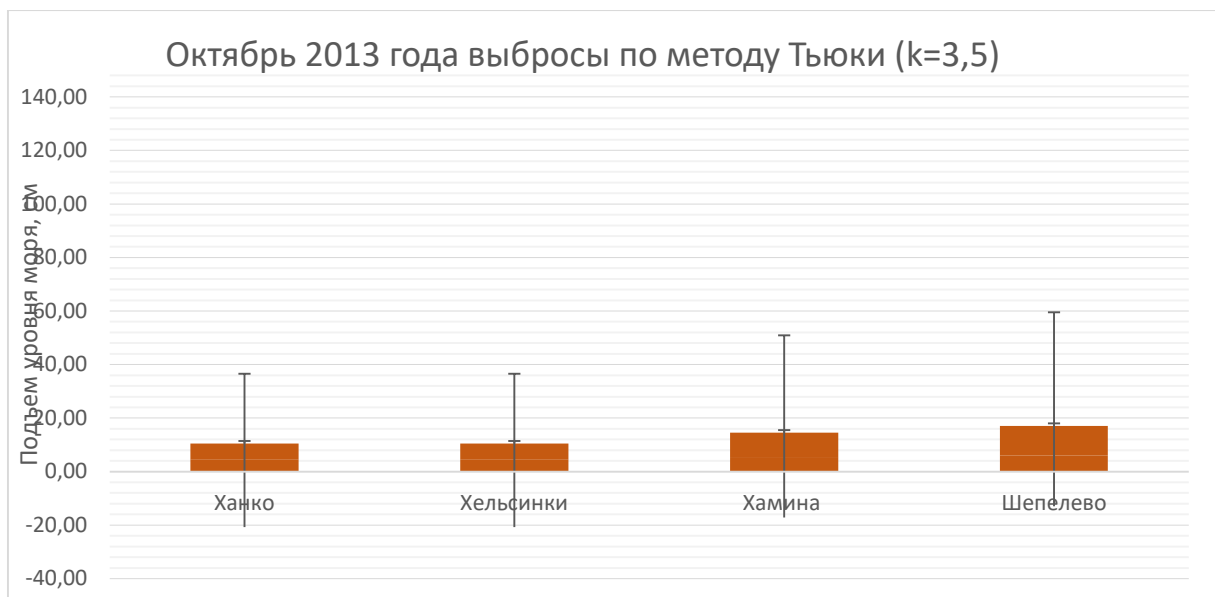


Рисунок 3.4.7 Ящик с усами k=3,5 за октябрь 2013 года

При сравнении Рисунков 3.4.6 и 3.4.7, на которых представлены «Ящики с усами» для коэффициентов $k=1,5$ и $k=3,5$ заметны следующие различия: для случайной выборки, при применении $k=1,5$, в диапазоне $\pm kQ$ содержится 99 % значений выборки. Если выбрать величину коэффициента $k = 3,5$, то в диапазоне $\pm 3Q$ – 99,9997 % значений выборки.

