



МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ
ФЕДЕРАЦИИ

федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования

«РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Кафедра метеорологических прогнозов

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА
(бакалаврская работа)

На тему «Анализ синоптических особенностей формирования современных
невских наводнений»

Исполнитель Гойдь Алина Андреевна ПМ-Б17-1-3
(фамилия, имя, отчество)

Руководитель К.Г.Н., 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)

«31» мая 2021 г.

Санкт-Петербург

2021

Содержание

Введение.....	4
1. Причины невских наводнений.....	5
1.1 Нагонные наводнения.....	5
1.2 Весеннее половодье	8
1.3 Сейшевые колебания	9
1.4 Синоптические ситуации благотворные влияющие на развитие наводнений.....	11
1.4.1 Циклон, выходящий с Западной Европы	11
1.4.2 Северо-Атлантический циклон	12
1.4.3 Многоцентровой циклон, располагающийся над полярным регионом и северной Атлантикой.....	15
2. Циркуляционные процессы в умеренном поясе	17
2.1 Западный перенос воздушных масс.....	17
2.2 Циклоны и антициклоны.....	18
2.3 Погодные условия в циклонической циркуляции	23
2.4 Погодные условия в антициклонической циркуляции	27
2.5 Фронты	28
3. Анализ синоптических особенностей формирования современных невских наводнений.....	33
3.1 Обозначение цели и задач научно-исследовательской работы.....	33
3.2 Анализ повторяемости невских наводнений с 1921 г. по 2020 г.	34
3.3 Основные траектории движения барических образований при невских наводнениях с 1921 по 2000 год	38

3.4 Основные траектории движения барических образований при неевских наводнениях с 2000 года.....	46
Заключение	54
Список литературы	55
Приложение 1	57
Приложение 2	58
Приложение 3	59
Приложение 4	60

Введение

На жизнь, развитие, и существование человека и общества влияют различные условия, в том числе и метеорологические. В свою очередь знание условий возникновения атмосферных явлений, их прогнозирование и выявление причин, влияющих на их изменение, во многом упрощает жизнь человека и обеспечивает безопасное существование.

Главной целью научно-исследовательской работы является анализ синоптических условий формирования невских наводнений и особое внимание предполагается уделить тем наводнениям, которые произошли после 2011 года.

Анализ синоптических ситуаций, приводящий к невским наводнениям, является задачей, несомненно, актуальной и интересной.

В работе планируется проанализировать все невские наводнения, которые были в период с 1921 года по 2020 год, их повторяемость. Проанализировать синоптические процессы, сопутствующие двум группам невских наводнений, особое внимание уделить сильным. Оценить изменения циркуляционных процессов с более детальным рассмотрением тех наводнений, которые вызвали подтопления после 2011 года.

В первой главе описываются виды наводнений, которым подвержен Санкт-Петербург и синоптические условия их возникновения.

Во второй главе рассмотрены циркуляционные процессы, которые характерны для умеренного пояса, особенности фронтов, циклонов, антициклонов и погодные условия, характерные для этих процессов.

В третьей главе изучены все невские наводнения за период с 1921 по 2020 год, их повторяемость и траектории движения циклонов, которые приводят к подъему уровня воды в Неве.

1. Причины невских наводнений

1.1 Нагонные наводнения

Наводнения в Санкт-Петербурге — подъёмы воды в дельте Невы и восточной части Невской губы, которые ведут к затоплению некоторой части суши Санкт-Петербурга. Подъем воды выше отметки 160 см над ординаром считается наводнением, опасной считается отметка 211 см, а критической 300 см. Подъем воды регистрируется по ординару на Горном Институте [2].

Невские наводнения — это сложное явление, возникновение которого происходит за счет различных факторов [12].

На изменение уровня воды в Неве оказывают влияние ветер, давление, проходящие циклоны и фронты. За счет этих факторов вода в реке может либо застаиваться, образуя сейши, либо перемещаться, образуя длинную волну, которая при своем движении меняется за счет изменения береговой линии. Чаще всего на подъем уровня воды оказывает влияние совокупность видов колебаний [12].

