



МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение

высшего образования

«РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Кафедра метеорологических прогнозов

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА
(магистерская диссертация)

На тему: «Анализ циркуляционных условий формирования сильных наводнений
в Санкт-Петербурге»

Исполнитель Смирнов Денис Дмитриевич

(фамилия, имя, отчество)

Руководитель кандидат географических наук, доцент

(ученая степень, ученое звание)

Ефимова Юлия Викторовна

(фамилия, имя, отчество)

«К защите допускаю»
заведующий кафедрой

(подпись)

кандидат физико-математических наук, доцент

(ученая степень, ученое звание)

Анискина Ольга Георгиевна

(фамилия, имя, отчество)

«26» мая 2023 г.

Санкт-Петербург

2023

СОДЕРЖАНИЕ

СОКРАЩЕНИЯ.....	3
ВВЕДЕНИЕ.....	4
1 Основные факторы, формирующие Невские наводнения.....	7
1.1 Типы наводнений.....	7
1.1.1 Половодье и паводок.....	8
1.1.2 Нагонные наводнения	10
1.1.3 Сейшевые колебания.....	12
1.2 Структура формирования Невских наводнений	13
1.3 Комплекс защитных сооружений	16
2 Характеристика региона исследования	22
2.1 Географическое положение	22
2.2 Климатическая характеристика.....	24
2.3 Наблюдения за уровнем воды на реке Нева	31
2.4 Особенности циркуляции умеренных широт	34
3 Анализ циркуляционных условий формирования сильных наводнений в Санкт-Петербурге.....	42
3.1 Постановка цели и задач	42
3.2 Анализ повторяемости Невских наводнений	43
3.2.1 Анализ повторяемости особо опасных наводнений по интенсивности ..	44
3.2.2 Анализ повторяемости опасных наводнений по интенсивности	49
3.3 Анализ траекторий движения барических образований и синоптических ситуаций при Невских наводнениях	55
3.3.1 Анализ траекторий движения барических образований и синоптических ситуаций при особо опасных наводнениях	55
3.3.2 Анализ синоптических ситуаций при опасных наводнениях.....	63
3.4 Подробный анализ синоптической ситуации для двух периодов – 2005 и 2015 гг.....	71
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	84
СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ	86

СОКРАЩЕНИЯ

Га – гектар

км – километр

м – метр

см – сантиметр

мм – миллиметр

ч – час

м/с – метр в секунду

км/ч – километр в час

БС – Балтийская система высот

КЗС – комплекс защитных сооружений

АИС ГМВО – автоматизированная информационная система государственного мониторинга водных объектов

СЗ УГМС – Северо-Западное управление по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды

ВМО – Всемирная метеорологическая организация

Балтика – Балтийское море и его побережье

Атлантика – Атлантический океан

с.ш. – северная широта

в.д. – восточная долгота

°С – градус Цельсия

UTC – Всемирное координированное время

ВВЕДЕНИЕ

Прибрежные зоны Финского залива практически из года в год подвержены наводнениям. Опасные подъемы уровня для проживающих, действующих предприятий и для всей инфраструктуры в целом расположенных на данной территории являются одной из самых важных и актуальных проблем на протяжении всего времени после заселения данной местности.

Вот уже на протяжении нескольких столетий Невские наводнения являются самой важной проблемой, затрагивающей все сферы научной деятельности российской гидрометеорологии. Ведь прогнозирование, а также последующие выявление причин возникновения тех или иных атмосферных явлений, можно сказать, жизненно необходимо в нынешних реалиях современного мира. Из этого следует актуальность моей работы.

Главной целью магистерской диссертации является анализ условий формирования Невских наводнений в Санкт-Петербурге за последние 100 лет вызванных климатическими изменениями. Также более детально следует рассмотреть подтопления, которые произошли после 2011 года, так как данный анализ имеет сразу две цели: охарактеризовать изменения уровня воды у поста Горный институт, а также оценить работу Комплекса защитных сооружений, потому что он был введен в эксплуатацию именно в 2011 году.

Для достижения поставленной цели необходимо было решить следующие задачи:

1. Проанализировать повторяемость Невских наводнений по интенсивности за 100 лет;
2. Проанализировать особенности подъема уровня воды в реке Нева при закрытых и открытых створах КЗС после 2011 г.;
3. Исследовать циркуляционные условия формирования наводнений в Санкт-Петербурге за период с 1961 года по 2020 год;
4. Оценить возможные изменения синоптических ситуаций, характерных подъему уровня реки Нева выше 200 сантиметров в разные годы;

В качестве региона исследования была выбрана река Нева, в водосборный бассейн которой входят Ладожское озеро, соединяющееся с Невской губой Финского залива Балтийского моря, которое в свою очередь находится в Северо-Западном регионе РФ, городе Санкт-Петербург и Ленинградской области, поскольку город на Неве на протяжении всего времени своего существования был подвержен затоплениям из-за множества климатических, синоптических и гидрологических факторов.

Выпускная квалификационная работа состоит из введения, трех глав и заключения.

В первой главе рассмотрены все факторы формирующие Невские наводнения, а именно синоптические, гидрологические и климатические. Также рассматриваются типы наводнений: половодье и паводок, нагонная волна и сейшевые колебания. На основе приведенной статьи анализируется структура и механизм формирования наводнений на реке Нева. Дополнительно приведена информация о комплексе сооружений, который защищает Санкт-Петербург от наводнений, приходящих со стороны Финского залива и Балтийского моря.

Во второй главе приводится характеристика региона исследования: географическое положение и климатическая характеристика по метеостанции Санкт-Петербург за многолетний период с 1966 по 2021 гг. Дополнительно приводятся наблюдения за уровнем на реке Нева по трем гидрологическим постам: Горный институт, Литейный мост и Обуховский завод, и особенности циркуляции региона исследования.

В третьей главе анализируется повторяемость Невских наводнений, которые были разделены на три группы: катастрофические, особо опасные и опасные за период с 1921 по 2020 гг. Следующим этапом анализируются траектории барических образований при особо опасных и опасных наводнений за два базовых периода: с 1961 по 1990 гг и с 1991 по 2020 гг. Дополнительно приводится подробный анализ наводнений для двух периодов: 2015 год, когда были закрыты створы КЗС и 2005 год, когда КЗС еще не был введен в эксплуатацию.

В заключении приведены результаты и выводы по исследованию.

Методической основой работы послужили литературные источники, Интернет-ресурсы, справочные материалы и методические указания, ссылки на которые приводятся в тексте.

1 Основные факторы, формирующие Невские наводнения

Наводнение – значительный подъем уровня воды в реке, озере, водохранилище, с последующим затоплением определенной территории земли и нанесением материального ущерба, урона здоровью населения, а иногда данное явление приводит к гибели людей. Очень важно понимать, что наводнением называют только то затопление, которое несет с собой ущерб чему-либо, если же таковое ущербом не сопровождается, то такое явление называют разливом реки, озера, водохранилища [1].

Регионом исследования был выбран город Санкт-Петербург, так как город на Неве на протяжении всего времени своего существования был подвержен затоплениям из-за множества климатических, синоптических и гидрологических факторов.

Невские наводнения – это частые события, от которых Санкт-Петербург страдал и продолжает страдать практически каждый год. За все время своего существования город пережил 323 наводнения, три из которых, наблюдавшихся в 1777, 1824 и 1924 годах, считаются катастрофическими. В то же время оценки масштаба наводнения зависят от синоптической ситуации, климатических, геодинамических и гидрологических факторов [2].

1.1 Типы наводнений

Различают несколько типов наводнений по интенсивности: обычное – уровень воды повышается в среднем на 160 сантиметров выше ординара у поста Горный институт, в Санкт-Петербурге отметка ординара водомерного поста равна -5 метров (в Балтийской системе высот), характеризуется небольшим ущербом, так как подтоплению подвергается сравнительно малая территория города, а именно прибрежные зоны, где расстояние от поверхности

воды до берега насчитывает несколько сантиметров; опасное – подъем уровня воды колеблется в среднем от 160 до 199 сантиметров (рисунок 1.1-а), наносит вред инфраструктуре города и его жителям, сильному затоплению подвергаются территории, расположенные в низких местах; особо опасное – подъем уровня воды от 200 до 299 сантиметров (рисунок 1.1-б), данный тип наводнения может привести к эвакуации жителей, проживающих на территориях, которые могут быть подвержены сильному наводнению с угрозой для жизни и инфраструктуры; катастрофическое – уровень воды поднимается свыше 3 метров (рисунок 1.1-в), при таком типе наводнения в городе вводится чрезвычайное положение и практически все жители могут быть эвакуированы до окончания стихийного бедствия [1,3].

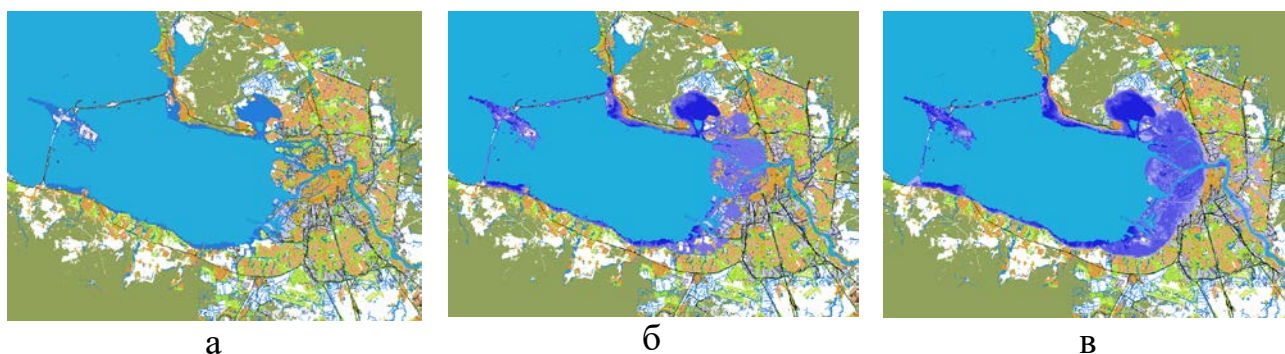


Рисунок 1.1 – Категории наводнений

- а – Опасное (Подъем уровня воды от 160 до 199 см)
- б – Особо опасное (Подъем уровня воды от 200 до 299 см)
- в – Катастрофическое (Подъем уровня воды свыше 3 м) [3]

Различают несколько типов наводнений по виду: половодье и паводок, затор и зажор, ветровой нагон и сейши.

1.1.1 Половодье и паводок

Половодье – подъем уровня воды в реках с повторяющейся периодичностью. В основном происходит из-за таяния снега и дождевых осадков. Как правило затоплению подвергаются низкие равнинные участки местности. Особенно опасно половодье, когда инфильтрационные свойства

почвы ухудшились из-за перенасыщения влагой осенью, а также глубокого промерзания зимой. К увеличению половодья могут привести частые весенние дожди в некоторых предрасполагающих к этому регионах, а именно, когда их пик совпадает с пиком паводка [1].

Факторы, влияющие на формирования половодья:

1. Климатический. К этому фактору можно отнести обильные осадки, испарение, повышенную температуру в период таяния снежного покрова;
2. Физико-географический. Зависит от особенности строения речного бассейна;
3. Антропогенный. Данный фактор обуславливается тем, что хозяйственная деятельность человека в речных бассейнах, руслах, поймах и долинах может навредить естественному ходу реки;
4. Морфометрический. Строение речного русла;
5. Гидравлический. Форма русла [1].

Для примера, на рисунке 1.2 представлено половодье на реке Ока, находящейся в центральной части России, за апрель 2023 года, поскольку характеризует климатический фактор формирования половодья, а именно такие погодные условия как очень снежная зима и резкое весеннее потепление в совокупности с обильными осадками. Затоплено оказалось 2180,6 Га земель населенных пунктов [4].



Рисунок 1.2 – Половодье на реке Ока [4]

Паводок – обуславливается интенсивным, но довольно коротким по времени подъемом уровня воды, который вызван большим количеством ливней и дождей, а также таянием снега при оттепелях. Главным отличием паводка от половодья является то, что паводки могут повторяться несколько раз в течении года и даже зимой [1].

Что касается гидрологического режима реки Нева, то половодья в нем практически не наблюдаются, а паводки отсутствуют вовсе.

При половодье уровень воды в р. Нева поднимается от 10 до 150 сантиметров выше ординара. Данное событие связано с тем, что реки, впадающие в Ладожское озеро с приходом тепла, выходят из берегов и из-за этого в реке Нева происходит подъем уровня воды, так как это единственная река, которая вытекает из Ладоги.

1.1.2 Нагонные наводнения

Нагонные наводнения – это подъем уровня воды в морских устьях крупных рек и на ветреных участках побережья морей, крупных озёр, водохранилищ, вызванный воздействием сильного ветра на водную поверхность. Характеризуются отсутствием периодичности, редкостью и значительным подъёмом уровня воды, а также, как правило, кратковременностью [8].

По современным представлениям, механизм возникновения невских нагонных наводнений состоит в том, что циклоны, пересекающие Балтийское море с юго-запада на северо-восток, формируют особого рода волну и увлекают ее в направлении устья Невы, где она встречается с естественным течением реки. Подъем воды усиливается из-за мелководья и пологости дна в Невской губе, а также сужающегося к дельте Невы Финского залива. Высота волны сначала колеблется от 30 до 50 см, и гребень распространяется на 40-60 км за час [8].

К основным факторам, обуславливающим формирование нагонных наводнений в Санкт-Петербурге, относятся:

- 1) направление и скорость ветра, градиент атмосферного давления над Балтикой и Финским заливом;
- 2) фоновый (объемный) уровень Балтийского моря;
- 3) длинная прогрессивная волна, возникающая при определенных синоптических условиях над Балтийским морем и проникающая в Финский залив;
- 4) сейшевые колебания (стоячие волны) собственно Балтийского моря и Финского залива;
- 5) приливы (второстепенный фактор) [8].

Одной из самых частых причин повышения уровня воды в реке Нева, является сильный западный ветер, так его направление прямо противоположно течению реки. В большинстве случаев западные ветра влекут за собой циклоны, проходящие над Финским заливом и Балтийским морем. Циклон, который проходит над Балтикой в совокупности с низким давлением, является одним из факторов, повышающих уровень воды. Волна может усилиться, если направление циклона и длинной волны совпадают [8].

Наводнения, которые происходят из-за нагонных ветров, практически не поддаются закономерному описанию, так их вариативность сильно различается. Единственное, о чем можно говорить точно, о том, что данный тип наводнений, в большинстве своем, наблюдается в сезон штормов. Сезон штормов в тропических широтах приходит поздним летом или же ранней осенью, а в умеренных – осенью или в начале зимы [8].

Часто нагонные наводнения возникают из-за ветра, который направлен со Стокгольма в направлении Санкт-Петербурга, рисунок 1.3 [8].



Рисунок 1.3 – Направление ветра по линии Стокгольм – Санкт-Петербург [8]

Возникновение данного типа наводнений, происходит из-за ветра, который порождает циклон, пересекающий Балтийское море в направлении запад-восток. Ветер направленный из Стокгольма в сторону Санкт-Петербурга, под его действием, вода, которая находится в Финском заливе собирается в узком месте залива, его называют “горлом”. В совокупности всех перечисленных явлений и возникает длинная волна. Скорость её распространения колеблется от 40 до 60 км/ч. В конечном итоге эта волна достигает устья реки Невы через 7-9 часов. После этого уровень воды повышается. Усугубляет ситуацию сильный ветер с запада, который создает подпор, из-за чего вода в реке застаивается и продолжительное время не может вернуться обратно в залив [8].

1.1.3 Сейшевые колебания

Свободные стоячие волны, причиной возникновения которых являются сгонно-нагонные ветра, большое количество выпавших осадков, называют сейшами.

При сейшевых колебаниях, в водоеме, где происходит данное явление, наблюдается подъем уровня воды одной части водного пространства и снижение другой. На рисунке 1.4 изображен схематический рисунок сейшевых колебаний [9].

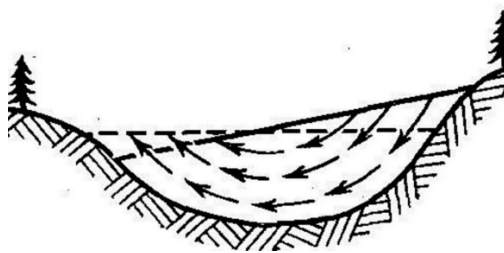


Рисунок 1.4 – Схематический рисунок сейшевых колебаний [9]

Вытянутая форма Балтийского моря, частично относит его к замкнутым водоемам. Сейши здесь возникают по нескольким причинам:

1. Нарушение равновесного состояния бассейна, причиной которого служат затяжные сгоны и нагоны воды.
2. Изменение давления и ветра при прохождении на данной и близлежащих территориях барических образований.

Возникновение такого рода колебаний происходит за очень короткий промежуток времени и как правило они охватывают практически все морское пространство, а вот их затухание может длиться несколько суток.

Стандартный вид сейшевых колебаний – это продольная одноузловая сейша, но их разновидность может достигать и до четырехузловой.

Обычно подъем уровня на всем пространстве Балтийского моря и Финского залива происходит в одно и то же время. Сейшевые подъемы происходящие в устье реки Нева в большинстве своем не превышают отметки в 1 метр, но в совокупности с западным ветром уровень воды может подняться до отметки в 150 сантиметров, а превышение данной отметки довольно редкое явление [9].

1.2 Структура формирования Невских наводнений

Согласно современным представлениям, описать возникновения наводнений можно по общим законам циркуляции земной атмосферы. Гигантские атмосферные вихри, движущиеся с запада при низком давлении в

центре именуемые циклонами, где поток ветра в урагане направлен на восток против часовой стрелки и к его центру. Разделительная линия между жаркой и холодной погодой во время циклона называется атмосферным фронтом. Циклоны, проходящие через Балтийское море, приводят к разрушению его структуры воды. В частности, они образуют особый тип длинной волны - своего рода пологую возвышенность. Высота такой небольшой волны (в центральных районах моря составляет более 30-40 см) и ее длина сопоставима с общей протяженностью моря. Созданию длинной волны способствуют как статический эффект (низкое атмосферное давление в центре) и динамический эффект (направленный ветер к центру) [10].

Циклоны перемещаются по различным траекториям. Особое значение в образовании подтоплений имеют циклоны, которые перемещаются с юго-запада на северо-восток, то есть в направлении моря. В данном случае циклон несет длинную волну к горлу Финского залива. И если в то же время еще существует система основного циклона, движущегося по его южной периферии углубляющегося частного циклона, то синоптическая ситуация для возникновения волны самая благоприятная. В горле залива, профиль длинной волны четко выражен. Здесь как бы происходит вспучивание из-за воды из Балтийского моря и отчасти из центральных районов Финского залива, так как в это время над заливом дует восточный ветер [10].

В «On the Spatiotemporal Structure and Mechanisms of the Neva River Flood Formation» (О пространственно-временной структуре и механизмах формирования наводнений на реке Неве) [<https://link.springer.com/article/10.3103/s106837391108005>] рассматриваются некоторые механизмы формирования наводнений. Сравнительный вклад в формирование Невских наводнений вносят колебания уровня моря различных временных масштабов (долгосрочных, сезонных, синоптических и мезомасштабных) [11]. Проведено сравнение расчетных характеристик волн наводнения с теоретическими дисперсионными соотношениями различных типов длинных волн. Это сравнение, а также результаты анализа

метеорологической информации и численных экспериментов, проведенных ранее на основе гидродинамической модели Балтийского моря, демонстрируют, что волны на реке Нева идентифицируются как вынужденные бароклинические топографические волны, генерируемые в результате резонанса между анемобарическими силами в атмосферных циклонах и низкочастотные собственные моды открытой системы Балтийского моря и Финского залива [11].

Согласно современной концепции, основанной на эмпирических и теоретических исследованиях, разлив рек - сложный многофакторный процесс. Считается, что преобладающий вклад в формирование паводков на реке Нева вносят мезомасштабные колебания уровня моря с типичным периодом 24-30 ч, вызванные анемобарическими силами глубоких циклонов, движущихся над акваторией Балтийского моря. Механизм формирования опасного и катастрофического подъема уровня воды в Устье реки Невы описывается следующим образом. Когда глубокие циклоны движутся над открытой местностью Балтийского моря в основном с запада на восток, на его северной периферии образуется нарушение уровня, распространяющееся на восток до Финского залива в виде свободной длинной гравитационной волны при прекращении действия возмущающей силы. Продвигаясь к вершине Финского залива, высота длинной гравитационной волны постоянно увеличивается из-за уменьшения площади поперечных сечений залива. Численные эксперименты, основанные на гидродинамической модели, показали, что высота длинной волны увеличивается на 40-50 % при распространении в Финском заливе и при отсутствии возмущающих сил. Если скорость атмосферных циклонов совпадает со скоростью свободной гравитационной волны, происходит явление резонанса, приводящее к особенно сильному увеличению амплитуды. По некоторым оценкам, явление резонанса в Финском заливе возможно при скорости атмосферных циклонов 15-21 м/с [11].

По результатам из численного гидродинамического моделирования следует, что экстремальные подъемы уровня воды в восточной части Финского

залива формируются при меньшей скорости циклонов (12-15 м/с). Считается, что другим важным сопутствующим фактором при формировании особо опасных и катастрофических подъемов уровня воды является сильный западный или юго-западный ветер, дующий в тылу циклонов над Финским заливом и создающий значительный ветровой нагон, совпадающий с гребнем длинной гравитационной волны. Результаты численных экспериментов с использованием гидродинамической модели демонстрирует, что основной силой, вызывающей экстремальные подъемы уровня воды в Невской губе, является сила тангенциального напряжения ветра. Влияние горизонтального градиента атмосферного давления и его статического эффекта не превышает 15 % и 16 %, соответственно [11].