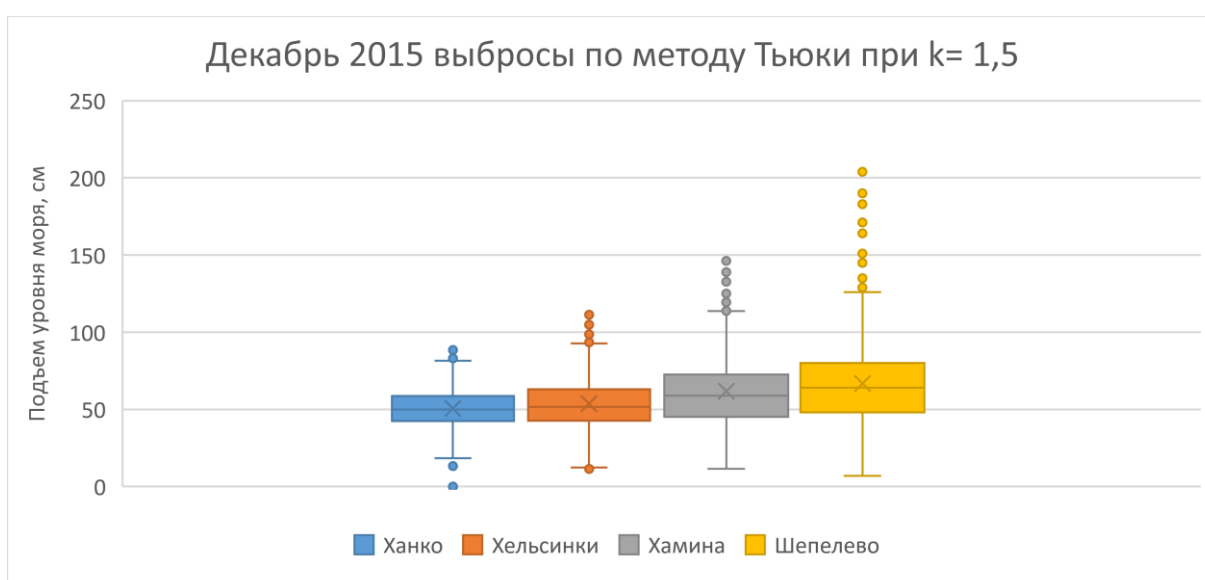


Рисунок 3.4.8 Ящик с усами k=1,5 за декабрь 2015 года

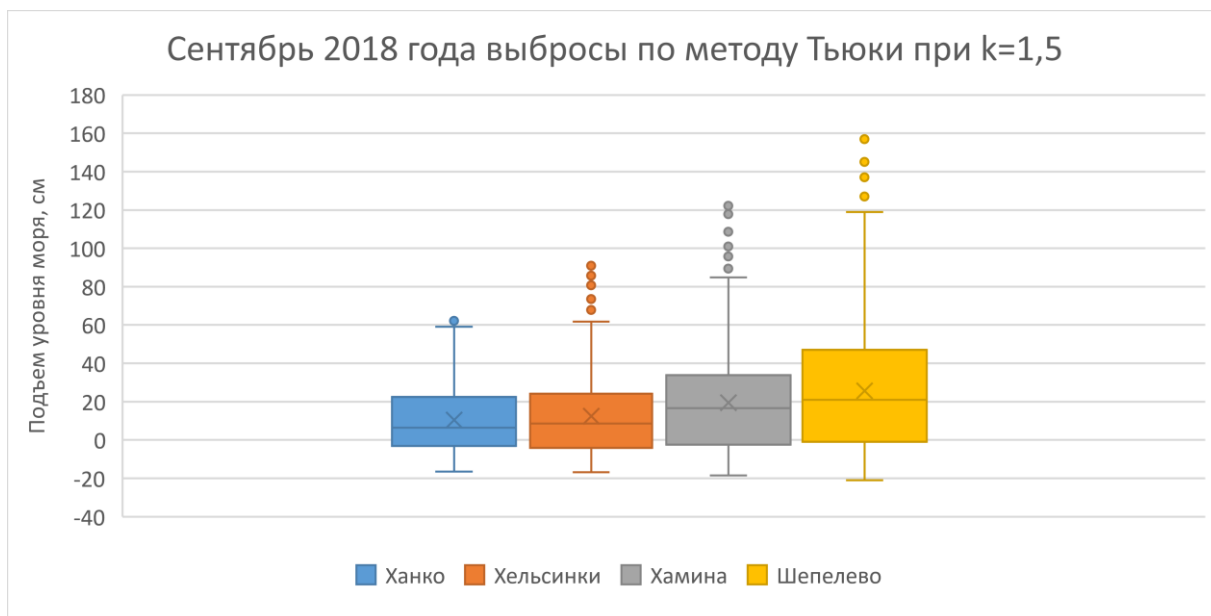


Рисунок 3.4.9 Ящик с усами $k=1,5$ за сентябрь 2018 года

Произведены расчеты по 4 станциям (Ханко, Хельсинки, Хамина, Шепелево) за периоды октябрь 2013 года, декабрь 2015 года, сентябрь 2018 года по квантильному анализу для коэффициентов выброса $k=1,5$ и $k=3,5$ и построены гистограммы (Рисунок 3.4.10; 3.4.11).

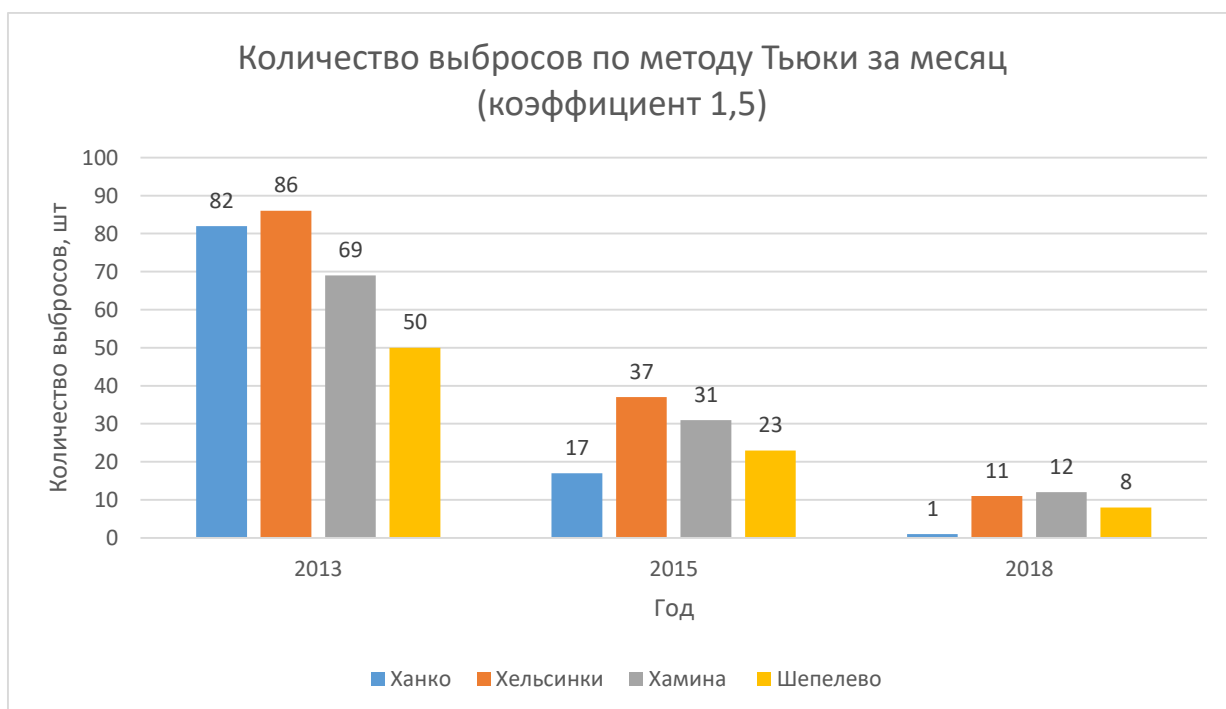


Рисунок 3.4.10 Количество выбросов в течение месяца на 4 станциях за октябрь 2013 года, декабрь 2015 года и сентябрь 2018 года при коэффициенте выбросов 1,5