Волны, образовавшиеся на Финском заливе, усиливаются за счет нагона ветром [12].

Самое очевидное влияние на резкое увеличение уровня воды в Неве оказывает сильный западный ветер, за счет того, что он противоположен течению воды. Обычно такой ветер приходит вместе с циклонами, которые движутся над Балтийским морем и Финским заливом. Проходя над Балтикой циклоны, за счет низкого давления, увеличивается уровень воды. Волна, вызванная такой ситуацией, имеет высоту около 40 см, а скорость с которой она распространяется составляет примерно 50 км/ч. В тех случаях, когда циклон и длинная волна движется в одну и ту же сторону, то волна может увеличиться [12].

Они вызваны колебаниями уровня Балтийского моря. В свою очередь, колебания происходят в том случае, когда все силы, вызывающие подъем уровня воды, действуют в одну сторону. При прохождении циклонов с юго-запада на северо-восток, вода из Ботнического и Финского заливов сгоняется в северо-восточную часть Балтийского моря, в это время наблюдается уменьшение уровня вод в Неве, что является предвестником наводнения [1].

Нагонные наводнения – это наводнения, возникающие за счет нагона воды в устьях рек ветром. Волна, образованная этим нагоном, является полой и ее длина во много больше глубины водоема. В случаях, когда берег крутой, колебания небольшие и не ведут к наводнениям. Но в случаях, когда берег пологий в устьях рек этот нагон может привести к затоплению суши [3].

Зона океанов и морей с небольшой глубиной называется шельфом. Его ширина обычно составляет от 60 до 1500 км. Балтийское море относится к морям, которые почти полностью лежат на шельфе [3].

В случаях, когда берега низкие, опасность начинает представлять подъем уровня воды на 100 – 150 см [3].

Сложно отследить закономерность нагонных наводнений. Можно отметить только тот факт, что этот тип наводнений встречается чаще всего в сезон штормов. В умеренных широтах этот сезон осенью и в начале зимы, а в тропических – в конце лета и начале осени [3].

Самые удачные условия, при которых наблюдаются ветровые нагоны наблюдаются в тех случаях, когда помимо сильного западного ветра присутствует падение давления, за счет которого уровень воды в Финском заливе увеличивается [5].

Санкт-Петербург построен в дельте Невы, за счет этого он часто подвержен опасным и катастрофическим наводнениям. Невские наводнения наблюдаются каждый год, а их наибольшая повторяемость встречается осенью [4].

Повышение уровня воды в Неве случается из-за того, что ветром из Финского залива, вода как-бы нагоняется к Неве. Ветры в этом случае имеют большую скорость и северо-западные, западные и юго-западные направления. Оно является противоположным течению Невы. После этого вода из реки перестает стекать Финский залив. За счет этого во всех рукавах Невы вода начинает двигаться в другом направлении, что в свою очередь приводит к подъему воды в Неве и затоплению города [4].

Наводнения возникают за счет сложного взаимодействия метеорологических и гидрологических процессов, которые могут возникнуть на территории Балтийского моря и Финского залива, когда над ними проходят циклоны с преобладающими западными ветрами [4].

Нагонные наводнения на Неве возникают, когда ветер дует по линии Стокгольм – Санкт-Петербург, изображено на рисунке 1.1.