1.3 Комплекс защитных сооружений

Санкт-Петербург пережил с момента основания города свыше 300 наводнений. Самыми сильными и разрушающими стали наводнения, которые произошли: 10 сентября 1777 года, тогда уровень воды превысил отметку в 310 сантиметров выше ординара, 7 ноября 1824 года, превышение уровня воды составило 410 сантиметров выше ординара и последним зафиксированным наводнением, которое в дальнейшем было отнесено к разряду катастрофических, произошло 23 сентября 1924 года, а подъем уровня составил 369 сантиметров выше нормы.

Практически все наводнения, которые переживал город приходили со стороны Балтийского моря.

Для города на Неве проблема подтоплений со стороны Финского залива и Балтийского моря всегда была актуальной. Даже если подъем уровня воды удавалось заблаговременно спрогнозировать, то предотвратить наводнение в полном объеме было практически непосильной задачей.

В 1979 году наконец было принято решение раз и навсегда решить проблему нагонных Невских наводнений. Буквально за пять лет по разным

экспертным оценкам, строительство дамбы было завершено на 70 – 80 %. Но в 90-е годы стройка прекратилась и возобновилась только в начале 21 века. И вот наконец в 2011 году комплекс защитных сооружений (именуемый в дальнейшем «КЗС») был сдан в эксплуатацию.

Комплекс защитных сооружений – невероятно сложный по строению и конструированию комплекс сооружений, который защищает Санкт-Петербург от наводнений, приходящих со стороны Финского залива и Балтийского моря.

Общая протяженность КЗС составляет 25,4 километра. Данный комплекс делится на составные части, в которые входят: дамбы в количестве одиннадцати штук, шесть сооружений для спуска воды, два сооружения для пропуска судов, приходящих в Санкт-Петербург или выходящих в открытое море. Также через дамбу проходит часть Кольцевой авто дороги, которая соединяет между собой три города Ломоносов–Кронштадт–Лисий нос. На рисунке 1.5 представлена дамба, зафиксированная с дрона [12].

Общая длина цепи дамб комплекса защитных сооружений составляет 23,4 км. Краевые участки укреплены смешанной насыпью щебня и различных пород скальных отложений, что предотвращает риск размыва от частого натиска воды. По информации с официального сайта КЗС, защитные дамбы могут выдержать подъем уровня воды, вызванный нагонными ветрами с Балтийского моря и Финского залива, до 3,5 метров [12].



Рисунок 1.5 – Комплекс защитных сооружений с высоты птичьего полета [12]

Водопропускные сооружения выполняют сразу две очень важные роли: экологическую и защитную. Во-первых, они способствуют процессу обмена воды между Невской губой и Финским заливом, тем самым позволяя водам реки Нева беспрепятственно выходить в море. Защитная функция сооружений заключается в том, чтобы предотвращать опасность подъема уровня воды на территориях Санкт-Петербурга и Ленинградской области [12].

При сигнале угрозы наводнения, который заранее поступает на командный пункт комплекса защитных сооружений, створы водопропускных сооружений заблаговременно переводят в закрытое состояние. Створы опускаются тем самым перекрывая дальнейшее продвижение наводнения на восток. Затворы могут опускаться на разные значения по глубине от 2,5 до 5 метров, а их внушительный размер и вес способствует преодолению и пробитию ледового покрова, если таковое присутствует, толщиной до 60 метров. Когда безопасности города ничего не угрожает, то затворы водопропускных сооружений, находятся в открытом положении, закрепленные над водной поверхностью. Ширина одного такого затвора составляет 24 метра, а всего на весь комплекс их предусмотрено 64 штуки [12].

Так как город на Неве был спроектирован и построен, чтобы в дальнейшем стать городом с выходом в открытое море, у Санкт-Петербурга есть три морских канала. Первый Кронштадтский фарватер длиной 14,2 километра, ширина на всем протяжении варьируется от 150 до 200 метров, а глубина составляет 14 метров. Северный Кронштадтский канал: длина 16,1 километр, ширина и глубина у этого канала самые наименьшие из представленных 110 метров и 6,8 – 7,2 метра соответственно. Самым протяженным из трех каналов является Западный Кронштадтский фарватер его длина достигает 28,4 километра, ширина превышает отметку в пол километра (600 метров), а значения глубины от самой мелководной до самой глубокой части канала различаются в три раза (8,7 – 25,7 метров). Каждый год в Санкт-Петербург впускает в свою акваторию до 30 000 судов [12].

Как уже сказано ранее, комплекс защитных сооружений имеет две точки для пропуска морских судов. Каждое из сооружений имеет ряд различий по своим основным характеристикам, но в совокупности их главными задачами является:

1. Самой основной и значимой для всего города задачей выступает защита от наводнений, которые приходят со стороны Балтийского моря
2. Второй задачей является свободное и безопасное прохождение судов на территорию морского порта города.
3. Третья задача решает вопрос с движением автомобилей по Кольцевой автодороге.

Первое судопропускное сооружение имеет длину прохода в 273 метра, ширина и глубина пролета составляет 200 метров и 16 метров. Для сухопутного транспорта в этом месте был построен подземный тоннель протяженностью около двух километров.

Данное сооружение используется для двух целей: защита от наводнений и пропуск судов.

Срабатывание данного сооружения при угрозе наводнения происходит в несколько этапов. Сначала происходит затопление специальных резервуаров (доковые камеры) из-за этого на поверхность поднимаются батопорты (плавучие затворы). После того как уровень воды приходит в нормальное состояние происходит процесс открытия ворот в доках. Далее специальные приводы приводят затворы комплекса защитных сооружений в закрытое положение. Батопорты начинают движение, которое в дальнейшем перекрывает доступ воды в акваторию Санкт-Петербурга. Данные действия в совокупности выполняются за 45 минут. После этого, когда затворы уже приняли нужное положение, происходит затопление емкостей, которые в свою очередь, оказывая давление на выведенные затворы, опускают их основание канала. После этого подается команда, что защитное сооружение приняло положение «закрыто». На рисунке 1.6 представлена схема, на которой створы КЗС

находятся в закрытом положении. Открытие затворов происходит по обратной схеме. Первым, с начала эксплуатации, предотвращенным наводнением в результате нагонного ветра, стало наводнение, которое прогнозировалось 28 ноября 2011 года [12].

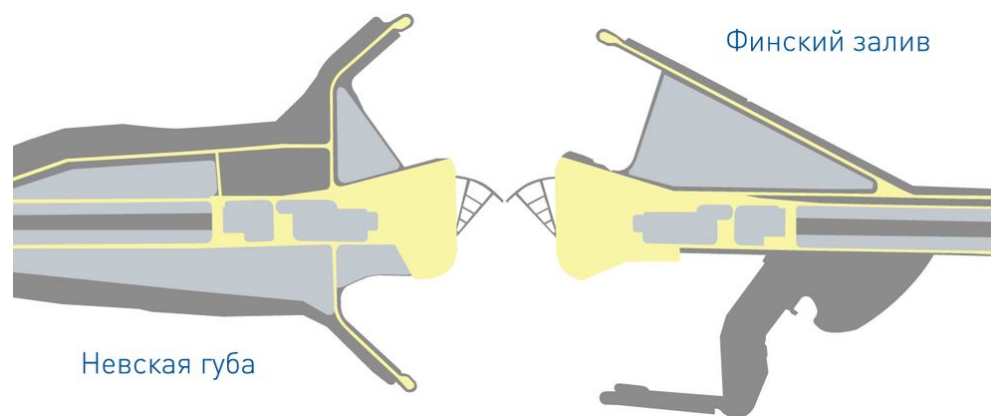


Рисунок 1.6 – Закрытые затворы КЗС [12]

Второе судопропускное сооружение имеет меньшие размеры нежели первое и предназначено оно в основном для пропуска небольших судовых транспортных средств, которые передвигаются только в пределах рек и морей и как правило не выходят в открытый океан.

Ширина и глубина этого канала в два раза меньше, чем первого. Соотношение ширина/глубина составляет 100/7 метров.

Когда в командный пункт приходит сигнал об угрозе наводнения, затвор, находящийся под водой на глубине около 20 метров, начинает постепенно подниматься вверх и в конечном итоге создает преграду поступающей воде со стороны Финского залива, возвышаясь над уровнем моря до 440 сантиметров.

Также над конструкцией для пропуска судов второго сооружения проходит часть Кольцевой автодороги в виде моста. На рисунке 1.7 представлена схема судопропускного створа. Мост имеет механизм, который может регулировать его высоту. Поэтому если пребывающему судну будет недостаточно места для прохода, мостовую часть можно поднять на 9 метров, а его обычное положение над водой по высоте составляет 16 метров [12].

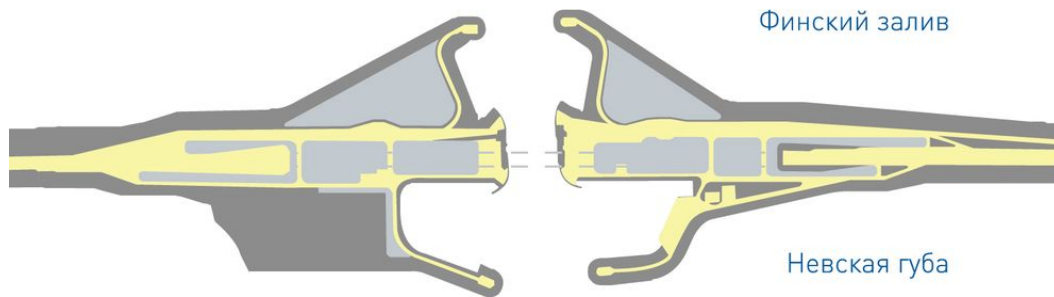


Рисунок 1.7 – Схема створа КЗС с мостом КАД [12]

Судопропускные сооружения практически всегда находятся в открытом положении, за исключением, когда городу угрожает наводнение.

Важно отметить, что работа данных сооружений не вносит коррективы в гидрологический режим реки Нева, так как ширина устья реки в полтора раза меньше, чем ширина всех пропускных сооружений. За счет этого вода и обитатели реки Нева не теряют возможности свободного перемещения. Но в то же время закрытые створы комплекса защитных сооружений увеличивают максимальные уровни воды при наводнениях в Курортном районе примерно на 5 – 10 % [12].

2 Характеристика региона исследования

2.1 Географическое положение

Район исследования включает в себя реку Нева, в водосборный бассейн которой входят: Ладожское озеро, соединяющееся с Невской губой Финского залива Балтийского моря, которые в свою очередь находятся в Северо-Западном регионе Российской Федерации городе Санкт-Петербург и Ленинградской области. Координаты территории исследования 59° северной широты, 31° восточной долготы.

Город Санкт-Петербург находится на западной оконечности Невской равнины. Берега города омываются Финским заливом, а также в его центральной части протекает река Нева и впадает в Финский залив. В устье реки Нева образуются рукава: Малая Нева и Большая. Река разделяет город на три основных части: левобережную, правобережную и островную. Так как началась застройка береговой линии и прибрежной зоны Финского залива, образовалась четвертая часть, именуемая прибрежной стороной. Большая часть города преимущественно находится на левом берегу Невы. Границы левобережной стороны города пролегают на юго-западе Красносельского района, на юго-востоке Пулковского и Купчинского районов и на юге Рыбацкого района. Границами правобережной части города являются на северо-западе – Ольгино, на севере – Парголово и Шуваловский районы, на востоке – Ржевка. Расстояние между двумя крайними точками границ города от северо-запада до юго-востока составляет 90 километров. Центральная часть Северной столицы находится на высоте 1 – 5 метров над уровнем моря, высота северной части города составляет 5 – 30 метров, а южная и юго-западная часть располагается на высоте 5 – 22 метра. На рисунке 2.1 изображена географическая карта города Санкт-Петербург с границами кольцевой автомобильной дороги [13].

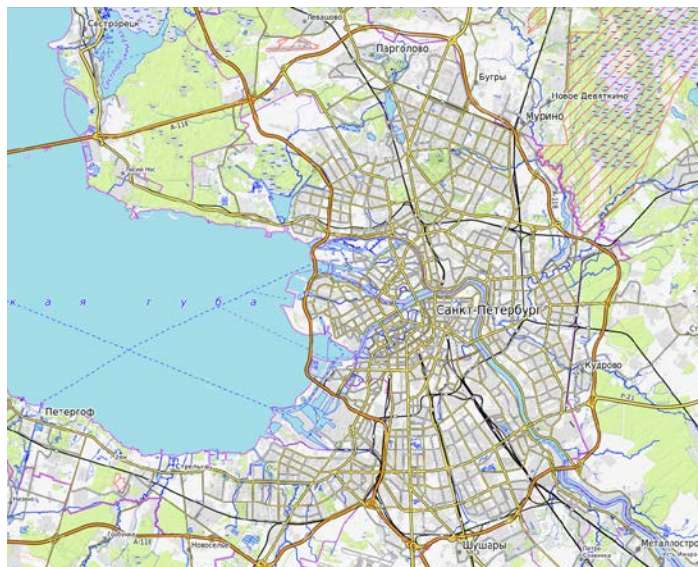


Рисунок 2.1 – Географическая карта города Санкт-Петербург [14]

Нева – река северо-западного региона России, протекающая через Санкт-Петербург и Ленинградскую область с площадью собственного бассейна 5000 км^2 , а если учитывать бассейны Ладожского и Онежского озер, то значение возрастает практически в 60 раз (281000 км^2). Это единственная река истоком которой является Ладожское озеро. Устье реки расположено в Невской губе Финского залива. Можно сказать, что Нева является своего рода артерией, которая соединяет Ладожское озеро и Финский залив. Длина реки составляет 74 км, по маршруту её течения, а по прямой от истока до устья 45 км. На рисунке 2.2 показан спутниковый снимок реки Нева с её устьем и истоком [13].

Нева относится к типу равнинных рек, поэтому на всем протяжении река протекает по равнинной низменности. Нева не имеет высоких берегов, на всех участках её пути их высота в среднем составляет 4 – 6 метров, а на подходах к устью реки, они уменьшаются до 2 – 3 метров по высоте [14].

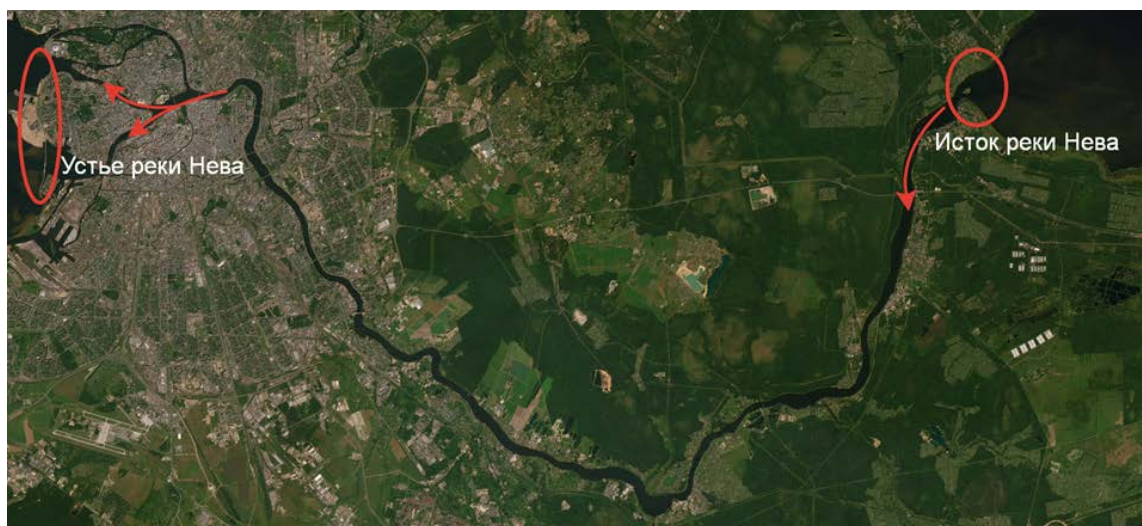


Рисунок 2.2 – Река Нева от истока до устья [14]

Нева – самая крупная из рек, впадающих в Балтийское море, на ее долю приходится около 18 % от общего стока. Река Нева зарегулирована с помощью озер водосборного бассейна, и на долю зимнего маловодья приходится около 25% годового стока. Соотношение речного стока между влажными и засушливыми годами составляет примерно два к одному. Объект исследования находится на территории Ленинградской области и Санкт-Петербурга. Нева соединяет Ладожское озеро с Невской губой Финского залива Балтийского моря, так же река является единственной, которая вытекает из Ладожского озера. Длина 74 км, площадь бассейна – 281 тыс. км² [13].

2.2 Климатическая характеристика

Климат рассматриваемого района умеренно холодный, переходный от морского к континентальному. Наиболее характерной чертой циркуляционных процессов является западный перенос, вследствие которого здесь в течение всего года преобладают воздушные массы, поступающие с Атлантики. Это обуславливает продолжительную мягкую зиму и короткое прохладное лето. Наряду с этим в значительной степени проявляется и влияние Арктики – вторжения воздушных масс с севера, вызывающих резкие, в некоторых случаях

длительные, похолодания. Смена масс воздуха обычно осуществляется в результате интенсивной циклонической деятельности.

На температурный режим Санкт-Петербурга оказывают влияние, в основном, 2 фактора: радиационный режим и циркуляция атмосферы.

Территория относится к атлантико-континентальной климатической области умеренного пояса. Главное значение в формировании климата здесь принадлежит воздействию морских и континентальных воздушных масс, арктическим вторжениям и интенсивной циклонической деятельности. Активная циклоническая деятельность и частая смена воздушных масс определяют неустойчивый режим погоды во все сезоны года и являются причиной формирования климата с хорошо выраженными морскими чертами: мягкой зимой, прохладным летом, достаточным увлажнением и сравнительно частым выпадением осадков.

Зима длится в среднем 3,5 месяца и характеризуется частыми оттепелями, особенно в первой ее половине. В декабре в среднем отмечается до 12 дней с оттепелью, в это время преобладает пасмурная и ветреная погода, с частыми осадками в виде мокрого снега. В середине декабря отмечается устойчивый переход средней суточной температуры воздуха через -5° и образование устойчивого снежного покрова. Наибольший за зиму запас воды в снеге в среднем составляет 70-80 мм. В январе западные теплые потоки ослабевают, и число дней с оттепелью уменьшается до 7-8 дней в месяц, однако в мягкие зимы оттепель может длиться непрерывно более месяца. Осадки за период с декабря по март составляют в среднем около 140 мм или 22 % от годовой суммы. Они носят в основном обложной характер и выпадают 17-20 дней в месяц в виде снега, дождя, мокрого снега. Из-за частых оттепелей мощного снежного покрова не образуется. Максимальных значений (25-30 см на открытых участках) высота снежного покрова достигает в марте.

Весна носит затяжной характер. Таяние снега наступает в середине марта, и к 12 апреля устойчивый снежный покров, как правило, сходит. В отдельные годы снежный покров появляется вновь, поэтому даты его окончательного

схода колеблются от первой декады марта до начала мая. Переход средней суточной температуры через 0° к положительным значениям осуществляется в среднем 3-4 апреля. Повышение температуры воздуха от 0°C до 10°C происходит в среднем за 45 дней. Заморозки возможны до конца мая. Суточные колебания температуры воздуха в отдельные дни может достигать $18-20^{\circ}\text{C}$.

Лето умеренно теплое и длится обычно от начала июня до конца первой декады сентября. Летние месяцы характеризуются большой продолжительностью солнечного сияния: 280-300 часов в июне, 200-240 часов в августе. Период со средними суточными температурами воздуха выше 15°C длится обычно около 65 дней (в среднем с 19 июня по 24 августа). Скорость ветра летом наименьшая в году, на скорости ветра до 5 м/с приходится около 80% случаев. Осадков выпадает больше, чем в другие сезоны, на период с июня по август приходится 34% годовой суммы. Продолжительность осадков составляет в среднем 52 часа в месяц. Максимальное количество осадков выпадает в августе. В основном осадки носят ливневой характер и иногда сопровождаются грозами.

Осень наступает около середины сентября с началом заморозков на поверхности почвы и характеризуется общим ухудшением погоды (понижением температуры, повышением влажности, увеличением облачности). Продолжительность осадков в октябре-ноябре увеличивается по сравнению с летом в 2 раза, возрастая до 147 часов в ноябре. Переход средней суточной температуры воздуха через 10°C происходит 21 сентября, через 5°C – 19 октября, через 0°C – 15 ноября. Появление снежного покрова возможно уже в середине октября.

Метеорологические характеристики приводятся по данным Справочно-информационного портала «Погода и климат» [17] и материалам Госфонда ВНИИГМИ МЦД по метеостанции Санкт-Петербург за период 1966-2021 гг. [18]. Основные метеорологические характеристики приводятся в таблицах 2.1–2.7.

Температура воздуха. Среднегодовая температура воздуха составляет 5,7 °С. Самый холодный месяц – январь со средней температурой - 6,3 °С и абсолютной минимальной температурой - 37,7 °С, самый теплый месяц – июль со средней температурой 18,6 °С. Абсолютный максимум наблюдался в июне – 35,9 °С (таблица 2.1).

Таблица 2.1

Температура воздуха, Санкт-Петербург, °С

Характеристика	Месяц												Год
	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12	
Средняя	-6,3	-5,9	-1,3	4,7	11,3	16,0	18,6	16,9	11,7	5,9	0,6	-3,5	5,7
Абсолютная максимальная	8,7	10,2	15,3	25,3	33,0	35,9	35,3	37,1	30,4	20,9	12,3	10,9	37,1
Абсолютная минимальная	-34,7	-33,0	-22,6	-12,5	-3,1	0,7	4,9	1,3	-3,1	-9,7	-20,1	-34,4	-34,7

Температура поверхности почвы. Средняя годовая температура поверхности почвы составляет 6,2 °С. Минимальная среднемесячная температура поверхности почвы наблюдается в январе и составляет - 7,5 °С, максимальная среднемесячная температура – в июле –22,0 °С (таблица 2.2).