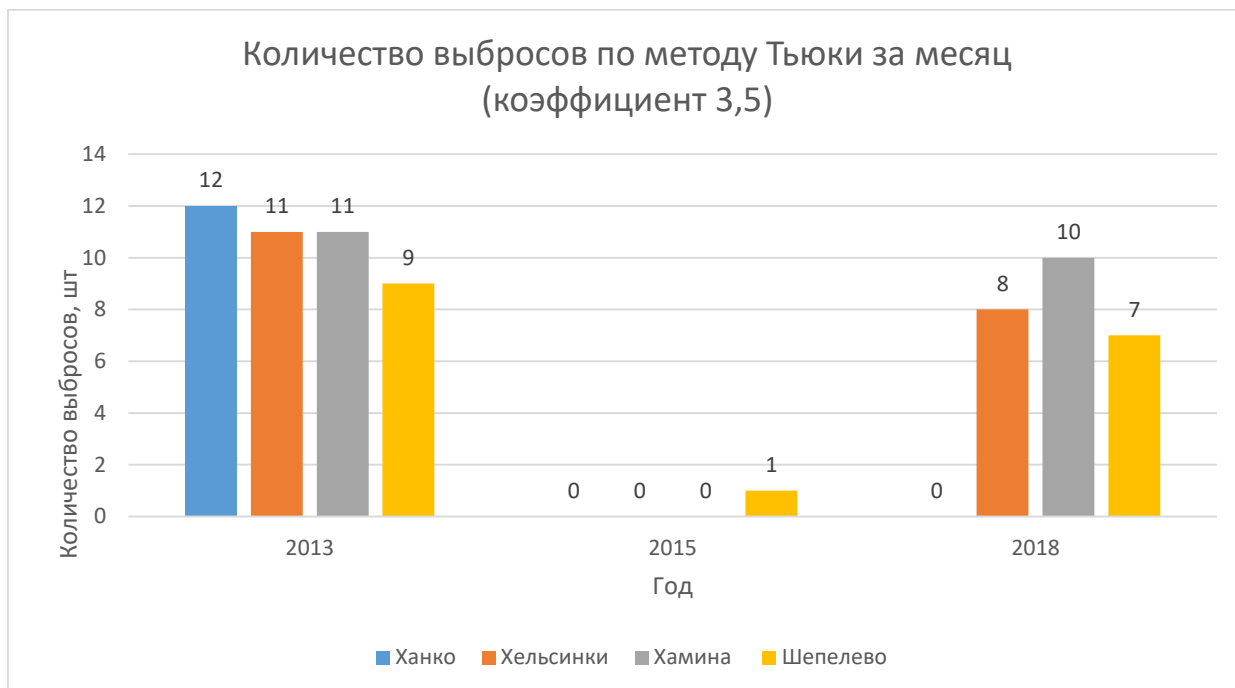


Рисунок 3.4.11 Количество выбросов в течение месяца на 4 станциях за октябрь 2013 года, декабрь 2015 года и сентябрь 2018 года при коэффициенте выбросов 3,5

При рассмотрении общих гистограмм с коэффициентом выброса $k=1,5$ и $k=3,5$, самое большое количество выбросов (287 и 43) за октябрь 2013 года при применении обоих коэффициентов. Самое малое количество выбросов (32) при $k=1,5$ в сентябре 2018 года, а при $k=3,5$ (всего 1) в декабре 2015 года.

Произведены расчеты первичных статистических характеристик подъема уровня Финского залива по станциям Ханко, Хельсинки, Хамина, Шепелево за октябрь 2013 года, декабрь 2015 года, сентябрь 2018 года используя критерий Стьюдента. Данные представлены в таблице 3.4.1.

Таблица 3.4.1

Первичные статистические характеристики подъема уровня Финского залива на станциях Ханко, Хельсинки, Хамина, Шепелево за периоды октябрь 2013 года, декабрь 2015 года, сентябрь 2018 года

Станция	Дата	Статистические характеристики					
		Длина ряда	Среднее арифметическое	Стандартное отклонение	Подъем минимальный	Подъем максимальный	Критерий Стьюдента ($\alpha=0,01$)
Хельсинки	окт.13	744	-12,39	14,45	-38,30	51,10	2,58
	дек.15	744	53,57	17,90	11,30	112,80	2,58
	сен.18	720	12,40	23,93	-16,80	90,90	2,58
Хамина	окт.13	744	-7,33	17,87	-38,90	100,00	2,58
	дек.15	744	61,68	24,01	11,50	150,10	2,58
	сен.18	720	19,51	26,66	-18,40	122,10	2,58
Ханко	окт.13	744	-13,02	12,06	-33,00	36,30	2,58
	дек.15	744	50,65	13,00	13,30	92,30	2,58
	сен.18	720	10,40	17,49	-16,40	62,20	2,58
Шепелево	окт.13	744	-1,73	19,76	-38,00	146,00	2,58
	дек.15	744	66,74	28,97	7,00	204,00	2,58
	сен.18	720	25,73	33,06	-21,00	158,00	2,58

В таблице 3.4.1 показан максимальный подъем уровня моря в Шепелево в декабре 2015 года 204 см и минимальное значение уровня воды в Хамине в октябре 2013 года - 38,9 см. Максимальное стандартное отклонение в Шепелево в декабре 2015 года 28,97, минимальное в Ханко в октябре 2013 года 12,06.