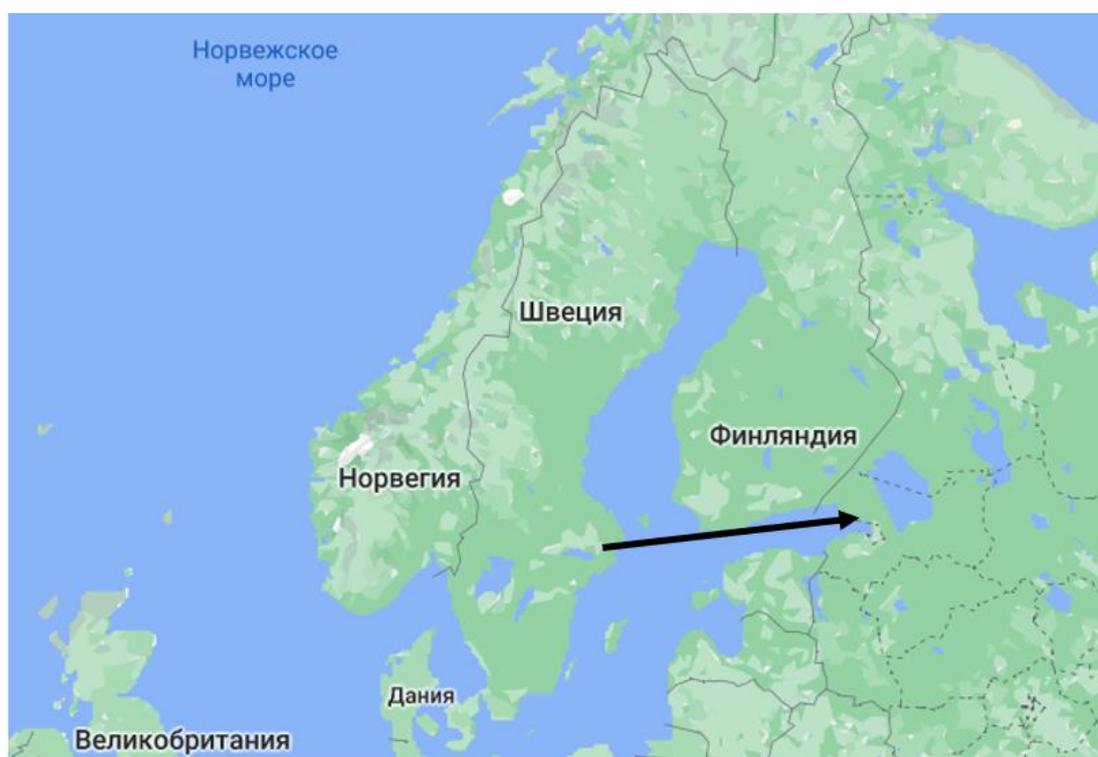


Рисунок 1.1 – Карта с изображением линии Стокгольм-Санкт-Петербург

Процесс возникновения наводнений такого типа состоит в том, что под действием циклона, который пересекает Балтику с запада на восток, возникает ветер, дующий со стороны Стокгольма в сторону Санкт-Петербурга, который сгоняет воду к горлу Финского залива. За счет этого возникает «длинная волна», которая проходит 40-60 километров за час. Далее волна движется в сторону устья Невы и примерно через 7 – 9 часов доходит до него [6]. В результате чего уровень Невы воды повышается. Также при продолжительном западном ветре образуется подпор, и вода из Невы не может вытечь в Финский залив.

Нагонные наводнения являются наиболее опасными для Санкт-Петербурга, так как при них наблюдается значительный подъем уровня воды в Неве.

1.2 Весеннее половодье

На Неве весеннее половодье бывает редко. Обычно подъем воды с приходом тепла связан с тем, что в Ладожское озеро приходят речные воды, он может составлять от 10 см до 150 см. Подъем воды начинается в конце марта или начале апреля [7].

На всей территории реки Невы наблюдается ледостав. Обычно река замерзает в начале декабря, а лед начинает таять в начале апреля. Толщина льда различна в разных частях Невы. В нижнем течении она составляет 30-40 см, а выше по течению 50-50 см. Затопы и зажоры льда могут приводить к подъему уровня воды вверх по течению от этих явлений. Так же к наводнениям могут привести льды, которые поступают в Неву из Ладожского озера [7].