Таблица 2.2

Температура поверхности почвы, Санкт-Петербург °С

Характеристика	Месяц												Год
	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12	
Средняя	-7,5	-7,3	-2,7	5,1	14,1	19,8	22,0	18,9	11,8	4,9	-0,5	-4,6	6,2

Условия увлажнения. Согласно таблице 2.3 средняя годовая относительная влажность воздуха составляет 77 %. Апрель-июнь более засушливые месяцы со среднемесячной влажностью 64-68 %, ноябрь-январь более влажные – 86-87 %.

Таблица 2.3

Относительная влажность воздуха, Санкт-Петербург, %

Характеристика	Месяц												Год
	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12	
Средняя	86	84	77	68	64	67	71	75	80	82	86	87	77

Режим осадков на рассматриваемой территории определяется главным образом атмосферной циркуляцией. Годовое количество осадков в рассматриваемом районе – 660 мм. Наблюденный суточный максимум осадков 69 мм отмечен в июле. В среднем за год возможно 121 день с осадками 0,1 мм и более (таблица 2.4).

Таблица 2.4

Осадки, Санкт-Петербург, мм/12 ч

Характеристика	Месяц												Год
	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12	
Месячное и годовое количество, мм	43	34	35	36	44	63	82	84	64	66	57	51	660
Максимальное суточное количество, мм	19	23	26	29	36	44	69	58	32	37	31	28	69
Среднее число дней с осадками 0,1 мм и более	11	9	9	8	8	9	10	11	11	12	12	12	121

Ветер. Средняя годовая скорость ветра составляет 2,2 м/с. Наблюдённая максимальная скорость ветра – 25 м/с (наблюдалась в сентябре 1998 г.). Ветер скоростью 15 м/с и более на станции Санкт-Петербург не наблюдается, таблица 2.5.

Таблица 2.5

Средняя и максимальная скорость ветра, Санкт-Петербург

Характеристика	Месяц												Год
	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12	
Ср. месячная и годовая скорость, м/с	2,4	2,3	2,3	2,1	2,0	1,9	1,7	1,7	1,9	2,3	2,6	2,6	2,2

Характеристика	Месяц												Год
	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12	
Макс. скорость, м/с	21	19	19	24	19	20	25	20	24	20	21	19	25

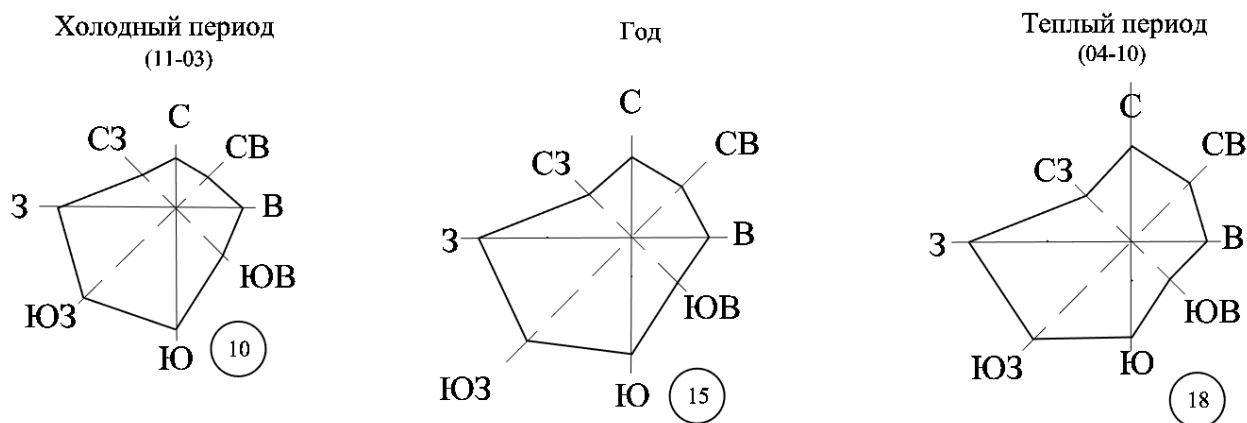
В годовом распределении преобладают ветры западного направления, повторяемость которых за год равна 19,9 % (таблица 2.6). Наименьшую повторяемость имеют северо-западные и юго-восточные ветры, повторяемость которых в среднем за год оставляет около 7,9–8,4 %.

В годовом выражении повторяемость штилей составляет в среднем 15,4 %. Повторяемость штилей по месяцам в процентах от общего числа наблюдений за ветром колеблется от 7,8 % в ноябре до 21,5 % в августе (таблица 2.6). Повторяемость направления ветра и штилей представлена на рисунке 2.3.

Таблица 2.6

Повторяемость ветров по направлениям и количество штилей, Санкт-Петербург

Месяц	Повторяемость ветра по направлениям, %								Штиль, %
	С	СВ	В	ЮВ	Ю	ЮЗ	З	СЗ	
Январь	7,1	7,3	10,9	10,5	18,2	19,7	19,5	7,0	12,6
Февраль	8,2	8,9	9,7	10,9	17,8	19,3	20,1	5,1	13,8
Март	8,2	8,2	10,4	10,1	16,4	20,7	20,2	5,7	14,6
Апрель	11,4	12,9	11,1	8,5	11,1	17,4	21,2	6,4	16,7
Май	13,9	14,6	11,2	6,2	8,6	16,3	22,6	6,6	18,9
Июнь	14,0	11,7	8,9	5,5	8,9	16,6	26,0	8,4	19,1
Июль	13,0	11,1	9,7	5,9	10,8	17,6	23,8	8,1	20,2
Август	11,8	10,1	9,1	6,4	12,6	18,6	22,7	8,7	21,5
Сентябрь	11,6	8,4	9,6	8,1	15,8	19,5	17,0	10,0	18,7
Октябрь	11,0	5,1	8,6	8,5	19,9	20,9	15,5	10,5	11,8
Ноябрь	8,4	5,2	10,5	10,3	22,1	20,8	13,5	9,3	7,8
Декабрь	6,9	5,5	11,0	10,0	19,8	20,7	16,9	9,2	9,0
Апрель–октябрь	12,4	10,6	9,7	7,0	12,5	18,1	21,3	8,4	18,1
Ноябрь–март	6,5	5,8	8,7	8,6	15,7	16,9	15,0	6,1	9,6
год	10,4	9,1	10,0	8,4	15,2	19,0	19,9	7,9	15,4



Условные обозначения и масштаб

- повторяемость направлений ветра, 1 мм=1%
- ④ процент штилей от общего числа наблюдений за период

Рисунок 2.3 – Повторяемость направлений ветра и штилей, Санкт-Петербург

Снежный покров. Появление снежного покрова обычно чередуется с его таянием. Устойчивый снежный покров устанавливается начале ноября и разрушается в начале апреля. В г. Санкт-Петербург возможно 213 дней со снежным покровом. За период наблюдений средняя из наибольших декадных значений высоты снежного покрова 49 см, максимальная – 73 см.

Неблагоприятные атмосферные явления погоды. Грозы отмечаются с апреля по октябрь, и с декабря по январь, но в январе, апреле, октябре и декабре не ежегодно. В среднем за сезон бывает 20,5 дней с грозой.

Туманы возможны в любом месяце, но в июне–июле не ежегодно. В среднем за год может быть 34,7 дней с туманом.

Метели наблюдаются с ноября по апрель, но в марте–апреле не ежегодно. В среднем за сезон возможно 7,2 дня с метелью.

Гололёд отмечается с октября по апрель, но в октябре и марте–апреле не ежегодно. В среднем за сезон возможно 3 дня с гололедом.

Изморозь отмечается октября по апрель, но в апреле и октябре не ежегодно. В среднем за сезон может быть 11,1 дней с изморозью, таблица 2.7.

Таблица 2.7

Среднее число дней с неблагоприятными явлениями погоды, Санкт-Петербург

Характеристика	Месяц												Год
	01	02	03	04	05	06	07	08	09	10	11	12	
Грозы	0,1	0,0	0,0	0,2	2,2	4,9	7,0	4,7	1,1	0,1	0,0	0,1	20,5
Туманы	3,4	4,4	5,5	4,3	1,3	0,4	0,3	1,2	2,8	3,6	3,1	4,3	34,7
Метели	1,7	1,5	0,8	0,2	-	-	-	-	-	-	1,0	2,0	7,2
Гололед	5,3	2,6	0,5	0,2	-	-	--	-	-	0,0	1,5	2,9	13,0
Изморозь	1,6	3,4	1,7	0,2	-	-	-	-	-	0,1	1,4	2,7	11,1

Опасные гидрометеорологические явления и процессы. Согласно ФГБУ «Северо-западное УГМС» по перечню опасных природных явлений и их критериев по г. Санкт-Петербург [6], на рассматриваемой территории опасными природными воздействиями является очень сильный ветер со скоростью ветра при порывах 25 м/с и более. Максимальная скорость ветра, по данным метеостанции Санкт-Петербург, составила 25 м/с, сентябрь 1998.

А также сильная жара с мая по август при максимальной температуре воздуха 35 °С и выше является опасным метеорологическим явлением. Абсолютная максимальная температура воздуха 37,1 °С в городе Санкт-Петербург наблюдалась в августе 2010 г.

2.3 Наблюдения за уровнем воды на реке Нева

Уровень воды измеряется на гидрологических постах, которые должны быть оборудованы специальными приборами и устройствами. Устройства и приборы для измерения уровня воды должны учитывать особенности местности расположения гидрологического поста. Уровень воды (h) – это высота водной поверхности относительно условной горизонтальной плоскости сравнения [9].

На реке Нева наблюдение за уровнем воды производится практически с самого основания Санкт-Петербурга по сегодняшний день, а данные фиксируются каждую минуту [19].

Нормальный уровень воды для реки Нева или же ординар был получен в 1726 году академиком Иоганном Лейтманом. Наблюдения за точным уровнем воды в виде водомерной рейки с делениями было установлено на набережной Горного института. Данным способом подъемы воды в устье реки Нева измеряли практически три века. На данный момент все процессы, связанные с измерением и прогнозированием подъема уровня воды автоматизированы и каждую минуту, вносятся в электронную базу данных.

Прогнозирование и наблюдение за уровнем воды играет очень большую роль для разных аспектов и видов деятельности в Санкт-Петербурге и его акватории. Так как Северная столица является портовым городом, то знание уровня воды облегчает навигацию морских судов. Так же эти наблюдения помогают спрогнозировать ожидаемые подтопления в городе [19].

С помощью автоматизированной информационной системы государственного мониторинга водных объектов (АИС ГМВО) [20] был составлен список некоторых пунктов наблюдений за гидрологическими характеристиками части бассейна р. Нева, таблица 2.8. Так же был сделан запрос в Северо-Западное УГМС [6] с целью получения ежечасных данных по уровню реки Нева с поста Горный Институт для большей наглядности и полноты всех протекающих процессов, связанных с подъемом уровня.

Таблица 2.8

Характеристики реки Нева в створах гидрологических постов

№ п/п	Название поста	Код поста	Расстояние от устья реки	Площадь водосбора	Отметка ординара		Период действия	
					Высота	Система высот	Открыт	Закрыт

№ п/п	Название поста	Код поста	Расстояние от устья реки	Площадь водосбора	Отметка ординара		Период действия	
					Высота	Система высот	Открыт	Закрыт
1	р. Нева – Обуховский завод	72819	23,00	15200	-5,00	БС	1980 гт	Действует
2	р. Нева – Литейный мост	72824	7,80	15200	-5,00	БС	1941 гт	Действует
3	р. Нева – Горный Институт	72827	1,00	-	-5,00	БС	1877 гт	Действует

Место нахождения гидрологических постов на карте городской части р. Нева представлено на рисунке 2.4.

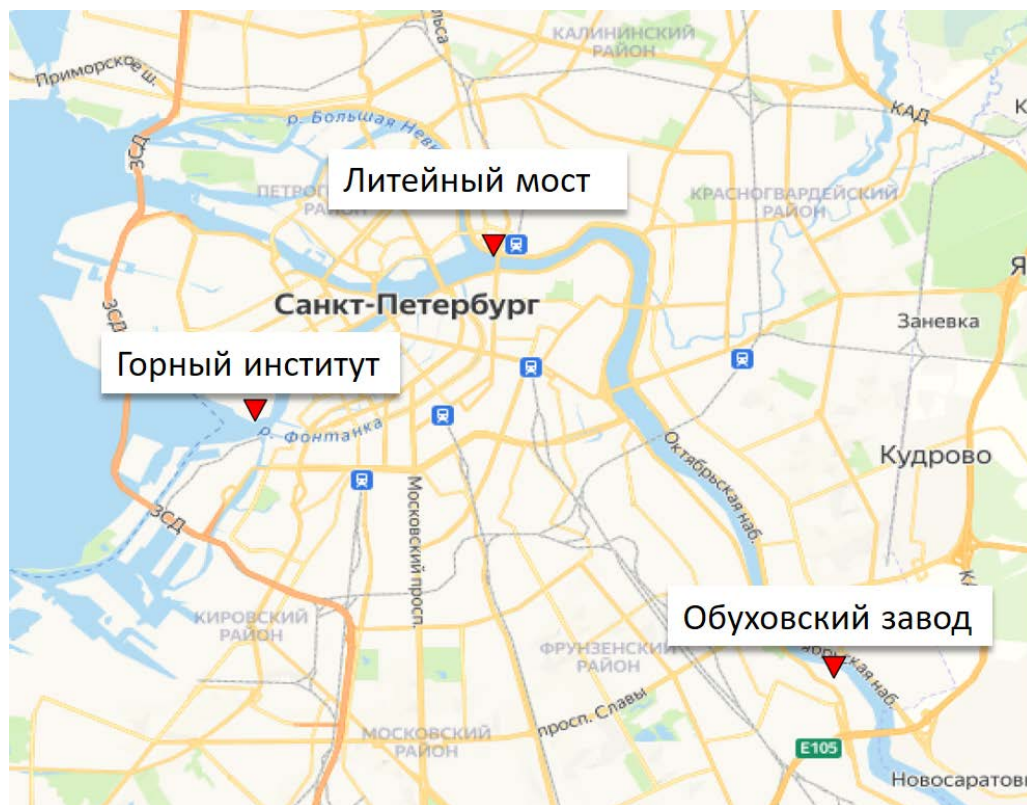


Рисунок 2.4 – Расположение гидрологических постов на городской территории р. Нева

Пост Горный Институт находится на расстоянии 2,8 км от устья реки Нева, отметка нуля данного поста находится на высоте -5 м над уровнем моря. Пост был открыт в 1877 году и продолжает действовать до сих пор. На рисунке 2.6 изображено место измерения уровня воды по посту Горный институт [6, 20].

Пост Литейный мост находится на расстоянии 7,8 км от устья реки Нева, отметка нуля данного поста находится на высоте -5 м над уровнем моря, а площадь его водосбора составляет 15 200 км². Пост был открыт в 1941 году и продолжает действовать до сих пор. На рисунке 2.7 можно наблюдать Место измерения уровня воды по посту Литейный мост. Красной точкой обозначен гидропост [6].

Пост Обуховский завод находится на расстоянии 23 км от устья реки Нева, отметка нуля данного поста находится на высоте -5 м над уровнем моря, а площадь его водосбора составляет 15 200 км². Пост был открыт в 1980 году и продолжает действовать до сих пор [6].

2.4 Особенности циркуляции умеренных широт

На формирование климата большее влияние оказывает атмосферная циркуляция, которая представляет собой систему надземных воздушных потоков и является замкнутой и имеет планетарный масштаб, а также влияет на погоду, изменения метеорологических величин: температуры, осадков и облачности. Система воздушных потоков чаще всего проявляется в виде вихрей, которые постоянно возникают в атмосфере, развиваются и перемещаются. Такие атмосферные вихри, которые при своем передвижении осуществляют перенос воздушных масс, что сказывается на погодных условиях на больших участках территорий, где они проходят именуется циклонами и антициклонами. Антициклон и циклон – в глобальном плане явления, которые в ходе своего формирования имеют несколько схожие черты, но при всей, на

первый взгляд, схожести, они имеют множество отличительных особенностей [21].

Циклоном называют атмосферный вихрь с относительно низким давлением в центральной части и ветром, который переносит воздушные массы от краев к центру. В северном полушарии процесс закручивания воздушных масс к центру циклона происходит против часовой стрелки, а в южном наоборот, но независимо от полушария поток воздуха движется вверх.

Циркуляция разделяется на 4 типа воздушных масс, а именно:

- при образовании в районе экватора с высокой температурой и влажностью;
- при образовании в умеренных широтах;
- при образовании в тропиках и субтропиках;
- и потоки воздуха, образованные над Арктикой и Антарктидой с низкой температурой и влажностью.

На циркуляцию влияют форма Земли, суточное и годовое вращение Земли вокруг Солнца, расположение морей и суши и рельеф.

Атмосферная циркуляция является важным природным явлением, влияющим на формирование климата Земли и непрерывные изменения погодных условий в регионах. Воздушные потоки, которые могут быть теплыми или холодными, сухими или влажными формируют различные климатические системы. Атмосферная циркуляция играет определенную роль в переносе влаги с океана на континент, а также с одной широты на другую.

В данном исследовании рассматриваются такая атмосферная система как циклон.

Циклон образуется из-за встречающихся друг с другом воздушных масс, отличающихся по температуре.

Образование циклона включает в себя такие этапы как:

1. В течении нескольких дней происходит образование потоков воздуха;
2. Начинает падать давление в центре формирования будущего циклона;

3. Понижение давления достигает своего предела, а скорость ветра постепенно начинает возрастать вплоть до своего максимума;
4. Все характеристики внутри циклона нормализуются, и он постепенно затухает [21].

Рассмотрим пример, который напрямую связан с темой исследования, а именно влияние атмосферной циркуляции на невиские наводнения. Обращаясь к ожидаемым наводнениям, которые предотвращены комплексом защитных сооружений (КЗС). Наводнение 5 декабря 2015 года могло стать очень неприятным и разрушительным для города событием. Наивысший уровень погодной опасности - «красный» был объявлен сразу после появления шторма «Десмонд».

Шторм Десмонд был внетропическим циклоном и четвертым названным штормом сезона штормов в Великобритании и Ирландии 2015-2016 годов, известным тем, что он направил поток влажного воздуха, известный как атмосферная река, который принес рекордное количество орографических осадков в высокогорные районы северной Атлантической Европы и последующие крупные наводнения.

Четвертого декабря Метеорологическое управление выпустило желтое предупреждение о ветре на большей части севера Великобритании, с порывами, которые, как ожидается, достигнут 110 км/ч на юго-западе Шотландии. Желтые предупреждения также были объявлены из-за дождя в Северной Ирландии, на севере Уэльса и в центральной части Шотландии. В некоторых частях центральной и южной Шотландии, Тейсайде и Файфе было объявлено предупреждение желтого цвета о дожде; прогнозируется до 200 мм осадков на возвышенностях в течение 30-часового периода. Метеостанция Эйреанн выпустила предупреждение о красном статусе осадков для районов Коннахта, а также графств Донегал, Клэр и Керри. Совет округа Клэр выпустил предупреждение о наводнении.

Пятого декабря Метеорологическое бюро выпустило красное предупреждение о сильных погодных условиях для дождя в Камбрии, в

некоторых местах ожидается от 150 мм до 200 мм. Это было первое подобное предупреждение со времен шторма Тини в феврале 2014 года. Агентство по охране окружающей среды распространило серьезные предупреждения о наводнениях на некоторых участках реки Тайн в Нортумберленде и по всей Камбрии.

Шторм Десмонд побил 24-часовой рекорд в количестве осадков, выпавших в Соединенном Королевстве: Пятого декабря на перевале Хонистер, Камбрия, выпало 341,4 мм осадков. Предыдущий рекорд был установлен в 2009 году, также в Камбрии, когда в Ситуэйте выпало 316,4 мм осадков.

На своем пути Десмонд создал атмосферную реку, которая принесла влажный воздух с Карибского моря на Британские острова. В результате ливень в Десмонде был необычно сильным, и Норвежский метеорологический институт назвал Десмонд экстремальным погодным явлением в результате ожидаемых осадков.

Проливные дожди в Десмонде вызвали серьезные разрушения. Эпплби, Кесвик и Кендал в английском графстве Камбрия пострадали от перекрытых дорог, рухнули мосты, некоторые дома были эвакуированы.

5 декабря 2015 года шторм «Десмонд» подошел к городу Санкт-Петербург на реке Нева. Затворы комплекса защитных сооружений заняли положение «закрыто» заблаговременно – в 19:25 UTC 5 декабря. По прогнозным данным подъем уровня должен был составить 268 сантиметров выше ординара.

По данным на 5 декабря уровень в пике превышал отметку 127 см. Подъем происходил равномерно примерно на 8-10 сантиметров в час. Снижение уровня воды было не столь стремительным. Вода опускалась до нормального уровня 6 часов и практически все это время уровень колебался на отметке 615 сантиметров. К 15 часам UTC он не превышал 100 сантиметров выше ординара. На рисунке 2.5 представлена траектория перемещения циклона, именуемого Десмонд за 4– 5 декабря 2015 года с дискретностью 6 часов.

Абсолютные карты топографии приведены по изобарической поверхности 50 гПа на высоте 5,5 км.