В таблице 3.4.2 приводится количество выбросов подъемов уровня воды в Финском заливе полученных с помощью трех различных критериев: три сигма, критерий Стьюдента, кантильный анализ с применением коэффициентов 1,5 и 3,5.

Таблица 3.4.2

Число выбросов в ежемесячном ходе подъема уровня Финского залива на станциях Ханко, Хельсинки, Хамина, Шепелево за периоды октябрь 2013 года, декабрь 2015 года, сентябрь 2018 года

Станция	Дата	Критерий			
		Квантильный анализ		Три сигма	Критерий Стьюдента
		k=1,5	k=3,5		
Хельсинки	Окт.13	86	11	11	124
	Дек.15	37	0	4	54
	Сен.18	11	18	8	30
Хамина	Окт.13	69	11	11	99
	Дек.15	31	0	11	63
	Сен.18	12	10	9	25
Ханко	Окт.13	82	12	14	19
	Дек.15	17	0	4	19
	Сен.18	1	0	0	20
Шепелево	Окт.13	50	9	10	94
	Дек.15	23	1	7	34
	Сен.18	8	7	7	15

В работе применены три статистических метода для идентификации выбросов (аномально высоких уровней воды) в рядах ежечасных мареографных измерений на четырёх станциях Финского залива (Ханко, Хельсинки, Хамина, Шепелево) за три периода штормовых нагонов (октябрь 2013, декабрь 2015, сентябрь 2018).

Правило трёх сигм – выбросом считается значение, выходящее за пределы $\pm 3\sigma$. Этот метод даёт умеренное число выбросов (от 0 до 14 за месяц в зависимости от станции и периода). Он жёсткий, но не слишком – ориентирован на нормальное распределение.

Квантильный анализ (метод Тьюки, «ящик с усами») – использован с двумя коэффициентами: $k=1,5$ – классический «мягкий» вариант, при котором в диапазон попадает около 99 % значений (при нормальном распределении). Этот метод даёт наибольшее число выбросов (до 86 за месяц для октября 2013

года). Применение коэффициента $k=3,5$ – это жёсткий вариант, охватывающий 99,9997 % значений, соответственно, выбросов выявляется значительно меньше (от 1 до 18 за месяц). Этот результат сопоставим с правилом трёх сигм, что показано в таблице 3.4.2.

Критерий Стьюдента – применялся для проверки значимости отклонения каждого наблюдения от среднего. Этот метод оказался самым чувствительным (мягким): количество выбросов, полученных по нему, существенно превышает результаты других методов (например, на станции Шепелево в октябре 2013 г. выявлено 94 выброса против 10–50 по другим методам). Причина – критерий Стьюдента сам использует среднее и стандартное отклонение, которые сильно искажаются присутствием выбросов, что приводит к занижению критических границ и, как следствие, к ложному обнаружению большего числа «аномалий». Таблица 3.4.2 демонстрирует с самое большое количество выбросов показывает метод по критерию Стьюдента.

Результаты методов отличаются от мягкого к жесткому следующим образом: критерий Стьюдента → квантильный анализ $k=1,5$ → правило трех сигм → квантильный анализ $k=3,5$.

Причины различий:

1. Критерий Стьюдента неустойчив к выбросам – его параметры вычисляются по тем же данным, поэтому даже единичные экстремальные значения смещают среднее и увеличивают стандартное отклонение, что делает границы менее строгими.
2. Квантильный анализ основан на порядковых статистиках (медиана и квартили), которые устойчивы к выбросам, поэтому его результаты более надёжны. При $k=1,5$ границы шире – метод «мягче»; при $k=3,5$ – уже – «жёстче».
3. Правило трёх сигм предполагает нормальность распределения, что не всегда выполняется для уровней моря, но в данном случае дало результаты, близкие к квантильному методу с $k=3,5$.

Для решения задач по определению выбросов экстремальных нагонов предпочтительно использовать квантильный метод с коэффициентом $k=3,5$ или правило трех сигм. Данные методы не зависят от искажения среднего (квантильный метод), дают сопоставимые и умеренные количества выбросов и позволяют выделить действительно редкие и опасные события.

Критерий Стьюдента не рекомендуется использовать для автоматического подсчета выбросов, потому что он дает много ложных срабатываний и сильно зависит от наличия выбросов в выборке.

Статистический анализ выбросов показал, что наиболее объективными методами выделения экстремальных уровней являются квантильный метод ($k=3,5$) и правило трёх сигм. Эти методы позволяют чётко идентифицировать аномальные подъёмы, связанные со штормами, и отсеять случайные ошибки.

Критерий Стьюдента крайне чувствителен и неустойчив к выбросам при расчете среднего и стандартного отклонения, он завышает число выбросов и не рекомендуется для практического использования.