Количество осадков, которое выпадает на территории, по которой течет Нева, больше, чем испарение на 37,7%. Весенние паводки встречаются редко так же из-за того, что вода с Ладожского озера равномерно стекает в Неву [7].

Берега вдоль Невы почти во всех местах невысокие и их высота составляет 3-6 метров [7].

Исток Невы находится на востоке от устья. Вверху река имеет юго-юго-западное направление, а ниже резко меняет направление на северо-западное. В этом месте формируются Ивановские пороги, а перед их началом самое узкое место. Внизу река снова резко меняет свое направление на западно-юго-западное [7].

Скорость, с которой Нева вытекает из Ладожского озера составляет 0,3 м/с, далее она ускоряется и движется со средней скоростью примерно 0,8-1,1 м/с. В городе скорость снижается и составляет 0,3-0,4 м/с, а к устью до 0,1-0,2 м/с [7].

Ширина Невы в среднем составляет примерно 500 метров. В самых широких местах она может достигать 1 километра [7].

Глубина Невы в среднем составляет 10 метров, в некоторых местах она может достигать 24 метра. Минимальная глубина – 4-4,5 метра [7].

1.3 Сейшевые колебания

Сейши – стоячие волны, возникающие в замкнутых или частично замкнутых водоемах [1].

Такие колебания происходят таким образом, что одна часть водоема поднимается, тогда как другая опускается [3].

Балтийское море благодаря своей вытянутости относится к частично замкнутым водоемам. Сейши здесь возникают за счет приспособления водного бассейна к нарушениям равновесного состояния под влиянием длительного нагона или сгона воды, резкого изменения давления или ветра при прохождении барических образований. Сейшевые колебания быстро возбуждаются, затрагивая всю толщу вод моря, а затухают на протяжении нескольких суток. Самый простой вид сейшевых колебаний – это продольная

одноузловая сейша, но на деле они бывают двух-, трех- и даже четырехузловыми. Это связано с неровностями очертания берегов и рельефа. При этом в заливах и бухтах могут зарождаться собственные колебания [1].

На рис.1 показан вид поверхности моря при одноузловой сейше системы Западная Балтика — Финский залив. При одной фазе колебаний (рис. 1.2 а) максимальный уровень наблюдался в юго-западной части Балтики, а минимальный — в восточной части Финского залива, в противоположной фазе (рис. 1.2 б) — наоборот. Амплитуда колебаний в восточной части Финского залива достигает 100 см, а в юго-западной Балтике— 70 см. Именно это может привести к наводнению [1].