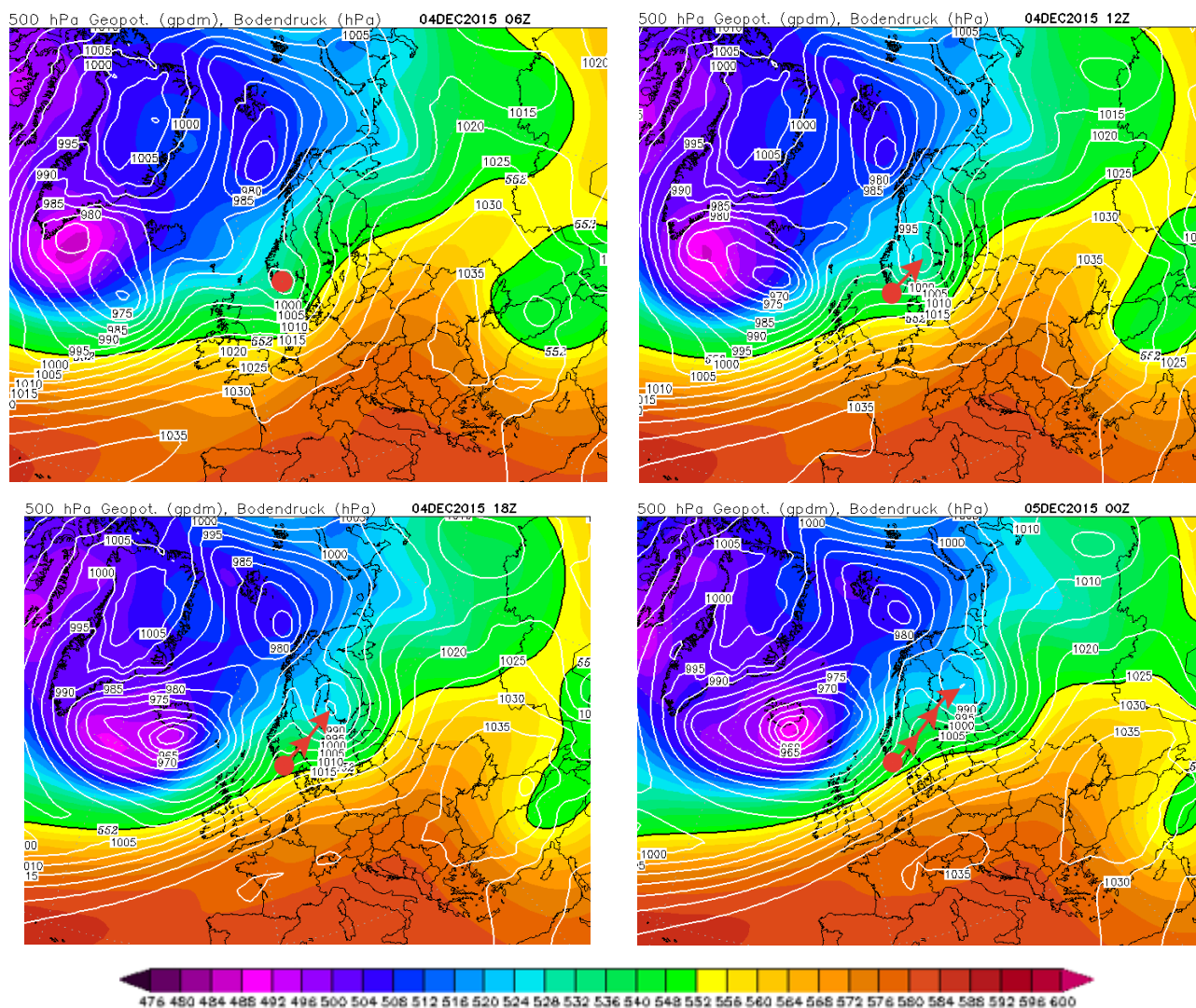


Рисунок 2.5– Траектория перемещения циклона «Десмонд» с 4 по 5 декабря 2015 года

Шестого декабря 2015 года предположительный подъем уровня воды ранним утром по прогнозным данным составлял +230 сантиметров. Но за весь день подъем уровня не перешел отметки в +100 сантиметров. Но к 21:00 UTC уровень воды составлял 597 сантиметров, а спустя час уже перешел отметку в +100 сантиметров (603 сантиметра). На рисунке 2.6 представлена траектория перемещения циклона, именуемого Десмонд за 5–6 декабря 2015 года с дискретностью 6 часов.

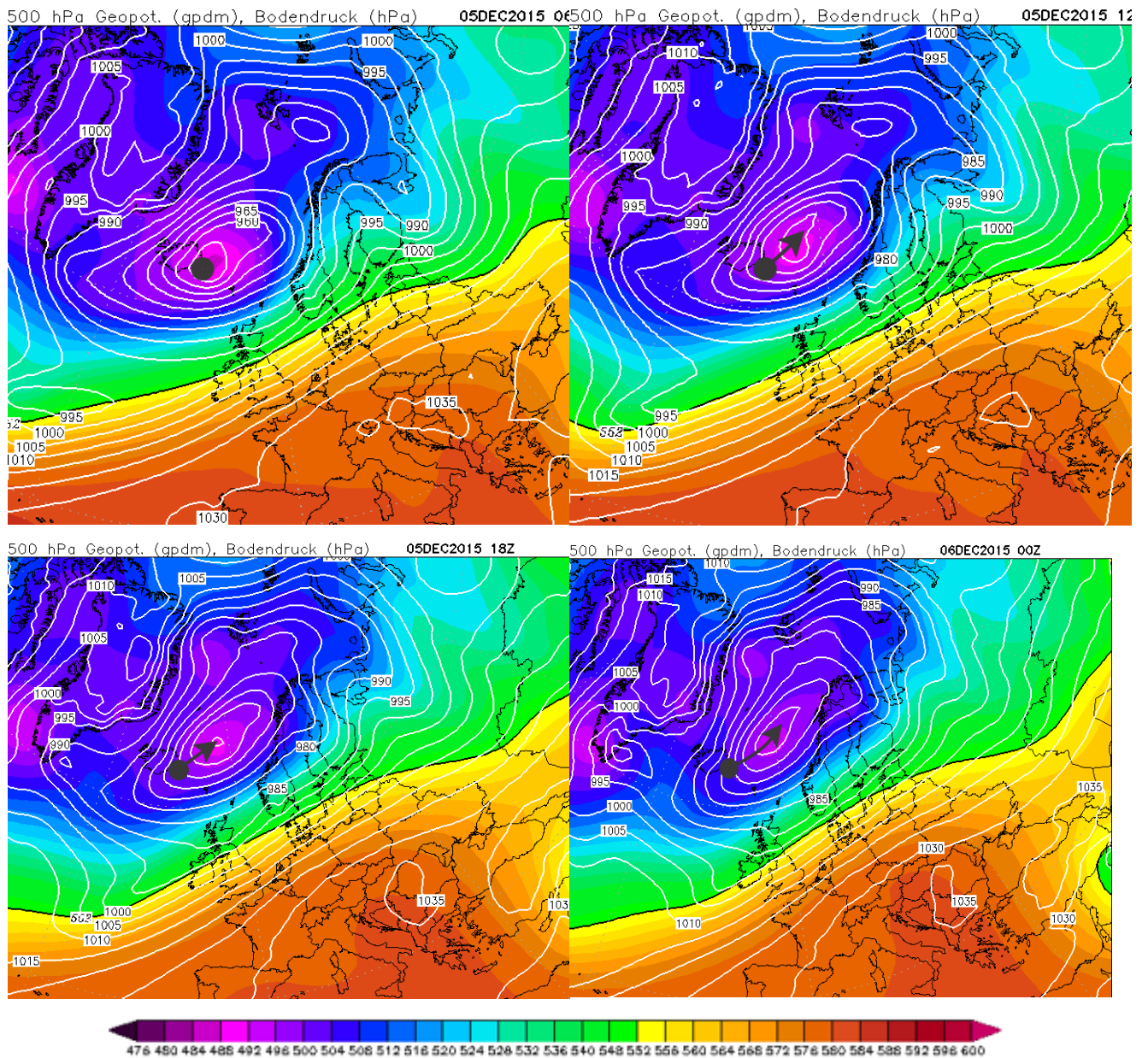


Рисунок 2.6– Траектория перемещения циклона «Десмонд» с 5 по 6 декабря 2015 года

Седьмого декабря 2015 года затворы КЗС все еще были закрыты. Второй прогнозируемый пик подъема воды (+251 сантиметр) пришелся на 4 часа UTC 7 декабря. На протяжении всего дня уровень воды у поста Горный институт превышал отметку в 600 сантиметров. Начиная с 00:00 UTC 7 декабря до 22:00 UTC того же дня он ни разу не опустился ниже 610 сантиметров. В 15:00 он достиг своего пика 659 сантиметров, следовательно, но дальнейшего подъема уровня не случилось. Только спустя шесть часов после своего пика уровень

воды начал постепенно понижаться и лишь к полуночи зафиксировался на отметке в 600 сантиметров. На рисунке 2.7 представлена траектория перемещения циклона, именуемого Десмонд за 6–7 декабря 2015 года с дискретностью 6 часов.

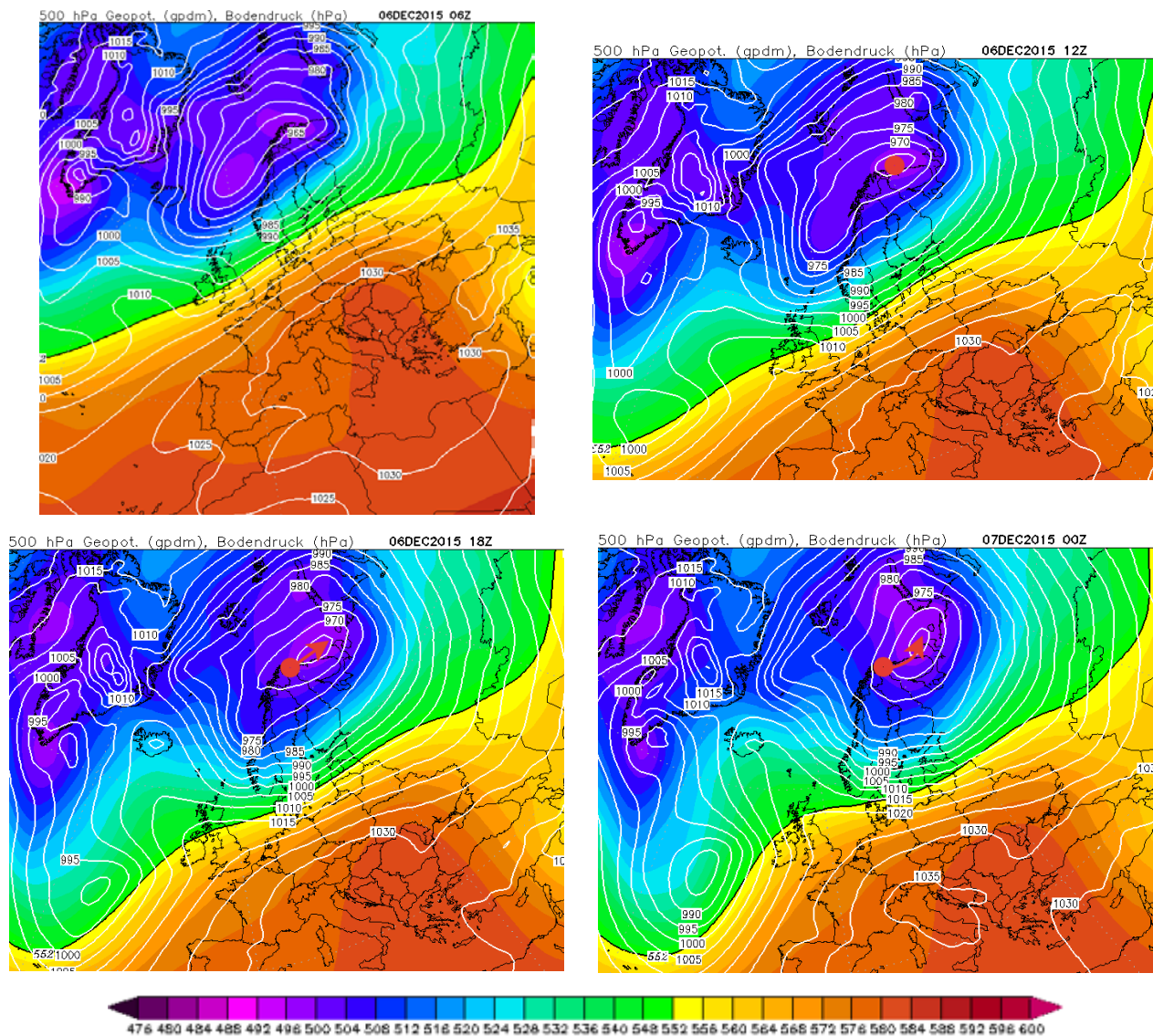


Рисунок 2.7– Траектория перемещения циклона «Десмонд» с 6 по 7 декабря 2015 года

Благодаря своевременно закрытым створам КЗС городу удалось пережить это страшное событие.

Это самое длительное время работы с момента сдачи в эксплуатацию в августе 2011 года. Во время шторма «Десмонд» затворы КЗС находились в положении «закрыто» 41 час [19].

3 Анализ циркуляционных условий формирования сильных наводнений в Санкт-Петербурге

3.1 Постановка цели и задач

С 2011 года в Санкт-Петербурге был введен в эксплуатацию Комплекс защитных сооружений и угроза опасных наводнений, которые так часто вредили жителям и инфраструктуре города, была устранена [12]. Однако, в свете активно меняющегося климата повторяемость невских наводнений повышается. При прогнозируемом повышении уровня воды в реке Нева более чем на 160 см, городские территории иногда подвергаются небольшому подтоплению, даже при закрытых створах КЗС. Например, в 2018 году повышение уровня составило 189 см и в некоторых местах река вышла из берегов. Целью данной работы является анализ повторяемости и условий формирования Невских наводнений в XX и XXI веках. Для решения поставленной цели необходимо решить следующие задачи, а именно:

1. Выявить типы наводнений по интенсивности, которые наносят ущерб жителям и инфраструктуре города;
2. Проанализировать повторяемость Невских наводнений по интенсивности;
3. Исследовать циркуляционные условия формирования наводнений в Санкт-Петербурге за период с 1961 года по 2020 год, включающие в себя 2 базовых климатических периода (с 1961 по 1990 и с 1991 по 2020 гг.).
4. Оценить возможные изменения синоптических ситуаций, характерных подъему уровня реки Нева выше 200 сантиметров в разные годы.
5. Для описанного периода охарактеризовать синоптические условия, сопутствующие подтоплениям городских территорий при прогнозируемых наводнениях.

3.2 Анализ повторяемости Невских наводнений

В ходе работы над исследованием были проанализированы Невские наводнения за период с 1921 по 2020 год. Было принято решение об описании наводнений, которые делятся по интенсивности на следующие градации: *катастрофические* ($h \geq 3$ м), *особо опасные* ($h \geq 2$ м) и *опасные наводнения* ($1,6 \text{ м} \leq h < 2 \text{ м}$), где h – уровень подъема воды. Всего было проанализировано 156 случаев наводнений.

На первом этапе, работа заключалась в том, чтобы проанализировать все виды наводнений, и разделить на *катастрофические*, *опасные* и *особо опасные*, определить их повторяемость, а также уровни подъема воды за 100 лет. Для более наглядного описания периоды были разделены по десятилетиям. Всего выделено 10 периодов. Годы начала и окончания периодов представлены в таблице 3.1.

Таблица 3.1

Разделение периодов по десятилетиям

Нумерация периода	Год начала периода	Год окончания периода
1	1921	1930
2	1931	1940
3	1941	1950
4	1951	1960
5	1961	1970
6	1971	1980
7	1981	1990
8	1991	2000
9	2001	2010
10	2011	2020

3.2.1 Анализ повторяемости особо опасных наводнений по интенсивности

Первоначально выделялись и рассматривались случаи *особо опасных* наводнений, уровень подъема воды, которых в среднем превышал отметку 200 сантиметров, повторяемость случаев приведена в таблице 3.2.

Таблица 3.2

Число случаев *особо опасных* Невских наводнений

Нумерация периода	Десятилетия	Число случаев
1	1921-1930	5
2	1931-1940	5
3	1941-1950	3
4	1951-1960	2
5	1961-1970	3
6	1971-1980	7
7	1981-1990	7
8	1991-2000	5
9	2001-2010	4
10	2011-2020	12

Рассмотрим первый период с 1921 по 1930 г. В данном десятилетии было зафиксировано четыре случая особо опасных наводнений, средний уровень подъема воды которых составил 2,6 м, и один случай катастрофического наводнения. Это затопление, произошедшее 23 сентября 1924 года, вошло в историю как одно из самых крупных наводнений за время существования Санкт-Петербурга (Ленинграда), когда уровень подъема воды составил 3,8 м. Причиной самого крупного наводнения в истории города послужили циклоны, которые пришли с Финского залива и в совокупности с сильным ветром, волны Балтики столкнулись с потоками Невы. Также немалую роль сыграло обильное выпадение осадков. Почва из-за такого большого количества осадков, была переувлажнена, а в следствии чего уровни воды Ладожского озера и Финского

залива были повышены. Поскольку случай *катастрофического* наводнения был всего один, в дальнейшем эта категория наводнения по интенсивности не рассматривалась, а большее внимание было уделено *особо опасным* и *опасным* наводнениям.

Во втором периоде с 1931 по 1940 гг. также было зафиксировано пять случаев особо опасных наводнений. Осредненный уровень воды за сутки составил 2,28 метров, максимальный уровень воды – 2,39 м.

В третий период, а именно в промежуток времени с 1941 по 1950 г. насчитывалось три случая подъема уровня воды превышающих отметку в 200 сантиметров. Все подтопления были одинаковы, разница которых между собой составляла всего 3–4 сантиметра. Средний уровень подъема воды в этот период десятилетия составил 2,15 м, максимальный – 2,16 м.

Четвертый период 1951-1960 г. для города оказался довольно спокойным. Зафиксированных наводнений, превышающих отметку 2 метра, было всего лишь два случая в 1954 и 1955 годах. Но даже несмотря на столь спокойную статистику за эти 10 лет, в 1955 году уровень воды в реке Нева практически достиг отметки 300 см, и не стал катастрофическим. Данное затопление вошло в пятерку самых сильных наводнений за всю историю города. Средний уровень подъема воды в этот период десятилетия составил 2,58 м, максимальный – 2,93 м.

Для пятого периода 1961-1970 гг. уровень воды и его критические отметки поднялись к концу десятилетия, самым мощным из трех случаев особо опасных наводнений стало наводнение, произошедшее в 1967 году, когда уровень воды превысил 240 сантиметров, а его пик обозначился на отметке 245 сантиметров. Средний уровень подъема воды в этот период десятилетия составил 2,21 м, максимальный – 2,45 м.

Шестой период (1971-1980 г.) является одним из двух десятилетий за двадцатый век, в который насчитывается рекордное количество наводнений, а именно семь случаев, один из которых в 1975 году так же вошел в пятерку

самых мощных затоплений за все время наблюдений. Средний уровень подъема воды в этот период десятилетия составил 2,31 м, максимальный – 2,81 м.

В десятилетии 1981–1990 г., за седьмой период город пережил семь случаев наводнений с отметкой уровня воды выше 200 см. Средний уровень подъема воды в этот период десятилетия составил 2,21 м, максимальный – 2,6 м.

В восьмой период, за 1991-2000 г. было зафиксировано пять случаев особо опасных наводнений. Средний уровень подъема воды в этот период десятилетия составил 2,26 м, максимальный – 2,64 м.

В девятый период с 2001 по 2010 г. зафиксировано четыре случая особо опасных наводнения. Средний уровень подъема воды в этот период десятилетия составил 2,26 м, максимальный – 2,39 м.

Рассмотрим, последний в этом исследовании, десятый период за 2011–2020 г. Этот период несколько отличается от других, поскольку в 2011 году был введен в эксплуатацию Комплекс защитных сооружений от Невских наводнений. Благодаря комплексу все возможные особо опасные наводнения, спрогнозированные для данного десятилетия были предотвращены. Было спрогнозировано 12 случаев превышения уровня воды со средним показателем – 2,43 м, а максимальным – 2,94 м.

В таблице 3.3 приведены уровни подъема воды при случаях *особо опасных* наводнений, а также средний и максимальный уровни за период десятилетия. Для периодов с 1 по 9 приведены наблюдаемые значения уровня подъема воды, а для 10 периода за 2011–2020 гг. для сравнения только прогнозируемые значения, которые бы наблюдались в городе Санкт-Петербург при отсутствии Комплекса защитных сооружений. Для удобства визуализации последний период выделен.

Уровень подъема воды при *особо опасных* Невских наводнениях в Санкт-Петербурге в период с 1921 г. по 2020 г.

Номер периода	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
Десятилетия	1921-1930 гг.	1931-1940 гг.	1941-1950 гг.	1951-1960 гг.	1961-1970 гг.	1971-1980 гг.	1981-1990 гг.	1991-2000 гг.	2001-2010 гг.	2011-2020 гг.	
Уровень подъема воды, м	Случаи	2,11	2,03	2,16	2,22	2,03	2,4	2,16	2,04	2,15	2,05
		2,28	2,39	2,12	2,93	2,14	2,42	2,15	2,19	2,39	2,6
		3,8	2,3	2,16		2,45	2,16	2,01	2,27	2,24	2,94
		2,25	2,37				2,81	2,31	2,14	2,25	2,67
		2,58	2,33				2,31	2,16	2,64		2,12
							2,04	2,07			2,48
							2,0	2,6			2,4
											2,68
											2,3
											2,51
											2,07
									2,36		
Средний уровень подъема воды за 10 лет, м	2,60	2,28	2,15	2,58	2,21	2,31	2,21	2,26	2,26	2,43	
Максимальный уровень подъема воды за 10 лет, м	3,8	2,39	2,16	2,93	2,45	2,81	2,6	2,64	2,39	2,94	

Для сравнения на рисунке 3.1 приведены данные уровня подъема воды на реке Нева за 100 лет. Цветом обозначены случаи за периоды десятилетия. Анализируя данный рисунок и значения из таблицы 3.3 можно сделать вывод о том, что после 1970 года и в последующие десятилетия повторяемость особо опасных наводнений возросла. Увеличение повторяемости, а также повышение уровня подъема воды, связано с глобальным потеплением в эти периоды, а также не мало важным фактором стало увеличение числа случаев западной формы циркуляции.