В таблице 3.4.3 представлена информация по продолжительности штормовых нагонов и время пика подъема уровня моря на станциях Ханко, Хельсинки, Хамина, Шепелево за периоды октябрь 2013 года, декабрь 2015 года, сентябрь 2018 года. По представленным расчетам заметны сдвиги начала штормовых нагонов: 29.10.2013 в Ханко начало 1 час ночи, в Шепелево в 5 часов, в Санкт-Петербурге закрыли затворы КЗС в 9 часов 13 минут; 05.12.2015 в Ханко и Хельсинки выбросов не было, в Хамине и Шепелево начало в 00 часов, в Санкт-Петербурге в 5 часов. 26.09.2018 в Ханко выбросов нет. В Хельсинки, Шепелево начало выбросов в 14 часов, а в Санкт-Петербурге закрыли КЗС заблаговременно в 11 часов 24 минуты. Также видны смещения окончания нагонов, в Санкт-Петербурге конец опасных событий наступал позже. Пики подъемов уровня моря тоже идут со смещением, в Санкт-Петербурге они наступают позднее, чем на других станциях.

Таблица 3.4.3

Продолжительность штормовых нагонов Финского залива на станциях Ханко, Хельсинки, Хамина, Шепелево за периоды октябрь 2013 года, декабрь 2015 года, сентябрь 2018 года

Дата	Станция	Начало штормового нагона, дата/время	Конец штормового нагона, дата/время	Время пика подъема, дата/час	Длительность, час
29 октября 2013 года	Ханко	29.10.2013 1:00	29.10.2013 15:00	29.10.2013 1:00	16
	Хельсинки	29.10.2013 6:00	29.10.2013 16:00	29.10.2013 12:00	10
	Хамина	29.10.2013 5:00	29.10.2013 15:00	29.10.2013 10:00	10
	Шепелево	29.10.2023 5:00	29.10.2023 15:00	29.10.2013 11:00	10
	Санкт-Петербург	29.10.2013 9:13	29.10.2013 18:24	29.10.2013 17:00	10
5 декабря 2015	Ханко	—	—	—	—
	Хельсинки	—	—	—	—
	Хамина	05.12.2015 00:00	05.12.2015 4:00	05.12.2015 01:00	4
	Шепелево	05.12.2015 00:00	05.12.2015 5:00	05.12.2015 2:00	5
	Санкт-Петербург	05.12.2015 5:00	05.12.2015 9:00	05.12.015 5:00	4
26 сентября 2018 года	Ханко	—	—	—	—
	Хельсинки	26.09.2018 14:00	26.09.2018 21:00	26.09.2018 19:00	7
	Хамина	26.09.2018 13:00	26.09.2018 21:00	26.09.2018 18:00	8
	Шепелево	26.09.2018 14:00	26.09.2018 20:00	26.09.2018 18:00	6
	Санкт-Петербург	26.09.2018 11:24	27.09.2018 2:00	26.09.2018 22:00	14, 5

В работе проанализированы графики штормовых нагонов Финского залива на станциях Ханко, Хельсинки, Хамина, Шепелево за периоды октябрь 2013 года (Рисунок 3.4.12), декабрь 2015 года (Рисунок 3.4.13), сентябрь 2018 года (Рисунок 3.4.14).