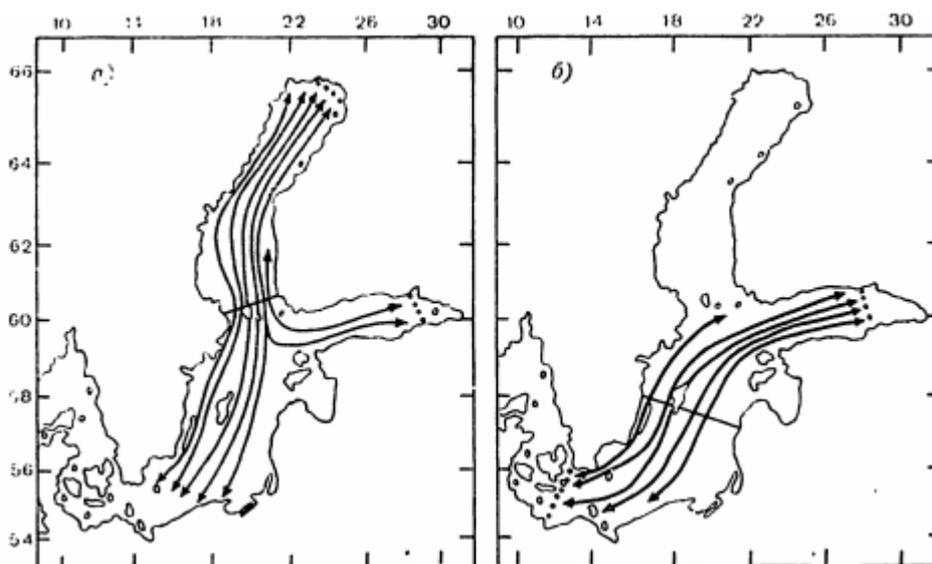


Рисунок 1.2 - Схема сейшевых колебаний Балтийского моря

В системе Балтийское море – Финский залив при двухузловой сейше колебания имеют другой характер. В такой ситуации в восточной части Финского залива амплитуда колебаний составляет 30-50 см, а на юго-западе Балтийского моря 40-60 см. На входе в Финский залив расположены узловые линии Ханко — Таллин, а на юго-западе Балтийского моря Штольпмюнде — Эландсрев. В наблюдения редко встречаются трех- и четырехузловые сейши, а их амплитуда может достигать 30—50 см [1].

1.4 Синоптические ситуации благотворные влияющие на развитие наводнений

Наводнения наносят большой ущерб городу, жителям, предприятиям. Единственным возможным способом защитить город и местных жителей от этого явления, это научиться его прогнозировать, что поможет подготовиться к опасному явлению.

Погодные условия довольно переменчивы и для того, чтобы прогнозировать какие-либо явления погоды, следует постоянно следить за изменениями параметров атмосферы [3].

Наблюдения и анализ за синоптической ситуацией дает возможность выделить условия, которые ведут к образованию наводнений. Если будут известны все условия, то будет возможность их предотвращения опасного явления.

1.4.1 Циклон, выходящий с Западной Европы

Циклоны – атмосферные вихри, в центре которых пониженное давление, их перемещение происходит с запада на восток. Потоки ветра направлены против часовой стрелки от периферии к центру циклона. В южной части циклона находится теплый сектор, граница раздела между теплым и холодным воздухом называется фронтом. Именно в полосе циклона ветер достигает максимальных значений.

Обычно циклон этого типа выходит со стороны Стокгольма и движется над Балтийским морем до горла Финского залива. Во время пересечения Балтики формируется волна. Ее возникновению способствует понижение атмосферного давления, а также ветра, дующие к центру циклона. Опасными являются траектории циклонов, которые направлены с юго-запада

Скандинавии на северо-восток. При таком движении длинная волна направляется к горлу Финского залива, где возникает опасный подъем воды. Траектория такого циклона изображена на рисунке 1.3