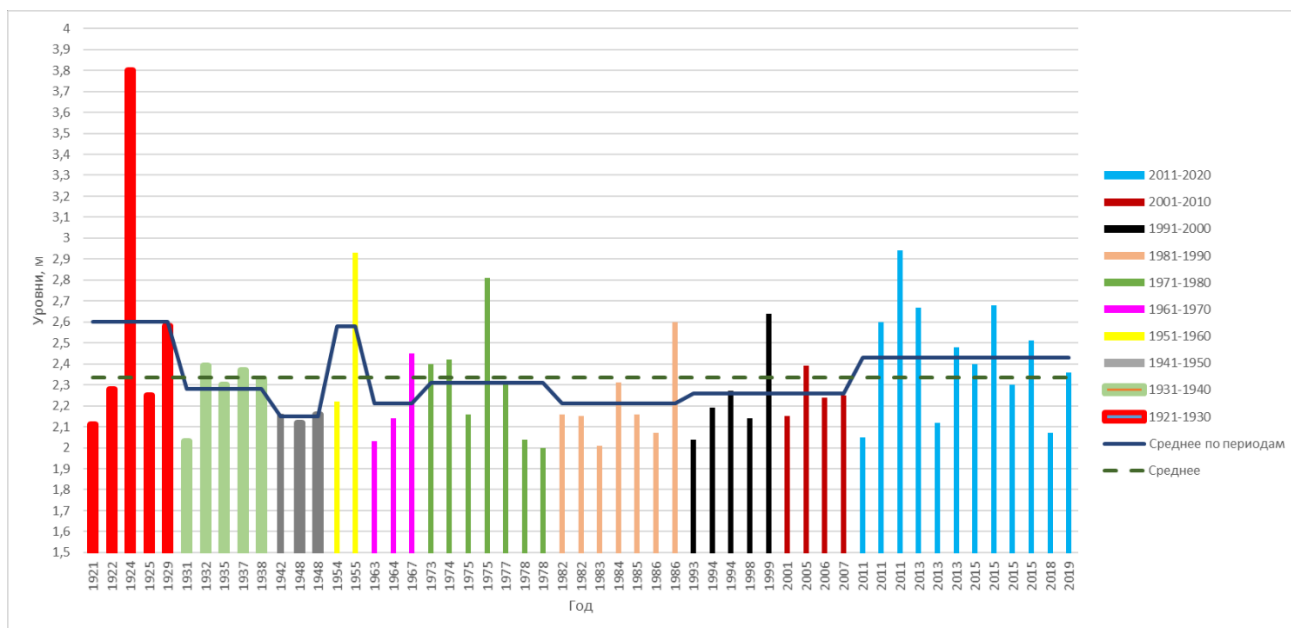


Рисунок 3.1 – Уровень подъема воды выше 200 см на реке Нева за 100 лет.
Цветом обозначены случаи за периоды десятилетия

Для десятого периода с 2011 по 2020 гг. проводилось сравнение прогностического значения уровня воды, которое могло бы наблюдаться при отсутствии КЗС, и фактического максимального уровня воды, наблюдаемое в месяц прогнозируемого наводнения. В таблице 3.4 приведено ожидаемое превышение значения уровня воды и фактическое максимальное значение уровня за месяц, наблюдаемое относительно ординара поста Горный институт за период с 2011 по 2020 гг.

Ожидаемое превышение уровня подъема воды выше 200 см и фактическое значение уровня воды в г. Санкт-Петербург относительно ординара поста Горный Институт в период с 2011 по 2020 гг.

Год	Дата	Прогнозируемый уровень воды, м	Максимальный уровень воды за месяц, м
2011	26.ноя	2,05	1,44
	26.дек	2,6	1,68
	27.дек	2,94	
2013	29.окт	2,67	1,20
	17.ноя	2,12	1,35
	13.дек	2,48	1,44
2015	03.январь	2,4	1,37
	05.дек	2,68	1,59
	06.дек	2,3	
	07.дек	2,51	
2018	26.сен	2,07	1,79
2019	19.дек	2,36	1,09

Анализируя таблицу 3.4, можно сделать вывод о том, что благодаря комплексу защитных сооружений все прогнозируемые особо опасные наводнения удалось избежать, но в 2011, 2015 и 2018 годах наблюдались незначительные подтопления, так как уровень воды поста Горный институт превышал отметку 150 сантиметров выше ординара.

3.2.2 Анализ повторяемости опасных наводнений по интенсивности

На следующем этапе были проанализированы *опасные* наводнения по интенсивности, уровень воды которых колеблется от 160 до 199 сантиметров, повторяемость случаев приведена в таблице 3.5.

Число случаев *опасных* Невских наводнений

Нумерация периода	Десятилетия	Число случаев
1	1921-1930	8
2	1931-1940	7
3	1941-1950	6
4	1951-1960	7
5	1961-1970	7
6	1971-1980	13
7	1981-1990	14
8	1991-2000	4
9	2001-2010	10
10	2011-2020	13

Рассмотрим первый период с 1921 по 1930 г. В данном десятилетии было зафиксировано восемь случаев опасных наводнений. Средний уровень подъема воды в этот период десятилетия составил 1,81 м, максимальный – 1,97 м.

Во втором периоде с 1931 по 1940 г. также было зафиксировано семь случаев опасных наводнений. Осредненный уровень воды за сутки составил 1,76 метров, а максимальный уровень воды – 1,91 м.

В третий период, а именно в промежуток времени с 1941 по 1950 г. насчитывалось шесть случая подъема уровня воды, уровень которых колебался от 160 до 199 см. Средний уровень подъема воды в этот период десятилетия составил 1,82 м, максимальный – 1,96 м.

В четвертый период 1951-1960 г наблюдалось семь случаев опасных наводнений. Средний уровень подъема воды в этот период десятилетия составил 1,79 м, максимальный – 1,98 м.

Для пятого периода 1961-1970 г. опасных наводнения насчитывалось также, как и в предыдущий четвертый период – семь, средний уровень подъема воды составил 1,75 м, максимальный – 1,89 м.

Шестой период (1971-1980 г.) является одним из двух десятилетий за двадцатый век, в который насчитывается рекордное количество наводнений, а именно тринадцать случаев. Средний уровень подъема воды в этот период десятилетия составил 1,74 м, максимальный – 1,95 м.

Десятилетие 1981–1990 г., а именно седьмой период считается вторым периодом, когда наблюдалось рекордное количество опасных подтоплений города. Санкт–Петербург пережил четырнадцать случаев наводнений с максимальной отметкой уровня воды, достигающей почти 2 метра. Средний уровень подъема воды в этот период десятилетия составил 1,78 м, максимальный – 1,99 м.

В восьмой период, за 1991-2000 г. было зафиксировано четыре случая опасных наводнений. Средний уровень подъема воды в этот период десятилетия составил 1,71 м, максимальный – 1,84 м.

В девятый период с 2001 по 2010 г. зафиксировано также аномально много случаев опасных наводнений – 10, где максимальная отметка уровня воды почти достигла отметки для особо опасного наводнения. Средний уровень подъема воды в этот период десятилетия составил 1,81 м, максимальный – 1,99 м.

Рассмотрим, последний в этом исследовании, десятый период за 2011–2020 г. Этот период, как было писано ранее, отличается от других, поскольку в 2011 году был введен в эксплуатацию Комплекс защитных сооружений от Невских наводнений. Благодаря комплексу все возможные наводнения, спрогнозированные для данного десятилетия были предотвращены. Было спрогнозировано 13 случаев превышения уровня воды со средним показателем – 1,76 м, а максимальным – 1,96 м.

Для сравнения на рисунке 3.3 приведены данные уровня подъема воды в пределах от 166 до 199 см на реке Нева за 100 лет. Цветом обозначены случаи за периоды десятилетия.

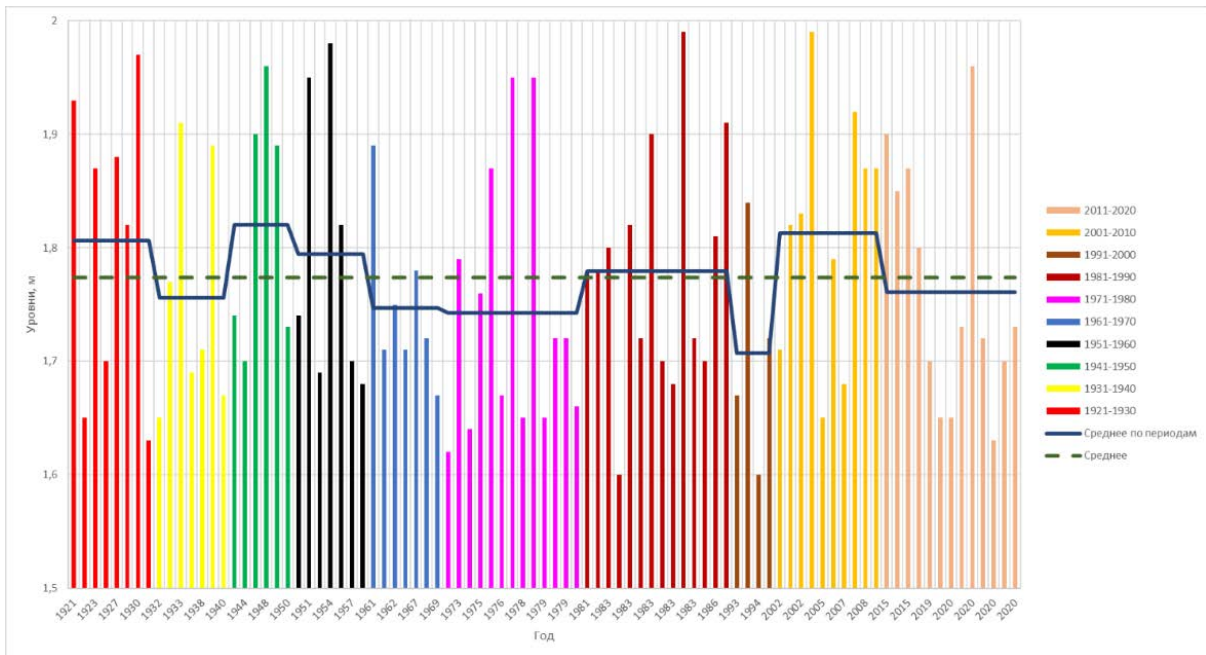


Рисунок 3.2 – Уровень подъема воды в пределах 166 – 199 см на реке Нева за 100 лет. Цветом обозначены случаи за периоды десятилетия

В таблице 3.6 приведены уровни подъема воды при случаях *опасных* наводнений, а также средний и максимальный уровни за период десятилетия. Для периодов с 1 по 9 приведены наблюдаемые значения уровня подъема воды, а для 10 периода за 2011–2020 гг. для сравнения только прогнозируемые значения, которые бы наблюдались в городе Санкт-Петербург при отсутствии Комплекса защитных сооружений. Для удобства визуализации последний период выделен.

Исходя из вышеприведенного графика на рисунке 3.3 и значений из таблицы 3.6 можно сделать вывод о том, что после 1970 года и в последующие десятилетия повторяемость *опасных* наводнений, как и рассматриваемых ранее *особо опасных*, возросла. Увеличение повторяемости и уровня воды на реке связано с глобальным потеплением в эти периоды, а также немало важным фактором стало увеличение числа случаев западной формы циркуляции. Также можно отметить, что наибольшее количество опасных наводнений произошло в период с 1981 по 1990 год (14 случаев), а наименьшее с 1991 по 2000 года (4 случая). В среднем уровень превышения составил 1,77 м.

Уровень подъема воды при *опасных* Невских наводнениях в Санкт-Петербурге
в период с 1921 г. по 2020 г.

Номер периода	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	
Десятилетия	1921-1930 гг.	1931-1949 гг.	1941-1950 гг.	1951-1960 гг.	1961-1970 гг.	1971-1980 гг.	1981-1990 гг.	1991-2000 гг.	2001-2010 гг.	2011-2020 гг.	
Уровень подъема воды, м	Случаи	1,93	1,65	1,74	1,74	1,89	1,62	1,78	1,67	1,71	1,9
		1,65	1,77	1,7	1,95	1,71	1,79	1,78	1,84	1,82	1,85
		1,87	1,91	1,9	1,69	1,75	1,64	1,8	1,6	1,83	1,87
		1,7	1,69	1,96	1,98	1,71	1,76	1,6	1,72	1,99	1,8
		1,88	1,71	1,89	1,82	1,78	1,87	1,82		1,65	1,7
		1,82	1,89	1,73	1,7	1,72	1,67	1,72		1,79	1,65
		1,97	1,67		1,68	1,67	1,95	1,9		1,68	1,65
		1,63					1,65	1,7		1,92	1,73
							1,95	1,68		1,87	1,96
							1,65	1,99		1,87	1,72
							1,72	1,72			1,63
							1,72	1,7			1,7
							1,66	1,81			1,73
								1,91			
Средний уровень подъема воды за 10 лет, м	1,81	1,76	1,82	1,79	1,75	1,74	1,78	1,71	1,81	1,76	
Максимальный уровень подъема воды за 10 лет, м	1,97	1,91	1,96	1,98	1,89	1,95	1,99	1,84	1,99	1,96	

Для десятого периода с 2011 по 2020 гг. проводилось сравнение прогностического значения уровня воды в пределах отметки от 166 до 199 см, которое могло бы наблюдаться при отсутствии КЗС, и фактического, которое наблюдалось, что изображено в таблице 3.7.

Анализируя таблицу 3.7 за период с 2011 по 2020 гг. можно отметить, благодаря КЗС все опасные прогнозируемые наводнения были успешно предотвращены.

Ожидаемое превышение значения уровня воды в пределах от 166 до 199 см и фактическое значение уровня воды в г. Санкт-Петербург относительно ординара поста Горный Институт в период с 2011 по 2020 гг.

Год	Дата	Прогнозируемый уровень воды, м	Максимальный уровень воды за месяц, м
2015	13.январь	1,9	1,37
	10.декабрь	1,85	1,59
	25.декабрь	1,87	
2019	09.март	1,8	1,08
	15.сентябрь	1,7	1,24
	01.октябрь	1,65	1,24
2020	06.февраль	1,65	1,47
	18.февраль	1,73	
	23.февраль	1,96	
	24.февраль	1,72	
	13.март	1,63	1,35
	10.сентябрь	1,7	1,55
	13.сентябрь	1,73	

На основе приведённых выше исследований по описанию *опасных* и *особо опасных* наводнений, можно сделать вывод о том, что после 1970 года повторяемость случаев *опасных* и *особо опасных* наводнений увеличилась, поскольку глобальное потепление оказывает немаловажную роль на формирование циркуляционных особенностей над умеренными широтами и влияет на подъем уровня воды в реке Нева. Благодаря введению в эксплуатацию Комплекса защитных сооружений, опасные и особо опасные наводнения с 2011 по 2020 гг. удалось предотвратить.

Однако, в свете активно меняющегося климата повторяемость Невских наводнений повышается. При прогнозируемом повышении уровня воды в реке Нева от 150 до 160 см, городские территории иногда подвергаются небольшим подтоплениям, даже при закрытых створах КЗС. Следовательно, в дальнейшем требуется прогнозирование уровня воды в реке для предотвращения наводнений, которые могут возникнуть, даже при закрытых створах КЗС.

3.3 Анализ траекторий движения барических образований и синоптических ситуаций при Невских наводнениях

Следующим этапом являлся анализ движения различных барических образований, которые непосредственно влияют на формирование сильных наводнений, и описание синоптических ситуаций, которые влияют на формирование Невских наводнений.

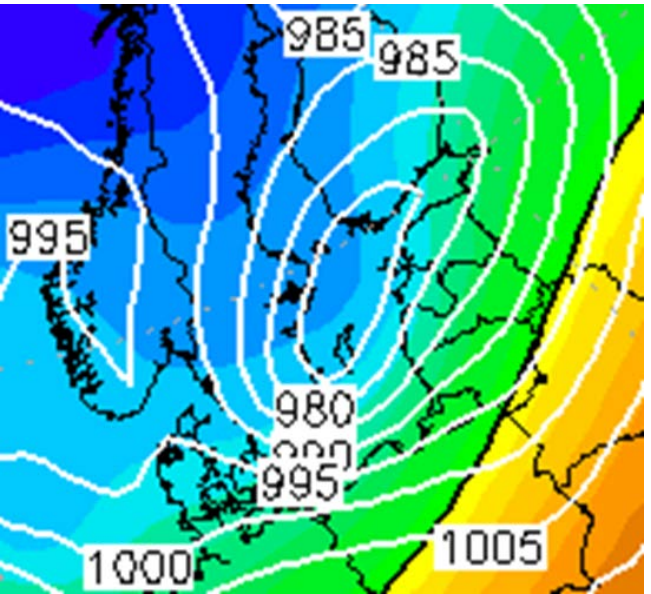
В ходе работы над исследованием случаи наводнений были разделены на две группы: *опасные* и *особо опасные* наводнения. В первом случае уровень подъема воды у поста Горный Институт имел отметку от 160 до 199 сантиметров. Второй тип наводнений превышал отметку более 200 сантиметров.

При анализе синоптических условий их формирования были выделены несколько наиболее характерных ситуаций барических образований, а именно: ложбина с центром над Северно-Ледовитым океаном, ложбина с центром над Кольским полуостровом, циклон с центром над «горлом» Ботнического залива и циклон с центром над Центральной Балтикой.

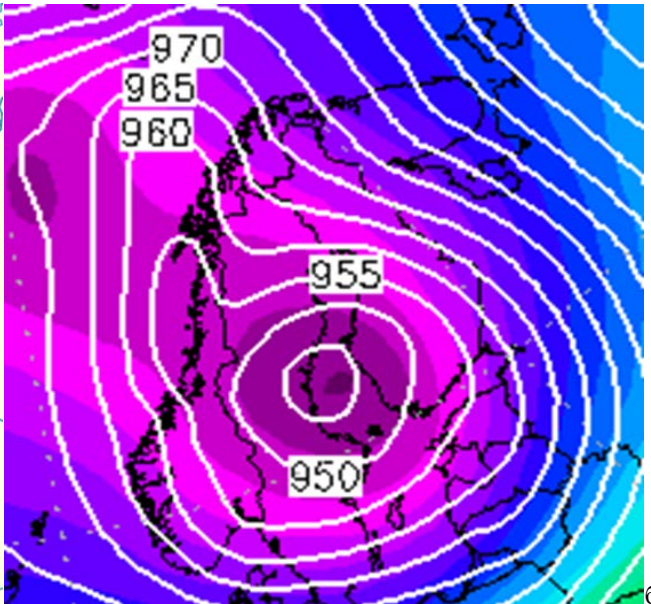
3.3.1 Анализ траекторий движения барических образований и синоптических ситуаций при особо опасных наводнениях

Первоначально был рассмотрен **первый базовый** период с 1961 по 1990 гг. со случаями *особо опасных* наводнений в городе Санкт-Петербург на реке Нева. Всего наблюдалось 17 случаев с превышением подъема уровня воды более двух метров.

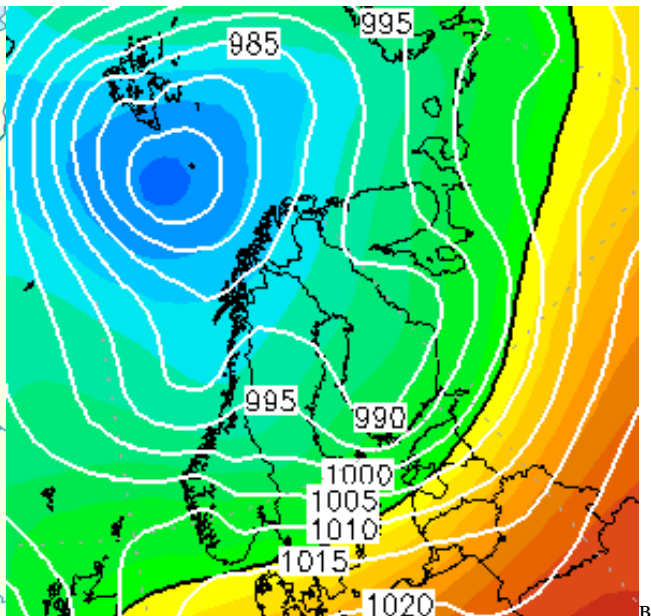
На рисунке 3.3 изображены траектории барических образований при *особо опасных* наводнениях в первый базовый период с 1961 по 1990 гг., с помощью приземных карт по данным реанализа NOAA [22].



a



b



B

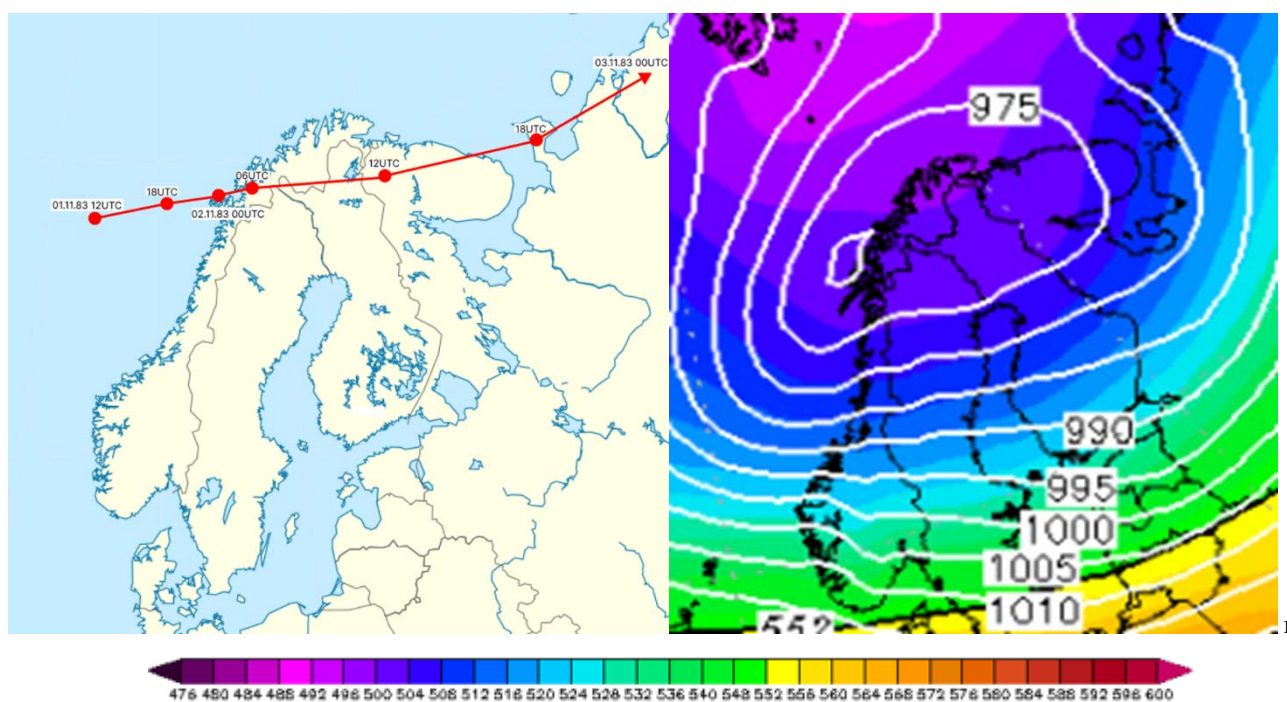


Рисунок 3.3 – Траектории перемещения барических образований и синоптические ситуации над регионом исследования за первый базовый период (а – циклон с центром над Центральной Балтикой; б – циклон с центром над «горлом» Ботнического залива; в – ложбина с центром над Северно-Ледовитым океаном; г – ложбина с центром над Кольским полуостровом) [22]

На рисунке 3.3 (а) изображена траектория циклона, который стал причиной наводнения 18 октября 1967 года. Центр циклона образовавшийся над Северным морем, продолжил свое движение в направлении Стокгольма, затем прошел над центром Балтийского моря и устремился в акваторию Финского залива. Сформировавшаяся, в результате циклонической активности, длинная волна выходит на побережье Санкт-Петербурга. За сутки, расстояние, которое прошел циклон, составило 2000 км. Уровень подъема воды у поста Горный институт в этот день составил 2,45 метров выше ординара.