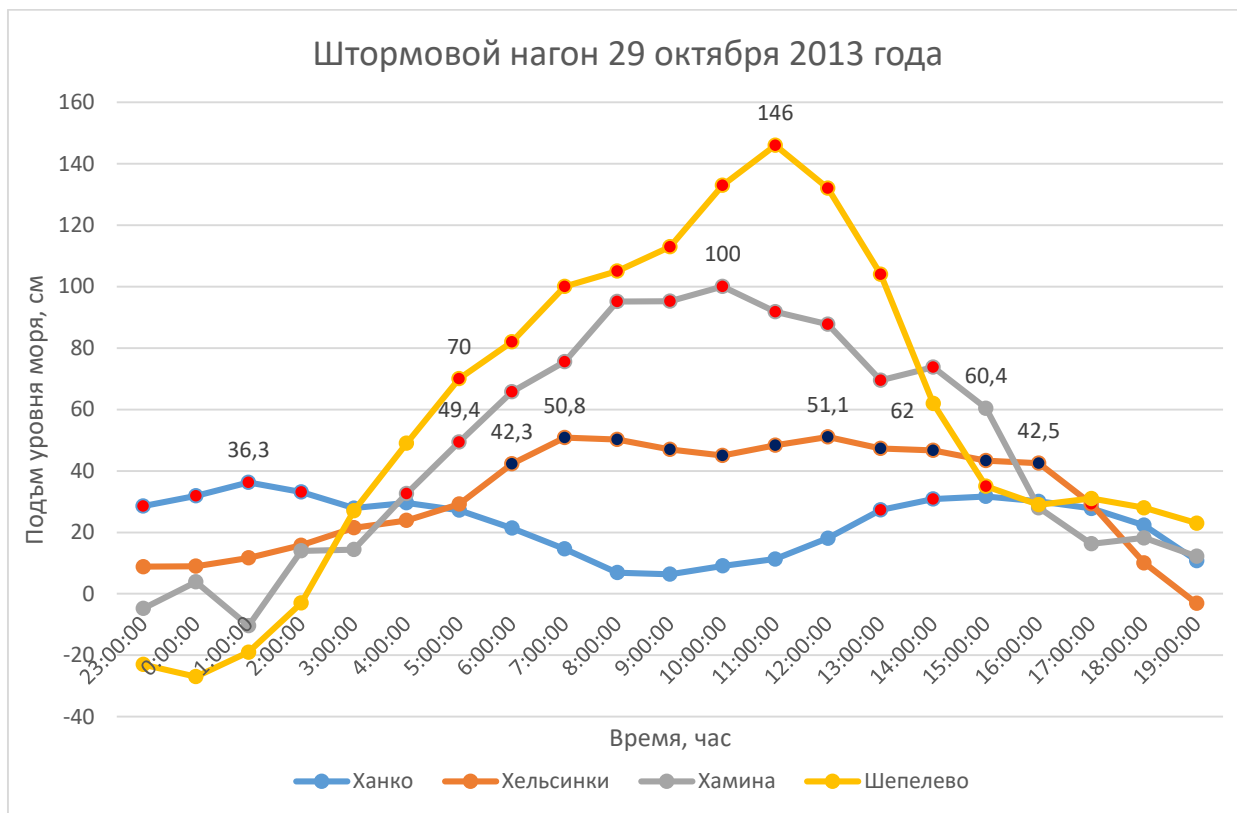


Рисунок 3.4.12 Выбросы штормового нагона 29 октября 2013 года на станциях Ханко, Хельсинки, Хамина, Шепелево

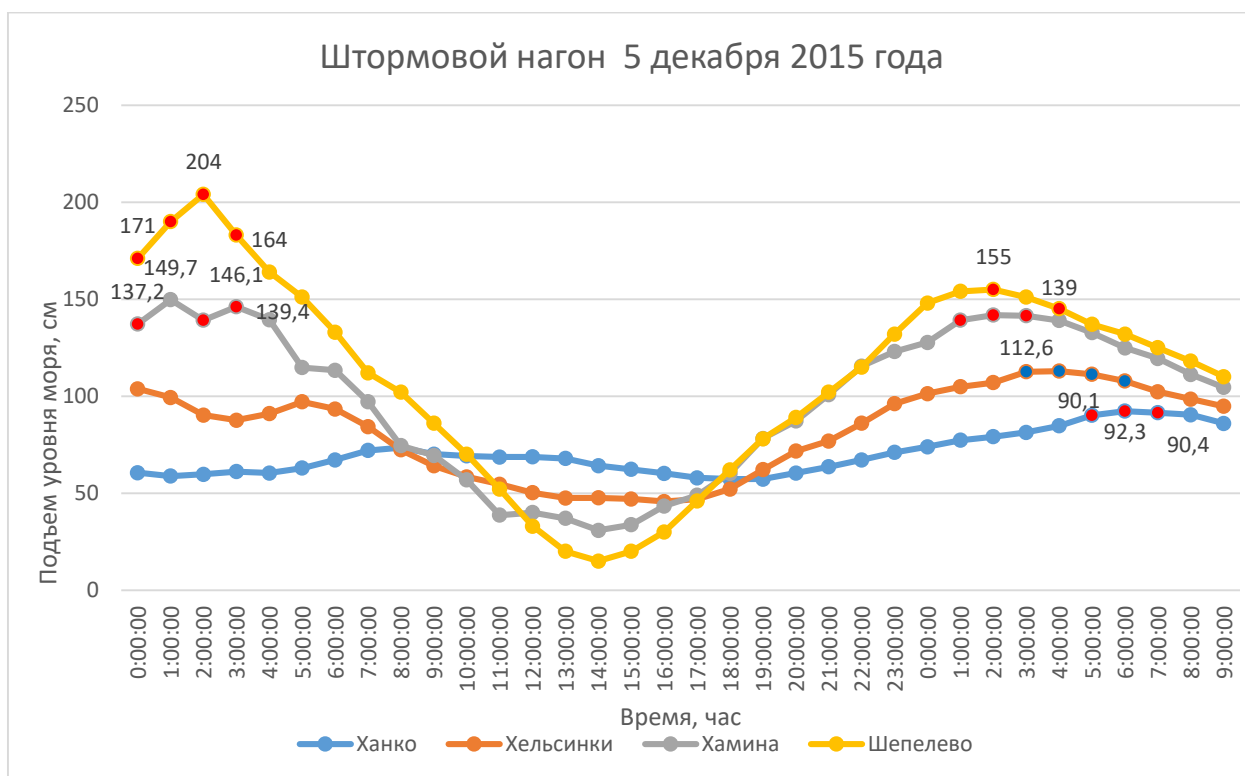


Рисунок 3.4.13 Выбросы штормового нагона 5 декабря 2015 года на станциях Ханко, Хельсинки, Хамина, Шепелево



Рисунок 3.4.14 Выбросы штормового нагона 26 декабря 2018 года на станциях Ханко, Хельсинки, Хамина, Шепелево

Данные изображения подтверждают совпадение дат штормовых нагонов, но есть небольшие отличия в моменте наступления активного подъема уровня моря, вдобавок заметно смещение в установлении высшей точки подъема уровня воды. Длинная волна идет с запада на восток, соответственно, чем восточнее располагается станция, тем позднее начало штормового нагона и позже поднимается пик. Санкт-Петербург по расположению самый восточный, и экстремальные подъемы происходят рядом с ним позднее и заканчиваются позже чем на других рассматриваемых станциях. Важно отметить, что для предотвращения наводнений в Санкт-Петербурге группой принятия решений дается команда о закрытии затворов КЗС заранее и открытие через некоторое время после спада воды.