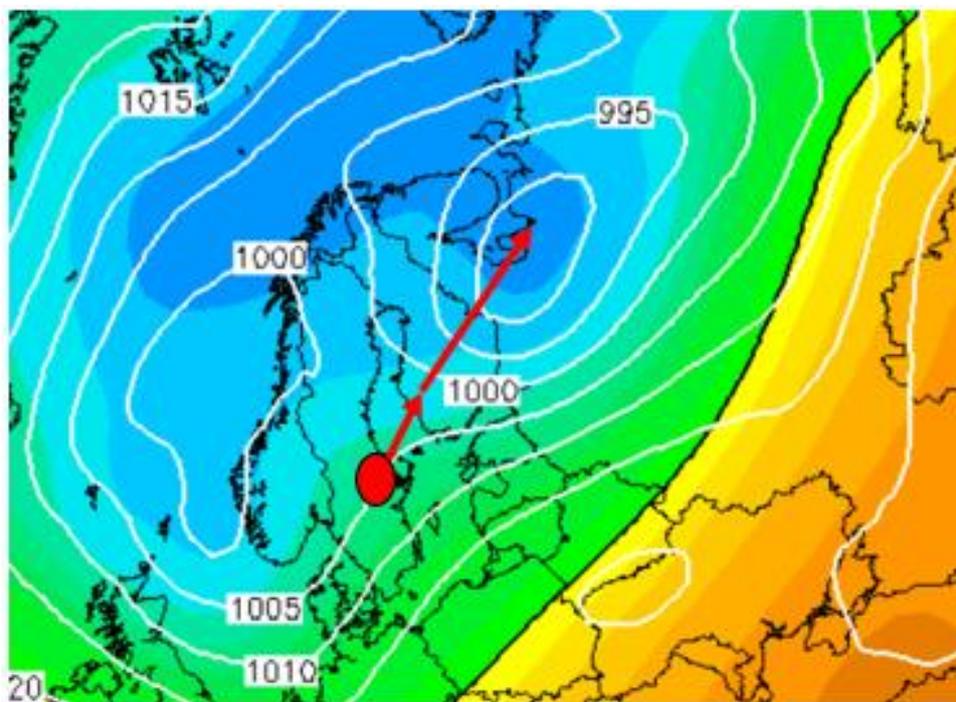


Рисунок 1.3 – Синоптическая карта с траекторией циклона
(АТ500+приземная)

Такая траектория движения наводненческого циклона наиболее часто приводит к наводнениям, при которых уровень воды достигает отметок опасных и катастрофических наводнений.

1.4.2 Северо-Атлантический циклон, при котором Санкт-Петербург находится в ложбине

При этой синоптической ситуации Северо-Атлантический циклон движется на севере (Кольский полуостров, арктическое побережье и т.п.), над Балтикой расположена глубокая ложбина от этого циклона. Следовательно,

Санкт-Петербург так же расположен в ложбине, дуют юго-западные ветра, которые усиливают ветровой нагон, который, в свою очередь, увеличивает уже сформировавшуюся длинную волну. Траектория этого циклона изображена на рисунке 1.4

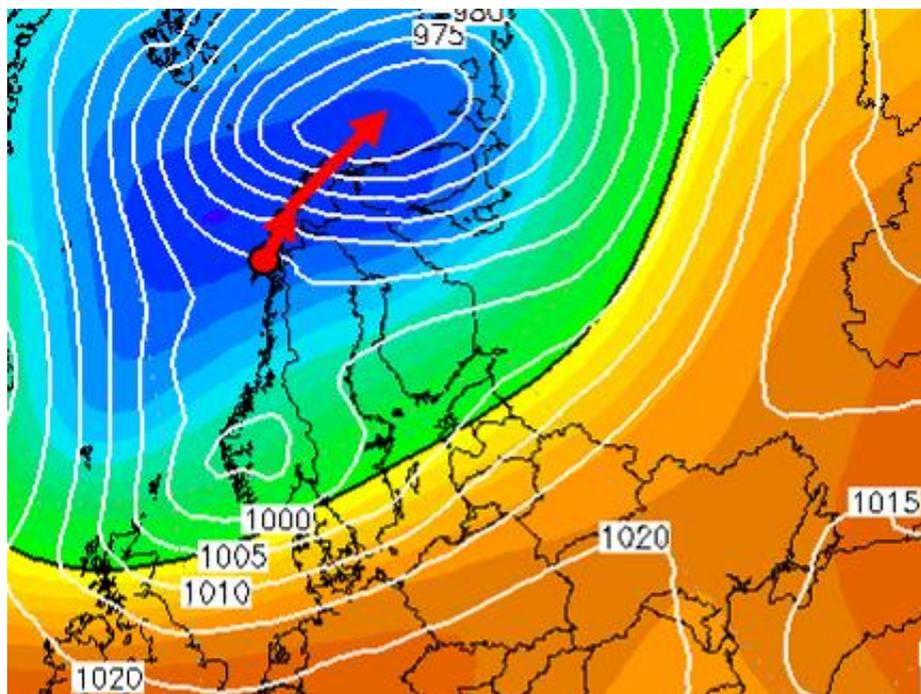


Рисунок 1.4 – Синоптическая карта с траекторией циклона
(АТ500+приземная)

На рисунке 1.5 изображена ситуация, благотворно влияющая на возникновение наводнения. Н и В - соответственно области низкого и высокого атмосферного давления; П и Р - зоны падения и роста давления; Х и Т - холодный и теплый фронты в циклоне. Стрелкой показана наиболее опасная траектория центра циклона [1].