Рисунок 3.3 (б) демонстрирует, что циклон, ставший причиной наводнения 17 декабря 1982 года, двигается от Норвежского моря вплоть до Санкт-Петербурга, проходя над Норвегией, Швецией, пересекая Ботнический залив. За один день циклон прошел расстояние в 1300 км. Уровень воды у поста Горный институт поднялся до отметки 215 сантиметров выше ординара.

Рисунок 3.3 (в) иллюстрирует глубокую ложбину, которая образовалась из-за циклона с центром, проходящим по Норвежскому морю, практически параллельно побережью Норвегии. Данная ложбина и стала причиной наводнения в Санкт-Петербурге 29 сентября 1975 года. За сутки, расстояние, которое прошел циклон, составило 800 км. В этот день уровень воды поднялся на 281 сантиметр выше ординара.

На рисунке 3.3 (г), изображен циклон с центром, проходящим над Кольским полуостровом. Данный циклон сформировал глубокую ложбину, приведшую к подъему уровня воды 3 ноября 1983 года до отметки 201 сантиметр у поста Горный институт. За сутки циклон прошел расстояние в 1000 км.

В таблице 3.8 представлена оценка повторяемости траекторий перемещения барических образований при особо опасных наводнениях с 1961 по 1990 гг. в процентном соотношении от всех наблюдаемых случаев за данный период.

Анализируя таблицу 3.8 можно сделать вывод о том, что наибольшую повторяемость барических образований имел циклон с центром, проходящим над Центральной Балтикой от Стокгольма до Санкт-Петербурга. За первый базовый период при особо опасных наводнениях данный тип траектории перемещения барических образований составил 53 % от общего количества рассматриваемых случаев. Повторяемость барических образований в 23 % случаев от всех рассматриваемых, представленных в таблице 3.8, имеет циклон с центром над «горлом» Ботнического залива. Повторяемость циклона с центром над Кольским полуостровом, формирующего ложбину в районе центральной Балтики составила 18 % от всех случаев. Единожды (6 %) за первый базовый период наводнение было вызвано ложбиной с центром циклона над Северно-Ледовитым океаном.

Повторяемость траекторий перемещения барических образований при
особо опасных наводнениях с 1961 по 1990 гг.

Барическое образование	Дата	Уровень, м	Число случаев, %
Циклон с центром над Центральной Балтикой	17.11.1963	2,03	53
	14.12.1964	2,14	
	18.10.1967	2,45	
	17.11.1974	2,42	
	07.09.1977	2,31	
	25.11.1982	2,16	
	26.12.1985	2,16	
	02.12.1986	2,07	
	06.12.1986	2,60	
Циклон с центром над «горлом» Ботнического залива	06.01.1975	2,31	23
	15.11.1978	2,04	
	17.12.1982	2,15	
	01.01.1984	2,16	
Ложбина с центром циклона над Северно-Ледовитым океаном	29.09.1975	2,01	6
Ложбина с центром циклона над Кольским полуостровом	20.12.1973	2,00	18
	19.11.1978	2,40	
	03.11.1983	2,81	

Далее был рассмотрен **второй базовый** период с 1991 по 2020 гг., поскольку за этот промежуток времени изменилась климатическая ситуация. Всего наблюдался 21 случай с превышением подъема уровня воды более двух метров.

На рисунке 3.4 изображены барические образования при особо опасных наводнениях во второй базовый период с 1991 по 2020 гг. с помощью приземных карт по данным реанализа NOAA [22].

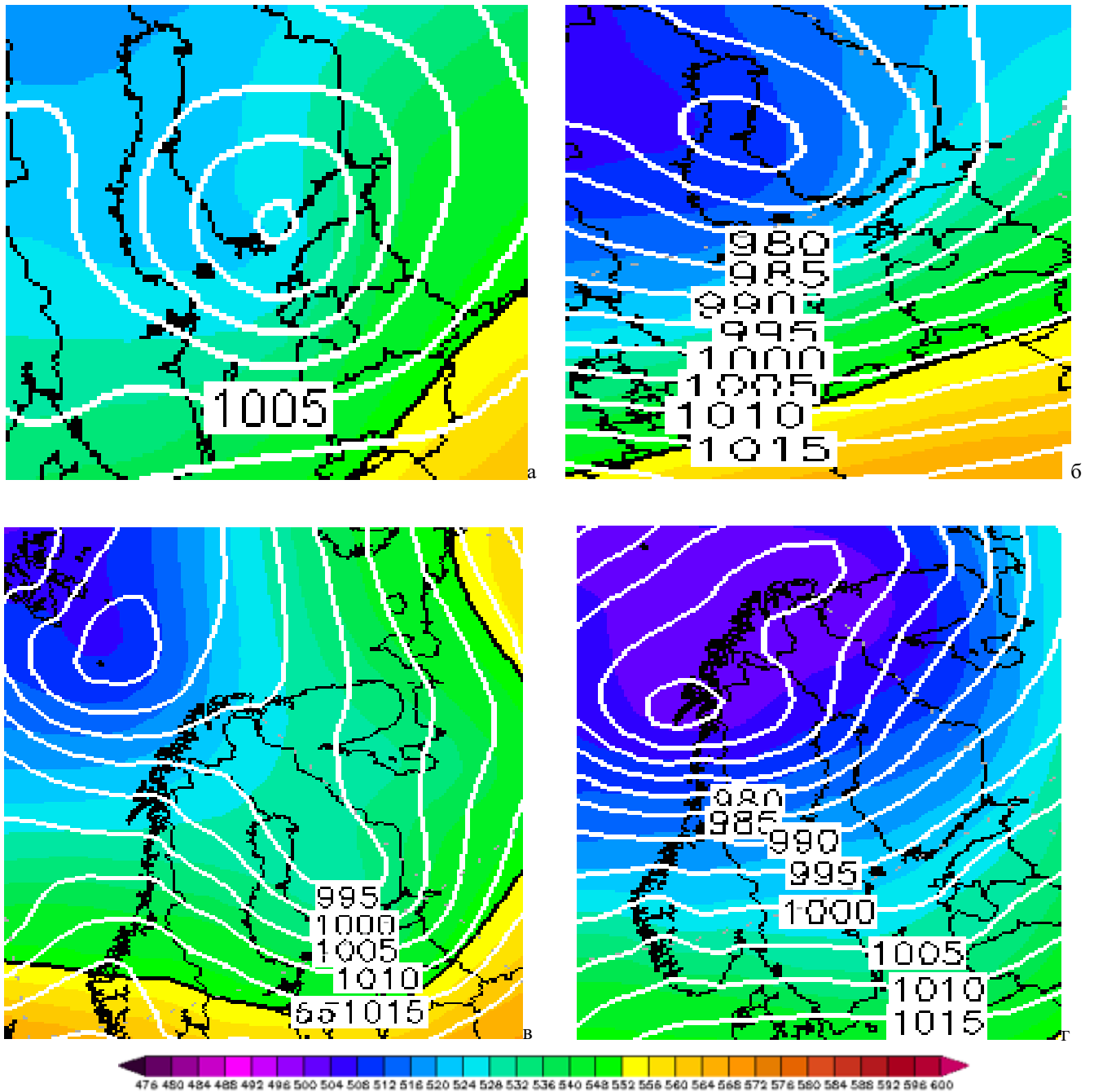


Рисунок 3.4 – Синоптические ситуации образований над регионом исследования за второй базовый период

(а – циклон с центром над Центральной Балтикой; б – циклон с центром над «горлом» Ботнического залива; в – ложбина с центром над Северно-Ледовитым океаном; г – ложбина с центром над Кольским полуостровом) [22]

На рисунке 3.4 (а), изображен циклон, расположенный над центральной Балтикой 18 декабря 2019 года 12 UTC. Сформировавшаяся, в результате циклонической активности, длинная волна выходит на побережье Санкт-

Петербурга, но благодаря закрытым створам КЗС, прогнозируемое наводнение 19 декабря 2019 года удалось избежать.

Рисунок 3.4 (б) демонстрирует циклон, пересекающий Ботнический залив 2 января 2015 года 12 UTC, который стал причиной наводнения 3 января 2015 года.

Рисунок 3.4 (в), иллюстрирует глубокую ложбину, с центром циклона, проходящим по Северно-Ледовитому океану 12 октября 1994 года 06 UTC. Данная ложбина и стала причиной наводнения в Санкт-Петербурге 12 октября 1994 года.

На рисунке 3.4 (г), изображен циклон с центром над Кольским полуостровом 26 ноября 2011 года 06 UTC. Данный циклон сформировал глубокую ложбину, которая могла стать очередной причиной повышения уровня воды в реке Нева 26 ноября 2011 года, но благодаря КЗС, подтопления удалось избежать.

В таблице 3.9 представлена оценка повторяемости траекторий перемещения барических образований, которые привели и могли привести к особо опасным наводнениям с 1991 по 2020 гг.

Анализируя таблицу 3.9 можно сделать вывод о том, что наибольшую повторяемость траекторий перемещения барических образований с 1991 по 2020 гг. имели такие системы как: циклон центр которого проходит над Центральной Балтикой 33 % и циклон с центром над «горлом» Ботнического залива 29 % от всех зафиксированных случаев. Ложбина, сформировавшаяся в результате циклона с центром, проходящим на Северно-Ледовитым океаном встречалась в 24 % случаев за второй базовый период, а ложбина с центром циклона над Кольским полуостровом в 14 %.

Таблица 3.9

Оценка повторяемости траекторий перемещения барических образований при
особо опасных наводнениях с 1991 по 2010 гг.

Барическое образование	Дата	Уровень, м	Число случаев, %
Циклон с центром над Центральной Балтикой	02.10.1994	2,19	33
	19.10.1998	2,14	
	09.01.2005	2,39	
	28.10.2006	2,24	
	29.10.2013	2,67	
	05.12.2015	2,68	
	19.12.2019	2,36	
Циклон с центром над «горлом» Ботнического залива	23.01.1993	2,04	29
	30.11.1999	2,64	
	15.11.2001	2,15	
	10.01.2007	2,25	
	13.12.2013	2,48	
	03.01.2015	2,4	
Ложбина с центром циклона над Северно-Ледовитым океаном	12.10.1994	2,27	24
	26.12.2011	2,6	
	27.12.2011	2,94	
	06.12.2015	2,3	
	07.12.2015	2,51	
Ложбина с центром циклона над Кольским полуостровом	26.11.2011	2,05	14
	17.11.2013	2,12	
	26.09.2018	2,07	

Сделав анализ таблицы 3.9 можно сказать, что такие синоптические образования как, циклон с центром, проходящим над Центральной Балтикой, циклон с центром, проходящим над «горлом» Ботнического залива и ложбины с

центром циклона, проходящим над Кольским полуостровом и над Северо-Ледовитым океаном, оказывают влияние на повышение уровня воды на реке Нева. Поскольку в последнее десятилетие был введен в эксплуатацию комплекс защитных сооружений, то с 2011 по 2020 гг. наблюдались лишь незначительные подтопления некоторых городских территорий, а прогнозируемые наводнения были успешно предотвращены.

Сравнивая таблицы 3.8 и 3.9 можно подвести итог о том, что большинство атмосферных циркуляций, которые влияют на климатическую характеристику и приводят к превышению уровня воды, а в дальнейшем к *особо опасным* наводнениям на реке Нева в г. Санкт-Петербург, являются циклоны, центр которых проходит над горлом Ботнического залива и над Центральной Балтикой. Так же влияние на климатическую характеристику, хоть и с меньшей повторяемостью, оказывают ложбины с центром циклона, проходящим над Северо-Ледовитым океаном и над Кольским полуостровом.

Следует отметить, что во втором базовом периоде увеличилась повторяемость траекторий барических образований с центром циклона, движущимся над горлом Ботнического залива и уменьшилась, по сравнению с первым базовым периодом, повторяемость циклона, центр которого проходит по центральной Балтике от Стокгольма до Санкт-Петербурга.

3.3.2 Анализ синоптических ситуаций при опасных наводнениях

В этом подразделе рассматривается вторая категория наводнений, где уровень подъема воды у поста Горный Институт колеблется от 160 до 199 сантиметров. Также, как и для *особо опасных* наводнений были выделены два базовых периода: первый – с 1961 по 1990 год с количеством случаев – 34 и второй период – с 1991 по 2020 год с количеством случаев – 27.

При анализе синоптических условий их формирования были выделены несколько наиболее характерных ситуаций барических образований, а именно: ложбина с центром над Северно-Ледовитым океаном, ложбина с центром над

Кольским полуостровом, циклон с центром над «горлом» Ботнического залива и циклон с центром над Центральной Балтикой.

Рассматривая **первый базовый** период с 1961 по 1990 гг. со случаями *опасных* наводнений в городе Санкт-Петербург на реке Нева. На рисунке 3.5 изображены барические образования при *опасных* наводнениях в первый базовый период с 1961 по 1990 гг. с помощью приземных карт по данным реанализа NOAA [22].

На рисунке 3.5 (а), изображен циклон, движущийся через Норвегию, Стокгольм и Балтийское море 30 марта 1961 года 06 UTC. Сформировавшаяся, в результате циклонической активности, длинная волна вышла на побережье Санкт-Петербурга и 31 марта 1961 года привела к наводнению.

Рисунок 3.5 (б), демонстрирует, что центр циклона, ставшего причиной наводнения 20 октября 1983 года, пересекает Ботнический залив 19 октября 1983 года 18 UTC.

Рисунок 3.5 (в), иллюстрирует глубокую ложбину в районе Балтийского моря и Ботнического залива, образовавшуюся в результате циклона с центром, проходящим вдоль побережья Скандинавии 26 сентября 1983 года 00 UTC. Данная ложбина и стала причиной наводнения в Санкт-Петербурге 26 сентября 1983 года.

На рисунке 3.5 (г), изображен циклон с центром, проходящим над Кольским полуостровом 22 октября 1983 года 12 UTC. Данный циклон сформировал глубокую ложбину, приведшую к наводнению 22 октября 1983 года.

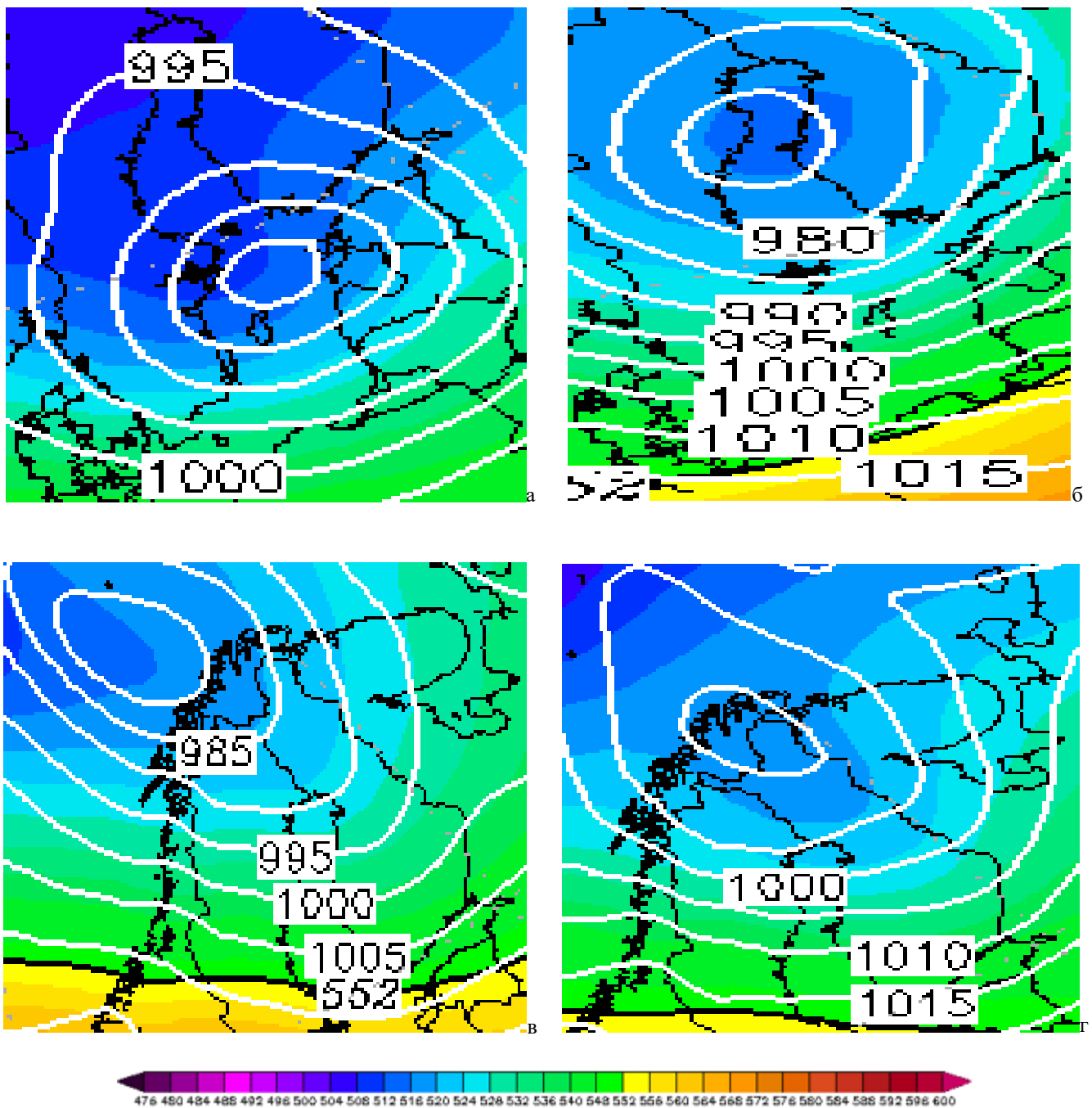


Рисунок 3.5 – Синоптические ситуации над регионом исследования за первый базовый период

(а – циклон с центром над Центральной Балтикой; б – циклон с центром над «горлом» Ботнического залива; в – ложбина с центром над Северно-Ледовитым океаном; г – ложбина с центром над Кольским полуостровом) [22]

В таблице 3.10 представлена повторяемость траекторий перемещения барических образований при *опасных* наводнениях с 1961 по 1990 гг. Анализируя таблицу 3.10 можно сделать вывод о том, что наибольшую повторяемость барических образований имел циклон с центром, проходящим

от над Ботническим заливом. За первый базовый период при опасных наводнениях данный тип траектории перемещения барических образований в процентном соотношении от всех рассматриваемых случаев наблюдался 41 % случаев. Повторяемость барических образований в количестве 21 % случаев, представленных в таблице 3.10, имеет циклон с центром, проходящим над центральной Балтикой. В 12 % случаев *опасные* наводнения в Санкт-Петербурге были вызваны глубокой ложбиной с центром циклона, проходящим над Северно-Ледовитым океаном. В 26 % случаев к наводнениям приводила глубокая ложбина с центром циклона над Кольским полуостровом.

Характерным отличием от первого базового периода при особо опасных наводнениях стало то, что опасные наводнения чаще всего происходят из-за циклонов, центры которых проходят над Ботническим заливом и Кольским полуостровом.

Таблица 3.10

Повторяемость траекторий перемещения барических образований при *опасных* наводнениях с 1961 по 1990 гг.