Заключение

Согласно поставленной цели работы выполнен анализ современной литературы, освещающей физико-географическое положение Финского залива, входящего в состав Балтийского моря, понимание природы штормовых нагонов и географическое распределение районов, где они чаще всего повторяются. Рассмотрены механизмы формирования этого явления, изучены методы анализа и прогноза. Изучены статистические характеристики и также информация метеорологических условиях в районе Финского залива в последние десятилетия XX и первые десятилетия XXI века.

Не существует универсальной методики оценки штормовых нагонов для различных прибрежных акваторий. Большинство существующих методик оценки штормовых нагонов, принятых для использования в различных гидродинамических моделях, учитывают региональные особенности акватории и климатические особенности. Они различаются как деталями, связанными с количеством учитываемых факторов: такими, как сила ветра, скорость перемещения циклона, направление его перемещения, глубина циклона и т. д., - так региональными особенностями, связанными с морфометрическими особенностями территорий и существующими береговыми и прибрежными сооружениями.

В ходе исследования были проанализированы три крупных штормовых нагона в Финском заливе (2013, 2015, 2018 гг.), которые были остановлены комплексом защитных сооружений Санкт-Петербурга. По данным мареографных станций и метеорологических наблюдений установлено, что:

Максимальные подъёмы уровня воды на всех станциях совпадают по времени с прогнозируемыми пиками наводнений (уровни у Горного института достигали 214 - 268 см).

Экстремальные события сопровождаются резким падением атмосферного давления (до 980 гПа и ниже), усилением скорости ветра (до 15 - 20 м/с) и преобладанием ветров юго-западного и западного направлений, что подтверждает типичный механизм нагонных явлений в восточной части залива.

Длительность наводнения 29 октября 1913 года (ураган «Святой Иуда») составила около 10 часов, в 9 часов 13 минут были закрыты затворы КЗС, а уже 18 часов 24 минут дамба была открыта.

Наводнение 5 декабря 2015 года является одним из трех пиков шторма «Десмонд». Максимальный подъем наступил в 5 часов утра, в 9 часов вода спала. В целом это уникальное наводнение, состоящее из трех пиков, продолжалось рекордное время - 41 час.

Затворы дамбы были закрыты в 11 часов 24 минуты 26.09.2026, открыты 27.06.2018 в 2 часа ночи. Пик подъема воды был 26.09.2018 в 22 часа.

Даты штормовых нагонов, максимального выброса, спада воды на изученных станциях (Ханко, Хельсинки, Хамина, Шепелево) и Санкт-Петербурга оказываются одинаковые, есть небольшие различия в часах, так как Санкт-Петербург является самой восточной точкой Финского залива.

Учащение таких явлений (три сильных нагона за пять лет) может указывать на возрастание циклонической активности в регионе, что согласуется с современными климатическими трендами.

Статистический анализ выбросов показал, что наиболее достоверными методами отбора экстремальных показателей являются квантильный метод ($k=3,5$) и правило трёх сигм. Эти методы позволяют чётко определить аномальные подъёмы, которые вызваны со штормами, и можно быстро отсеять случайные отклонения. Критерий Стьюдента, напротив, выявляет слишком завышенное число выбросов и не рекомендуется для практического прогнозирования.

Таким образом, комплексный подход к выявлению и анализу выбросов в данных о поднятии уровня моря в Финском заливе позволяет получить более полное и точное представление о штормовых нагонах. Это очень важно для обеспечения безопасности.

Интенсивность штормовых нагонов в связи с изменением климата и глобальным потеплением сильно не увеличилась. Изменения носят сезонный характер и определяют положительные тренды его изменчивости.

Штормовые нагоны относятся к группе опасных стихийных бедствий, которые приносят огромный материальный ущерб, оцениваемый в сотни миллиардов долларов и человеческие потери, соответственно, метеорологам, гидрологам и океанологам очень важно заниматься изучением возникновения и распространения этого явления, что даст возможность оперативно представить прогнозы, и сохраняется необходимость в дальнейшем развитии методов прогноза, особенно с учетом ожидаемого повышения уровня моря и увеличения частоты штормов. Эффективные прогнозы помогут спасти тысячи жизней и уменьшить ущерб.

Список литературы

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.
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 развития /МГО 2020 имени Л. Н. Карлина. труды IV Всероссийской конференции. Санкт-Петербург, 2020. С. 5-9. 4. 6. 8.
3. Атлас льдов Финского залива. (2000). – СПб: Издание ГУНиО МО РФ, 2000. – 160 с.
4. Белоненко, Т.В., Колдунов, В.В. К оценке трендов и штормовых нагонов в колебаниях уровня северной части Тихого океана // Общество, среда, развитие. № 4 (17). 2010. С. 232-236.
5. Белоненко, Т.В., Шевченко, Г.В. Методика оценки характеристик штормовых нагонов в различных районах океана // Мореходство и морские науки. Избранные доклады Третьей Сахалинской региональной морской научно-технической конференции. Южно-Сахалинск. 2011. С. 142-155.
6. Белоненко, Т.В., Колдунов, В.В. Об изменчивости уровня океана и повторяемости штормовых нагонов по данным мареографных постов северо-западной части Тихого океана // Метеорология и гидрология. № 4. 2012. С. 45-53.
7. Боуден, К.Ф. Физическая океанография прибрежных вод. Мир, Москва, 1988. – 324 с.
8. Гидрометеорологические риски (2008). [Текст] / Под ред. Л.Н. Карлина.– СПб: Изд. РГГМУ, 2008.– 282 с.