Барическое образование	Дата	Уровень, м	Число случаев, %
Циклон с центром над Центральной Балтикой	31.03.1961	1,89	21
	13.09.1962	1,75	
	19.10.1967	1,78	
	11.11.1969	1,67	
	10.10.1973	1,79	
	21.10.1981	1,78	
	04.01.1984	1,7	
Циклон с центром над «горлом» Ботнического залива	07.12.1961	1,71	41
	14.10.1967	1,71	
	30.10.1968	1,72	
	11.12.1971	1,62	
	11.01.1975	1,64	
	08.01.1976	1,67	
	14.09.1979	1,95	
	14.01.1983	1,78	

Барическое образование	Дата	Уровень, м	Число случаев, %
	21.01.1983	1,8	
	22.01.1983	1,6	
	28.09.1983	1,72	
	20.10.1983	1,9	
	25.11.1983	1,72	
	04.12.1986	1,91	
Ложбина с центром циклона над Северно-Ледовитым океаном	22.12.1975	1,76	12
	28.09.1979	1,65	
	26.09.1983	1,82	
	25.10.1983	1,68	
Ложбина с центром циклона над Кольским полуостровом	31.12.1975	1,87	26
	20.11.1978	1,95	
	22.11.1978	1,65	
	05.12.1979	1,72	
	06.12.1979	1,72	
	30.12.1980	1,66	
	22.10.1983	1,7	
	02.11.1983	1,99	
	03.10.1986	1,81	

Далее был рассмотрен **второй базовый** период с 1991 по 2020 гг. Всего наблюдалось 27 случаев с превышением подъема уровня воды до 1,99 метров.

На рисунке 3.8 изображены траектории барических образований при особо опасных наводнениях во второй базовый период с 1991 по 2020 гг. с помощью приземных карт по данным реанализа NOAA [22].

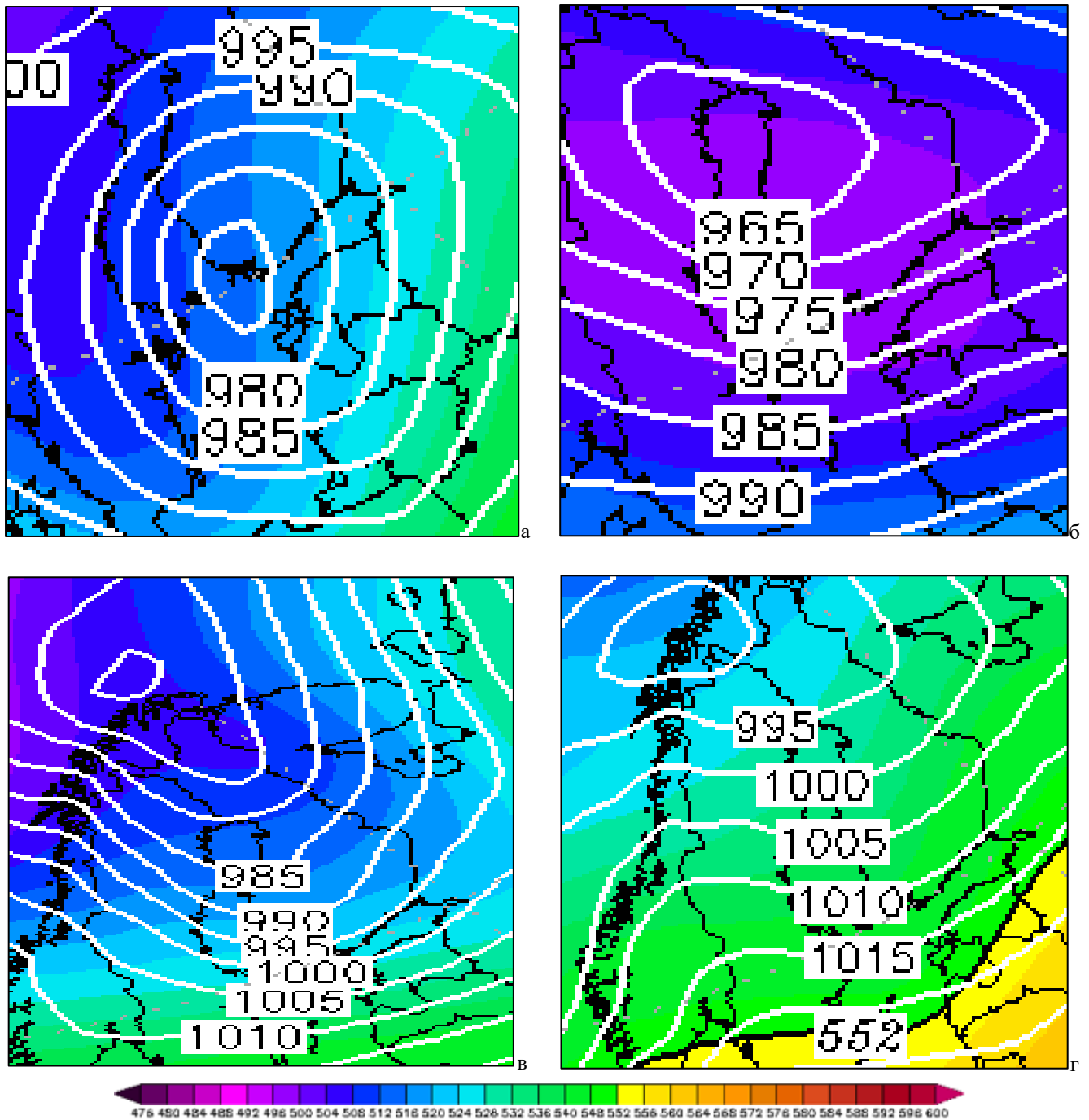


Рисунок 3.6 – Синоптические ситуации над регионом исследования за второй базовый период

(а – циклон с центром над Центральной Балтикой; б – циклон с центром над «горлом» Ботнического залива; в – ложбина с центром над Северно-Ледовитым океаном; г – ложбина с центром над Кольским полуостровом) [22]

На рисунке 3.6 (а), изображен циклон, движущийся через Стокгольм и Балтийское море 25 января 2002 года 06 UTC. Сформировавшаяся, в результате циклонической активности, длинная волна вышла на побережье Санкт-Петербурга и привела к наводнению 26 января 2002 года.

Рисунок 3.6 (б) демонстрирует, что циклон, ставший причиной наводнения 21 декабря 1993 года, пересекает часть Швеции и Ботнический залив 21 декабря 1983 года 00 UTC.

Рисунок 3.6 (в), иллюстрирует глубокую ложбину, с центром циклона на Северно-Ледовитым океаном 26 декабря 2015 года 00 UTC. Данная ложбина и могла стать причиной наводнения в Санкт-Петербурге 26 декабря 2015 года, но благодаря КЗС его удалось избежать.

На рисунке 3.6 (г) изображен циклон с центром над Кольским полуостровом 9 декабря 2015 года 18 UTC. Данный циклон сформировал глубокую ложбину. Данная ложбина по прогнозным данным могла стать причиной наводнения 10 декабря 2015 года, но Комплекс защитных сооружений предотвратил угрозу наводнения.

В таблице 3.11 представлена оценка повторяемости траекторий перемещения барических образований, которые привели и могли привести к особо опасным наводнениям с 1991 по 2020 гг.

Анализируя таблицу 3.11 можно сделать вывод о том, что наибольшую повторяемость траекторий перемещения барических образований с 1991 по 2020 гг. имели две системы: циклон с центром, проходящим над Центральной Балтикой и циклон 41 % от всех наблюдаемых случаев и с центром над «горлом» Ботнического залива 33 %. Ложбина, сформировавшаяся в результате циклона с центром, проходящим на Северно-Ледовитым океаном встречалась в 15 % случаев за второй первый базовый период, а ложбина с центром циклона над Кольским полуостровом в 11 %.

Сделав анализ таблицы 3.11 можно сказать, что такие синоптические образования как, циклон с центром, проходящим над Центральной Балтикой, циклон с центром, проходящим над «горлом» Ботнического залива и ложбина с центром циклона проходящего над Северо-Ледовитым океаном, оказывают влияние на повышение уровня воды в реке Нева. Поскольку в последнее десятилетие был введен в эксплуатацию комплекс защитных сооружений, все опасные наводнения удалось спрогнозировать и предотвратить.

Таблица 3.11

Повторяемость траекторий перемещения барических образований при *опасных* наводнениях с 1991 по 2020 гг.

Барическое образование	Дата	Уровень, м	Число случаев, %
Циклон с центром над Центральной Балтикой	04.10.1994	1,84	41
	16.10.1994	1,6	
	26.01.2002	1,71	
	30.12.2003	1,99	
	14.01.2007	1,79	
	15.01.2007	1,68	
	03.02.2008	1,92	
	16.11.2010	1,87	
	13.01.2015	1,9	
	13.03.2020	1,63	
	10.09.2020	1,7	
Циклон с центром над «горлом» Ботнического залива	21.12.1993	1,67	33
	24.11.1994	1,72	
	10.03.2002	1,83	
	08.01.2005	1,65	
	16.11.2008	1,87	
	09.03.2019	1,8	
	15.09.2019	1,7	
	01.10.2019	1,65	
	23.02.2020	1,96	
Ложбина с центром циклона над Северно-Ледовитым океаном	26.12.2015	1,87	15
	06.02.2020	1,65	
	18.02.2020	1,73	
	24.02.2020	1,72	
Ложбина с центром циклона над Кольским полуостровом	05.02.2002	1,82	11
	10.12.2015	1,85	
	13.09.2020	1,73	

Сравнивая таблицы 3.10 и 3.11 можно подвести итог, что во втором базовом периоде траектория циклона с центром, проходящим над центральной Балтикой наблюдалась гораздо чаще, нежели в первом базовом периоде. Уменьшилась в 1,5 раза повторяемость циклона с центром, проходящим над Ботническим заливом.

Так же следует отметить, что во втором базовом периоде уменьшилась, по сравнению с первым базовым периодом, повторяемость траектории циклона, центр которого проходит над Кольским полуостровом. Неизменной осталась повторяемость траектории циклона с центром, который проходит над Северно-Ледовитым океаном.

3.4 Подробный анализ синоптической ситуации для двух периодов – 2005 и 2015 гг.

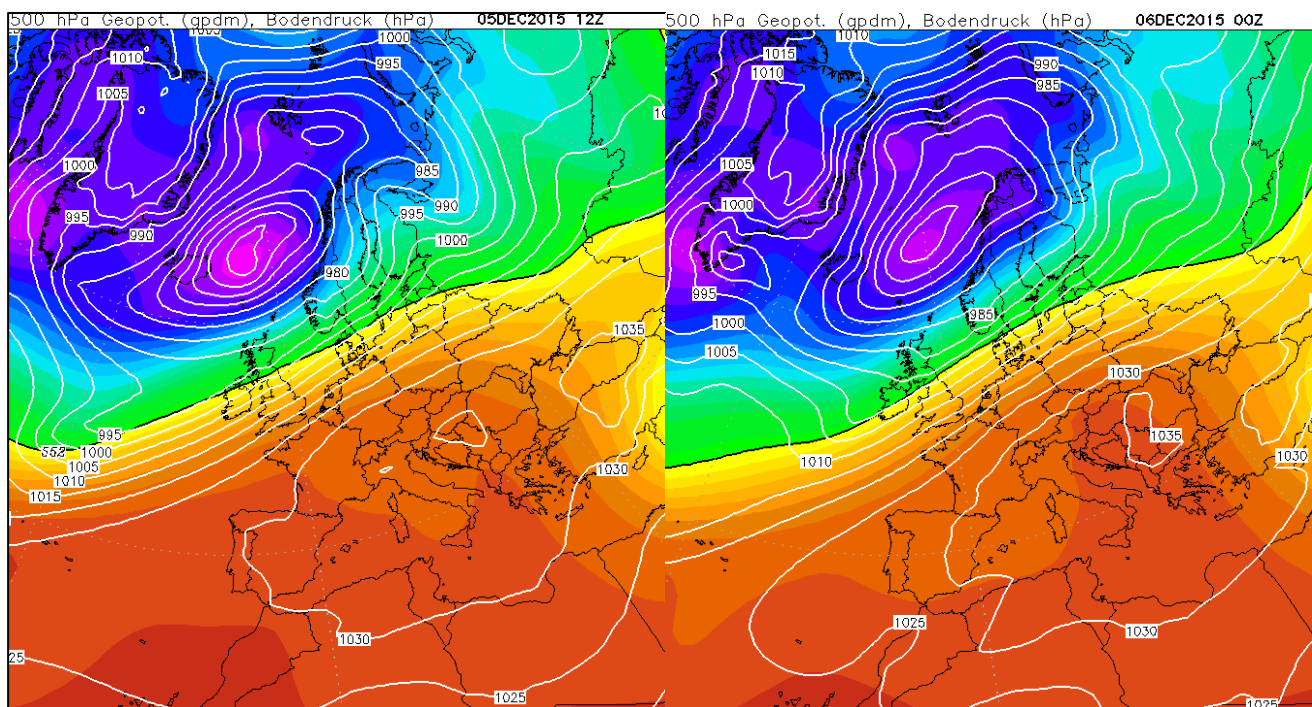
После того как летом 2011 года был сдан в эксплуатацию Комплекс защитных сооружений, проблема Невских наводнений была решена. Однако, даже после начала работы КЗС в Санкт-Петербурге и на прилегающих к городу территориях, местами наблюдались небольшие подтопления.

Одним из таких подтоплений стало прогнозируемое наводнение в начале декабря 2015 года. Данное наводнение являлось трехтактовым. Затворы КЗС были закрыты 5 декабря, в этот день предполагаемый подъем уровня воды по прогнозным данным должен был составить 268 сантиметров выше ординара. Шестого декабря предполагаемый подъем уровня воды остановился на отметке 203 сантиметра выше ординара, а 7 декабря 251 сантиметр. Благодаря работе КЗС городу удалось избежать критических последствий от затяжного наводнения, но по данным Северо-западного управления по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды (СЗ УГМС), за этот период были зафиксированы незначительные подтопления городских территорий.

Подробно синоптическая ситуация для данного периода была рассмотрена в пункте 2.4.

В результате анализа синоптических процессов с 5 по 7 декабря 2015 года можно сделать вывод, что Санкт-Петербург длительное время находился в южной части высокоградиентного поля низкого давления. В данном случае не наблюдалось отдельных центров формирующих длинную волну над акваторией Балтики. На севере Кольского полуострова, над северной Атлантикой, Баренцевом и Карским морями, наблюдалась активная циклоническая деятельность. В этой зоне формировались отдельные центры, объединенные общими изобарами. Южная часть данного барического образования в которой находился Санкт-Петербург в течении трех суток оставалась практически неизменной, рисунок 3.7.

Непрекращающийся максимальный ветер выше 10-11 м/с наблюдался с 12 часов 6 декабря до 12 часов 8 декабря. Максимальное значение скорости ветра было зафиксировано 7 декабря 00 часов и составило 16 м/с. На рисунке 3.8 представлен график изменения максимальной скорости ветра с 6 по 8 декабря 2015 года, красным цветом выделен интервал времени, который в дальнейшем будет использоваться для исследования подтоплений.



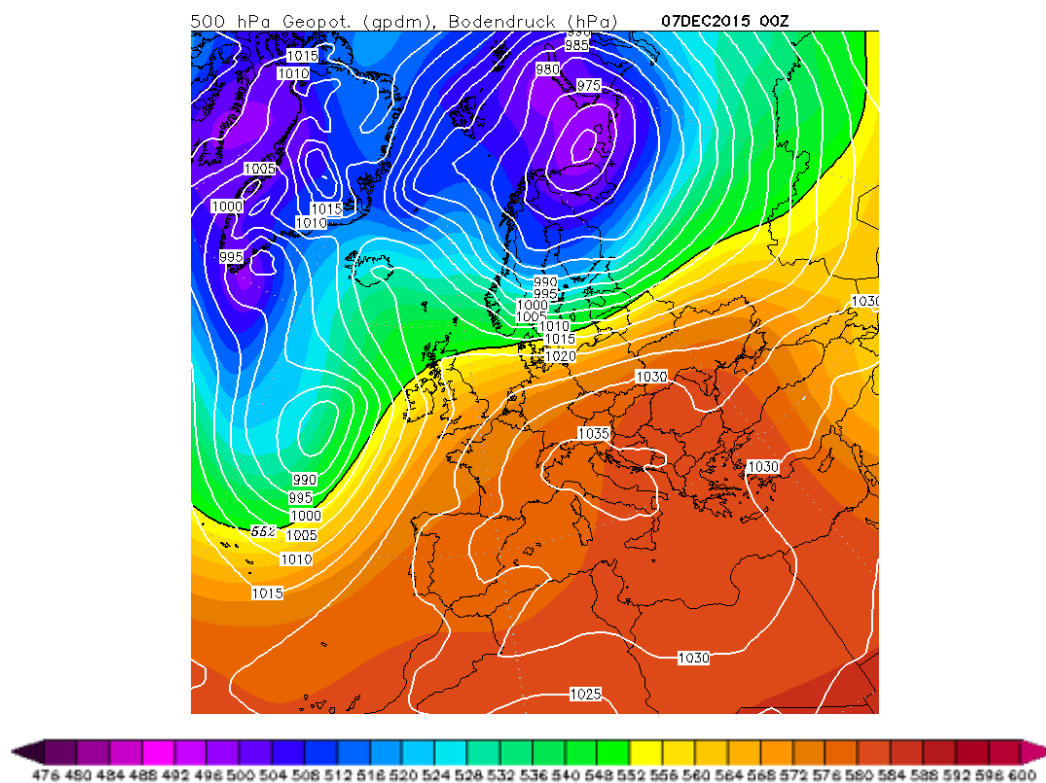


Рисунок 3.7 – Синоптические процессы, протекающие над территорией исследования, в момент подтоплений за декабрь 2015 года



Рисунок 3.8 – Максимальная скорость ветра с 6 по 8 декабря 2015 года, м/с

В таблице 3.12 приведены значения максимальной скорости ветра.

Таблица 3.12

Максимальная скорость ветра с 6 по 8 декабря 2015 года

Сроки, час	Максимальная скорость ветра, м/с		
	06.12.2015	07.12.2015	08.12.2015
00:00	9	16	11
03:00	9	13	11
06:00	11	12	10
09:00	12	12	10
12:00	12	14	11
15:00	12	12	6
18:00	11	13	4
21:00	14	10	4

Для дальнейшего анализа в магистерской диссертации использовались данные, полученные с помощью автоматизированной информационной системы государственного мониторинга водных объектов (АИС ГМВО) и данных фактических подъемов уровня воды на гидрологическом посту Горный институт Северо-Западного управления по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды.

На основе полученных данных был построен график подъема уровня воды за каждый час, в период трехтактового прогнозируемого наводнения, который представлен на рисунке 3.9. На графике разными цветами выделен каждый день с 5 декабря по 9 декабря 2015 года. В таблице 3.13 приведены значения подъема уровня воды.

Превышения уровня воды с 5 по 9 декабря 2015 года

Часы	Превышения уровня воды, м				
	05.12.2015	06.12.2015	07.12.2015	08.12.2015	09.12.2015
00:00	88	45	111	99	67
01:00	85	51	114	101	63
02:00	88	54	119	111	63
03:00	93	55	125	118	70
04:00	98	59	112	123	77
05:00	103	62	128	126	83
06:00	116	65	121	124	86
07:00	116	66	128	119	82
08:00	119	70	129	116	78
09:00	126	72	135	105	76
10:00	124	75	135	104	87
11:00	118	77	132	119	88
12:00	119	80	139	131	93
13:00	120	82	139	128	102
14:00	116	86	154	135	112
15:00	92	88	159	131	118
16:00	71	90	158	119	114
17:00	52	92	158	110	107
18:00	37	93	157	103	103
19:00	29	96	148	97	96
20:00	35	98	127	92	94
21:00	38	98	117	88	93
22:00	38	104	108	81	98
23:00	45	107	100	75	101

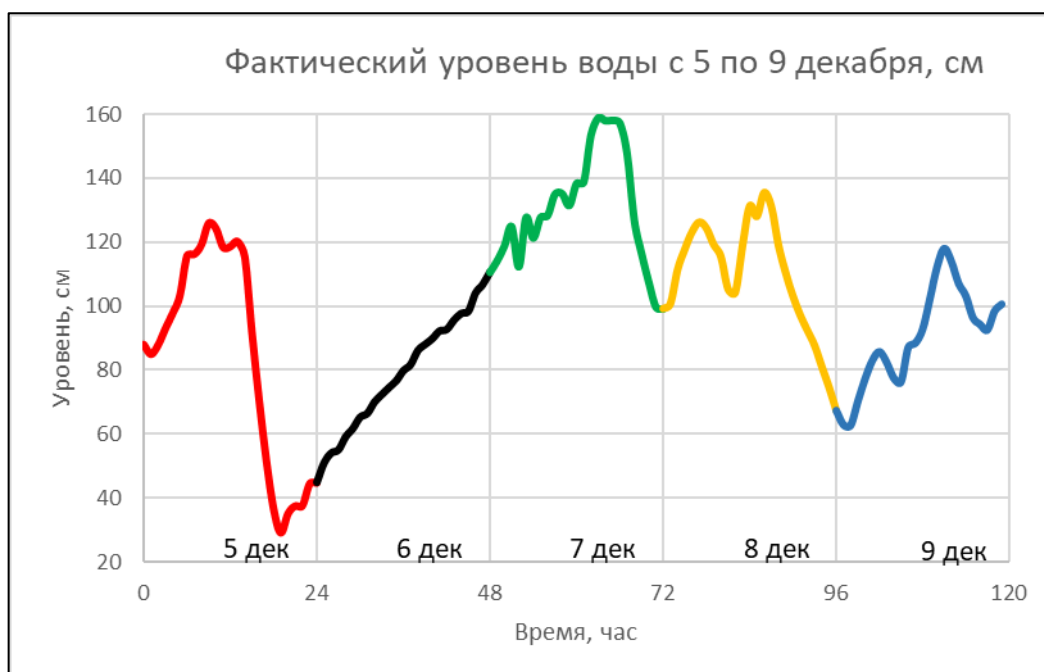


Рисунок 3.9 – Превышение уровня воды с 5 по 9 декабря 2015 года

Проведя анализ данных, представленных выше, можно сказать, что порывы ветра играли ключевую роль в повышении уровня воды.

С 6:00 6 декабря до 12:00 8 декабря максимальная скорость ветра не опускалась ниже значения 10 м/с. Если обратиться к данным в таблице 3.13, то можно заметить, что повышения уровня воды начались как раз тогда, когда максимальная скорость ветра стабильно удерживалась выше 11 м/с. Седьмого декабря уровень воды устойчиво держался выше отметки в 600 сантиметров, а в пике его превышение составило 160 сантиметров выше ординара и на некоторых территориях Санкт-Петербурга наблюдались незначительные подтопления.

На рисунке 3.10 изображены повышения уровня воды с 7 по 8 декабря за каждый час (красная линия) и максимальная скорость ветра по срочным данным (черная линия). Анализируя график можно сказать, что подъем уровня воды зависит от максимального ветра. На рисунке отчетливо видно, что уровень подъема воды не опускался ниже 100 сантиметров, пока максимальная скорость ветра держалась выше отметки в 10 м/с.

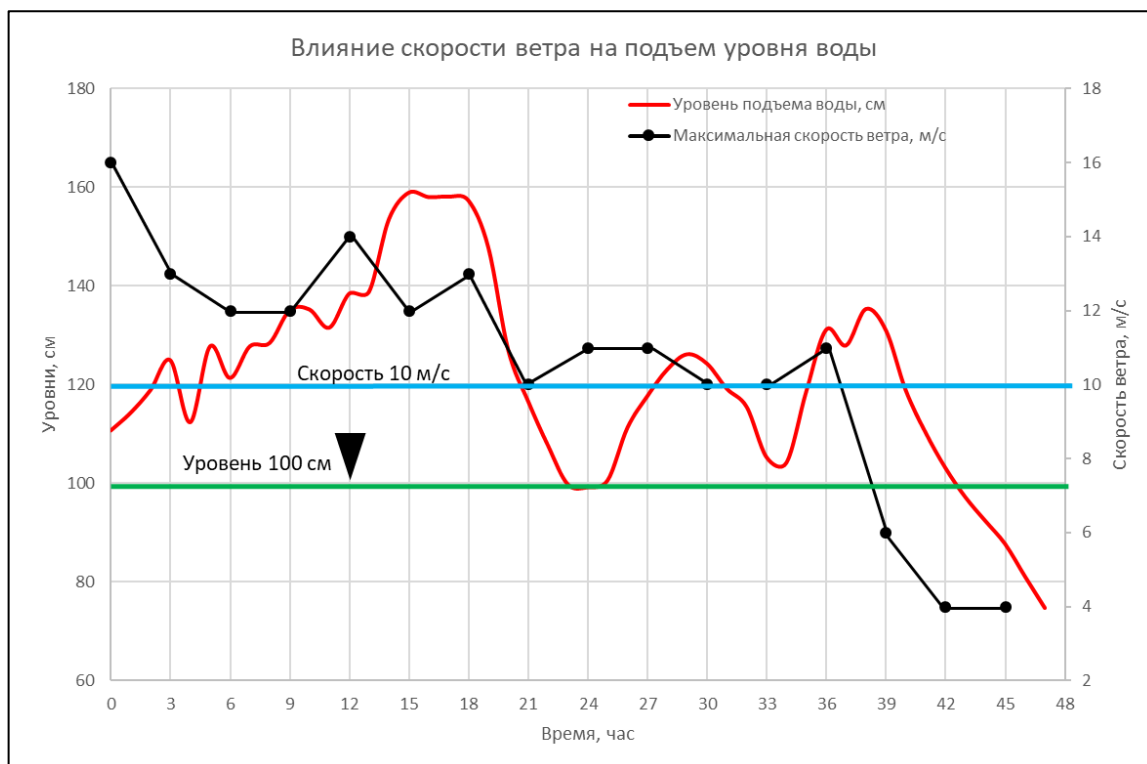


Рисунок 3.10 – Влияние максимальной скорости ветра на подъем уровня воды

Для сравнения рассмотрим ситуацию за 7–9 января 2005 года, когда было наводнение и еще не было комплекса защитных сооружений. Максимальный уровень подъема воды в этот период достигал 238 см выше ординара. Максимальный ветер при этом – 13 м/с.

Синоптическая ситуация с 7 по 9 января 2005 года, которая представлена на рисунке 3.11, определяется южной частью обширной циклонической области, имеющей несколько центров.

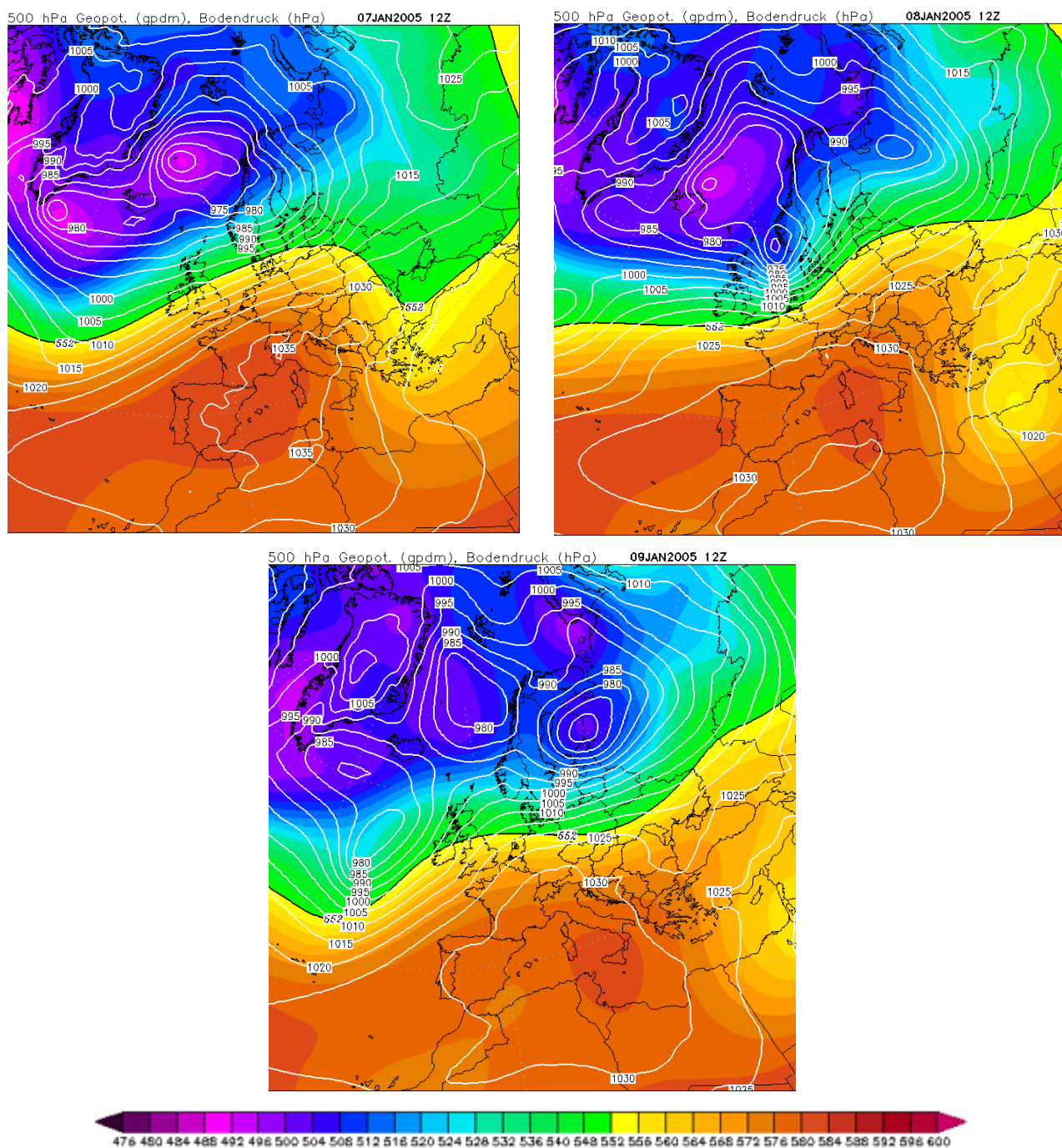


Рисунок – 3.11 Синоптические процессы, протекающие над территорией исследования, в момент наводнения за январь 2005 года

Описывая рисунок 3.11, можно сказать, что 7 января над Северной Атлантикой, Баренцевым морем, Балтийским регионом, югом Европы и Великобританией, образуется многоцентровая депрессия. Один из её центров находится у юго-восточного побережья Гренландии, а второй наблюдается между Гренландией и Норвегией. На юге Европы и частью Африки

наблюдается малоградиентное поле высокого давления. В зоне между Великобританией и территорией Балтики формируется высокоградиентное поле, так как в этом же районе наблюдается высотная фронтальная зона. Она образуется из-за столкновения двух воздушных масс: прогретой тропической воздушной массы, которая циркулирует в антициклоне и холодной воздушной массы, приходящей с зоны Северной Атлантики.

Так же следует отметить, что многоцентровая циклоническая депрессия в период с 7 по 9 января практически не сдвигалась в восточном направлении. Контрасты температур между двумя воздушными массами были высокие и они активно способствовали циклогенезу над Северной Атлантикой, но из-за того, что барическая система практически не смещалась, образование новых циклонов происходило над Северной Атлантикой. В период с 7 по 9 января над территорией исследования от Великобритании до северо-запада России наблюдалась зона высоких градиентов, которая на карте отображена изобарами близко расположенными друг к другу. Восьмого января синоптическая ситуация была практически схожа с той, что наблюдалась днем ранее.

В последний день наблюдений у побережья Норвегии в зоне циклонической области формируется новый центр с низким давлением (965 гПа), который начинает смещение по траектории рассматриваемой ранее, а именно над Центральной Балтикой.

Максимальная скорость ветра выше 11 м/с в рассматриваемый период наблюдались только 9 января, 8 и 10 января скорость ветра до 10-11 м/с наблюдалась с 00:00 до 09:00 8 января и с 00:00 до 03:00 10 января. Максимальное значение скорости ветра составило 13 м/с 9 января с 03:00 до 15:00. На рисунке 3.10 представлен график изменения максимальной скорости ветра с 8 по 10 января 2005 года, красным цветом выделен интервал времени, в момент которого максимальная скорость ветра поднималась и удерживалась на отметке в 10 м/с, в таблице 3.14 приведены значения максимальной скорости ветра.



Рисунок 3.12 – Максимальная скорость ветра с 8 по 10 января 2005 года

Таблица 3.14

Максимальная скорость ветра с 8 по 10 января 2005 года

Сроки, час	Максимальная скорость ветра, м/с		
	08.01.2005	09.01.2005	10.01.2005
00:00	10	12	11
03:00	10	13	11
06:00	10	13	6
09:00	10	13	6
12:00	9	13	5
15:00	5	13	7
18:00	6	12	8
21:00	8	12	8

В таблице 3.15 приведены значения подъема уровня воды выше ординара с 7 по 11 января 2005 года. Проведя анализ, можно сказать, что в рассматриваемый период произошло двухтактовое наводнение. Стоит отметить, что 8 января зафиксировать подъем уровня выше 160 сантиметров,

возможно только по ежечасным данным, так как в дальнейшем уровень воды начал снижаться.

Таблица 3.15

Превышения уровня воды с 7 по 11 января 2005 года

Часы	Превышения уровня воды, м				
	07.01.2005	08.01.2005	09.01.2005	10.01.2005	11.01.2005
00:00	94	151	94	120	91
01:00	91	163	109	112	96
02:00	86	165	118	102	98
03:00	84	160	120	96	108
04:00	85	152	124	89	126
05:00	89	141	138	91	140
06:00	88	127	142	89	145
07:00	84	117	129	93	138
08:00	78	112	133	101	132
09:00	72	102	158	106	122
10:00	67	96	193	96	110
11:00	63	86	230	84	100
12:00	65	75	238	79	92
13:00	74	64	221	85	88
14:00	79	55	210	94	92
15:00	84	50	213	96	94
16:00	90	50	222	88	88
17:00	99	57	219	79	78
18:00	108	60	198	74	69
19:00	114	67	171	73	62
20:00	114	77	151	77	59
21:00	116	79	137	79	69
22:00	126	76	134	79	84
23:00	137	78	130	86	101

Проведя анализ выше изложенного, можно сказать, что первый кратковременный подъем воды 8 января с 00:00 до 04:00 произошел в результате влияния на центральную Балтику и Финский залив ложбины, центр циклона находился между Гренландией и Скандинавией.

Наводнение, которое произошло 9 января 09:00 до 20:00, начало свое формирование еще 8 января, предпосылки к подъему уровня воды в реке Нева

можно увидеть на рисунке 3.11 на приземной карте за 8 января 12 UTC. На побережье Норвегии сформировался циклон, который в дальнейшем начинает свое движение к центральной Балтике, по мере своего продвижения давление в центре циклона понижается до 965 гПа.

На карте за 9 января 12 UTC отчетливо видно прохождение данного циклона над Балтийским морем и Финским заливом, а его центральная часть к этому времени находится северо-восточнее Санкт-Петербурга.

Данный случай интересен тем, что поле давления в южной части Европы, аналогично тому, которое в декабре 2015 года вызвало подтопление в Санкт-Петербурге при закрытых створах КЗС. Поэтому было решено сравнить ход уровня и максимальную скорость ветра за эти два периода, а также оценить возможное влияние подпора реки Нева при отсутствии КЗС.

Анализ таблиц 3.14 и 3.15 показал, что на повышение уровня воды 8 и 9 января повлиял сильный ветер с порывами до 13 м/с. Так как именно в момент наибольших значений скорости ветра наблюдался подъем уровня воды в реке Нева. В момент понижения уровня воды, порывы ветра так же стихают.

Известно, что период сейшевых колебаний после Невских наводнений в среднем составляет от 10 до 12 часов. Опираясь на данное утверждение, можно сказать, что повышение уровня воды 9 января в 06:00, предположительно вызвано сейшевыми колебаниями.

В результате сравнения двух случаев можно сказать, что на превышение уровня воды в городе Санкт-Петербург влияет максимальная скорость ветра с порывами больше 10 м/с продолжительностью до трех суток. Также при закрытых створах КЗС подпор является одним из факторов увеличения уровня воды в реке Нева. При отсутствии КЗС на повышения так же влияют сейшевые колебания, которые могут идти в одной или в разных фазах с длинной волной.

Для определения влияния подпора на подъем уровня воды при открытых створах КЗС или их отсутствии, необходимо проводить более масштабное и детальное исследование. Поскольку данные, которые были использованы в этой работе не дают возможности детально исследовать все процессы, то

определение влияния подпора на подъем уровня воды при отсутствии КЗС является затруднительным.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Поставленная цель магистерской диссертации, а именно анализ условий формирования Невских наводнений в Санкт-Петербурге за последние 100 лет была достигнута.

Результаты проведенного исследования позволяют оценить влияние климатических изменений на формирования наводнений в городе Санкт-Петербург.

Для достижения поставленной цели были решены следующие задачи:

1. Проанализирована повторяемость Невских наводнений по интенсивности за 100 лет;
2. Проанализированы особенности подъема уровня воды в реке Нева при закрытых и открытых створах КЗС после 2011 г.;
3. Исследованы циркуляционные условия формирования наводнений в Санкт-Петербурге за период с 1961 года по 2020 год;
4. Оценены возможные изменения синоптических ситуаций, характерных подъему уровня реки Нева выше 200 сантиметров в разные годы.

Подводя итоги выполненного исследования, а именно анализа циркуляционных условий формирования сильных Невских наводнений для выбранного региона, можно сделать вывод, что после 1970 года повторяемость случаев *опасных и особо опасных* наводнений увеличилась. Благодаря введению в эксплуатацию Комплекса защитных сооружений, опасные и особо опасные наводнения удалось предотвратить. Однако, в свете активно меняющегося климата повторяемость Невских наводнений повышается. При прогнозируемом повышении уровня воды в реке Нева более чем на 160 см, городские территории иногда подвергаются небольшим подтоплениям, даже при закрытых створах КЗС. Следовательно, в дальнейшем требуется прогнозирование уровня воды в реке для предотвращения наводнений, которые могут возникнуть, даже при закрытых створах КЗС.

Большинство атмосферных циркуляций, которые влияют на климатическую характеристику и приводят к превышению уровня воды, а в дальнейшем к особо опасным и опасным наводнениям на реке Нева в г. Санкт-Петербург, являются циклоны, центр которых проходит над горлом Ботнического залива и над Центральной Балтикой. Так же влияние на условия возникновения невских наводнений, хоть и с меньшей повторяемостью, оказывают ложбины с центром циклона, проходящим над Северо-Ледовитым океаном и над Кольским полуостровом. Из этого следует, что при прогнозировании ожидаемых подтоплений, следует учитывать эти барические образования.

На превышение уровня воды в городе Санкт-Петербург влияет максимальная скорость ветра с порывами больше 10 м/с с продолжительностью до трех суток, возникающая в последние десятилетия, при серии наводненческих циклонов. При закрытых створах КЗС подпор является одним из факторов увеличения уровня воды в реке Нева. При отсутствии КЗС на повышении так же влияют сейшевые колебания, которые могут идти в одной или в разных фазах с длинной волной.

Для определения влияния подпора на подъем уровня воды при открытых створах КЗС или их отсутствии, необходимо проводить более масштабное и детальное исследование. Поскольку данные, которые были использованы в этой работе, не дают возможности детально исследовать все процессы, то определение влияния подпора на подъем уровня воды при отсутствии КЗС является затруднительным.

СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Симонов, В.В. Природа возникновения наводнений, затоплений и характеристика их поражающих факторов / В.В. Симонов, О.В. Осадчий // научные и образовательные проблемы гражданской защиты – 2014. – № 1. – с. 9-19.
2. Знаменский, В.А. Невские наводнения: Причины и особенности. – СПб.: ВВМ (ООП НИИХ СПбГУ), 2004. – 95 с.;
3. Уровни затоплений Санкт-Петербурга во время наводнений: официальный сайт. – URL: <http://semiotic.ru/d/pro/levels.htm> (дата обращения 08.02.2023);
4. Организация Госкорпорации «Роскосмос» официальный сайт. – URL: <https://geonovosti.terratech.ru/nature/oka-vne-svoikh-beregov/> (дата обращения 15.02.2023);
5. Федеральное государственное бюджетное учреждение «Уральское управление по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды» «ФГБУ Уральское УГМС»: официальный сайт. – URL: <http://svgimet.ru> (дата обращения 28.02.2023);
6. Федеральное государственное бюджетное учреждение «Северо-Западное управление по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды» «ФГБУ Северо-Западное УГМС»: официальный сайт. – URL: <http://www.meteo.nw.ru> (дата обращения 01.04.2023);
7. Экологический портал Санкт-Петербурга. Комитет по природопользованию, охране окружающей среды и обеспечению экологической безопасности: официальный сайт. – URL: <https://www.infoeco.ru> (дата обращения 01.04.2023);
8. Тихонова Д.С. Морские нагонные наводнения в Санкт-Петербурге / Д.С. Тихонова, А.А. Шумихина // Петербургский политехнический университет Петра Великого. – 2017. – № 1. – с. 36-45;

9. Гидросфера: Учебное пособие для студентов вузов / [В.И. Тарасов]; под редакцией В.И. Тарасова. – Уссурийск; Уссурийский ГПИ, 2004. – 152 с.;
10. Нежиховский Р.А. Река Нева и Невская губа / Р.А. Нежиховский. – Ленинград: Гидрометеиздат, 1981. – 112 с.;
11. Zakharchuk E.A. On the Spatiotemporal Structure and Mechanisms of the Neva River Flood Formation / E.A. Zakharchuk, N.A. Tikhonova // Russian Meteorology and Hydrology. – 2011. – № 36. – с. 534-541;
12. Федеральное казенное предприятие «Дирекция комплекса защитных сооружений г. Санкт-Петербурга Министерства строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации»: официальный сайт. – URL: <https://www.dambaspb.ru> (дата обращения 25.03.2023);
13. Книга о Санкт-Петербурге; Учебное пособие для учащихся 10-11 классов петербургских школ / [О. Е. Лебедева и др.]; под редакцией О.Е. Лебедевой и В.С. Ягья. – Санкт-Петербург: «Специальная литература», 1997. – 461 с.;
14. Карты высот, уклонов, видимости и рельефа: официальный сайт. – URL: <http://votetovid.ru> (дата обращения 28.03.2023);
15. Окрестности Санкт-Петербурга: официальный сайт. – URL: <http://aroundspb.ru> (дата обращения 18.04.2023);
16. Топографическая карта мира: официальный сайт. – URL: <https://ru.ru.topographic-map.com> (дата обращения 20.04.2023);
17. Справочно-информационный портал «Погода и климат»: официальный сайт. – URL: <http://www.pogodaiklimat.ru/> (дата обращения: 05.03.2023);
18. Всероссийский научно-исследовательский институт гидрометеорологической информации – Мировой центр данных «ВНИИГМИ-МЦД»: официальный сайт. – URL: <http://meteo.ru/> (дата обращения: 06.03.2023);
19. Федеральная служба по гидрометеорологии и мониторингу окружающей среды (Росгидромет): официальный сайт. – URL: <http://meteof.gov.ru/> (дата обращения: 06.04.2023);

20. Автоматизированная информационная система государственного мониторинга водных объектов (АИС ГМВО): официальный сайт. – URL: <http://gmvo.skniivh.ru/> (дата обращения: 16.04.2023);

21. Познавательный портал – циркуляция атмосферы: официальный сайт. – URL: <http://kataru.ru/> (дата обращения: 19.04.2023);

22. Карты реанализа: официальный сайт. – URL: <http://kataru.ru/> (дата обращения: 19.04.2023);