9. Гордеева, С.М., Малинин, В.Н., 2012. О типизации траекторий циклонов, приводящих к невским наводнениям. Общество. Среда. Развитие 2 (23), 187– 193.
10. Гордеева, С.М., Малинин, В.Н. Изменчивость морского уровня Финского залива. –СПб.: РГГМУ, 2014. –179с.
11. Драбкин, В.В. (1997). Ледовый режим [Текст] / В.В. Драбкин // Проблемы исследования и математического моделирования экосистемы Балтийского моря. Вып. 5. Экосистемные модели. Оценка современного состояния Финского залива. Ч.2.– СПб.: Гидрометеиздат, 1997.– С.193– 225.
12. Захарчук, Е.А., Тихонова, Н.А., 2011. О пространственно-временной структуре и механизмах формирования невских наводнений. Метеорология и гидрология 8, 54–64.
13. Знаменский, В.А. (2004). Невские наводнения: Причины и особенности. Способы защиты. Экология защиты [Текст] / В.А. Знаменский. – СПб., 2004– 96 с.
14. Ильин, В.И. ШТОРМОВЫЕ НАГОНЫ В МИРОВОМ ОКЕАНЕ, Морские исследования и рациональное природопользование: Материалы молодежной научной конференции, г. Севастополь, 19-23 сентября 2018 г. [Электронный ресурс]. – Москва: МГУ, 2018. – Режим доступа: http://www.oceanmsu.ru/faculty/mat_conf_2018.pdf , свободный.
15. Исанин, Н., 1986. Морской энциклопедический справочник: в двух томах. Том 2. Судостроение, Ленинград.
16. 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.
17. Макринова, О.В., 1954. Природа ленинградских наводнений. Труды ГГИ 23, 5–36.

18. Малинин, В.Н., 2008. Статистические методы анализа гидрометеорологической информации. РГГМУ, Санкт-Петербург.
19. Малинин, В.Н., Шевчук О.И. О возможных изменениях уровня Мирового океана в ближайшие десятилетия // Общество. Среда. Развитие. – 2009, № 2. – С. 172–180
20. Михайлов, А.Е. (1997). Общая циркуляция вод [Текст] / А.Е. Михайлов, Е.С. Чернышева // Проблемы исследования и математического моделирования экосистемы Балтийского моря. Вып. 5. Экосистемные модели. Оценка современного состояния Финского залива. Ч.2. / Под ред. И.Н. Давидана, О.П. Савчука.– СПб.: Гидрометеиздат, 1997. – С.245 – 261.
21. Михайлов, А.Е. (1997а) Уровень [Текст] /А.Е. Михайлов, Е.С. Чернышева // Проблемы исследования и математического моделирования экосистемы Балтийского моря. Вып. 5. Экосистемные модели. Оценка современного состояния Финского залива. Ч.2 / Под ред. И.Н. Давидана, О.П. Савчука.– СПб.: Гидрометеиздат, 1997.–С.235 – 245.
22. Михайлов, А.Е. (1997б) Температура и соленость воды [Текст]/ А.Е. Михайлова //Проблемы исследования и математического моделирования экосистемы Балтийского моря. Вып. 5. Экосистемные модели. Оценка современного состояния Финского залива.Ч.2. / Под ред. И.Н. Давидана, О.П. Савчука.– СПб.: Гидрометеиздат, 1997. – С.225 – 235.
23. Нежиховский, Р.А. (1981). Река Нева и Невская губа [Текст] / Р.А. Нежиховский.– Л.: Гидрометеиздат, 1981.– 110 с.
24. Некрасов, А.В. (1999) Колебания уровня и волновые процессы [Текст] / А.В. Некрасов // Финский залив в условиях антропогенного воздействия / Под ред. В.А. Румянцева, В.Г. Драбковой.– СПб.: РАН ИНОЗ, 1999.–С.29 – 34.
25. Померанец, К.С. (1993). Наводнения в устье реки Невы [Текст]/ К.С. Померанец. – Природа.– 1993.– №10.– С. 9 – 19.
26. Провоторов, П. П. (1999). Термохалинная структура вод [Текст]/ П.П. Провоторов //Финский залив в условиях антропогенного воздействия/ Под ред. В.А. Румянцева, В.Г. Драбковой.– СПб.: РАН ИНОЗ, 1999.– С. 35 –46.

27. Проект «Моря СССР» (1991). Гидрометеорология и гидрохимия морей. В 10 томах. Т. III. Балтийское море. Вып. I. Гидрометеорологические условия [Текст] / Под ред. Ф.С. Терзиева, В.А. Рожкова, А.И. Смирновой. – СПб.: Гидрометеоиздат, 1991.– 240 с.
28. Сводный научно-технический отчет по теме 176 «Метод прогноза Ленинградских наводнений, 1966. Ленинград.
29. Смирнова, А.И. (1997). Климатическая характеристика [Текст] / А.И. Смирнова // Проблемы исследования и математического моделирования экосистемы Балтийского моря. Вып.5. Экосистемные модели. Оценка современного состояния Финского залива Ч.2. / Под ред. И.Н. Давидана, О.П. Савчука. Ч.2. –СПб.: Гидрометеоиздат, 1997. – С. 175 – 188.
30. Сухачев, В.Н., Штормовые нагоны в Финском заливе Балтийского моря, Санкт-Петербург, 2023. – 230с.
31. Assessment, 2016. The Gulf of Finland assessment /Reports of the Finnish environment institute. Mika Raateoja and Outi Setälä (eds) 27|2016.