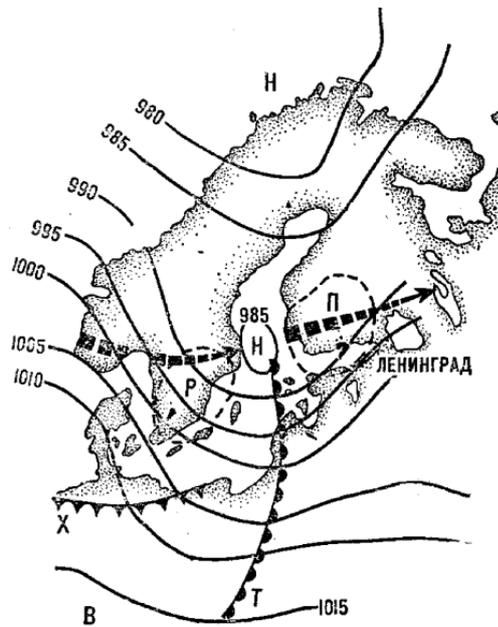


Рисунок 1.5 - Синоптическая ситуация перед наводнением в Санкт-Петербурге.

В горле Финского залива высота длинной волны первоначально равна 30—50 см, а скорость распространения ее гребня составляет 40—60 км/час. При продвижении вдоль залива высота и скорость мало меняется, а с подходом к вершине залива высота возрастает, из-за того, что в этом месте залив мельче. Волна преодолевает залив за 7-9 часов. Если за это время ветра нет или он слабый, то волна движется только за счет силы тяжести. Такая волна называется свободной, за счет нее возможна подъемы в устье Невы до 2,0-2,5 м. Такая волна бывает достаточно редко, так как ей сопутствует ветер. Северный и южный ветер не влияют на изменение высоты волны, восточный уменьшает ее, так как является встречным, западный ветер способствует увеличению высоты волны. Если дует западный ветер и фронт перпендикулярен оси залива, совпадает с гребнем волны, перемещается с ним с одинаковой скоростью, то увеличение высоты волны является значительным. В этом случае фронт, будто бы «подхлестывает» волну. Подобные ситуации бывают в случае, когда углубляющийся циклон поворачивает на восток, дойдя до горла Финского залива, а его центр

перемещается вдоль залива, находясь севернее него. Эффект «подхлестывания» так же создается из-за смены южных ветров впереди фронта, на западные в его тылу и за счет перехода от пониженного давления перед фронтом к повышенному позади него. Поэтому длинная волна является преимущественно вынужденной, так как на нее всегда воздействует ветер [1].

Так же подъем воды в устье Невы (до 130—150 см) может произойти и без длинной волны, а за счет сильного и устойчивого западного ветра на Финском заливе. Но случаев, когда такой ветер присутствует над заливом длительное время почти не бывает, они захватывают лишь часть залива [1].

1.4.3 Многоцентровой циклон, располагающийся над полярным регионом и северной Атлантикой

12 августа 2011 года был введен в эксплуатацию комплекс защитных сооружений. На его строительство ушло 32 года [4].

При проектировке КЗС были изучены причины возникновения наводнений. Но несмотря на это после начала работы дамбы все равно наблюдаются подтопления. Это может быть связано с тем, что в последние годы наблюдается новая синоптическая ситуация, которая приводит к подтоплениям городских территорий даже при своевременно открытых затворах КЗС.

Сложность ситуации состоит в том, что на подъем реки Невы влияет малоподвижная многоцентровая депрессия над полярным регионом и северной Атлантикой. Санкт-Петербург и Балтика находятся в южной части этого барического образования и именно подпор ветра, который более суток не меняет свое направление и вызывает подтопление Невы даже при открытой дамбе. Траектория этого циклона изображена на рисунке 1.6.

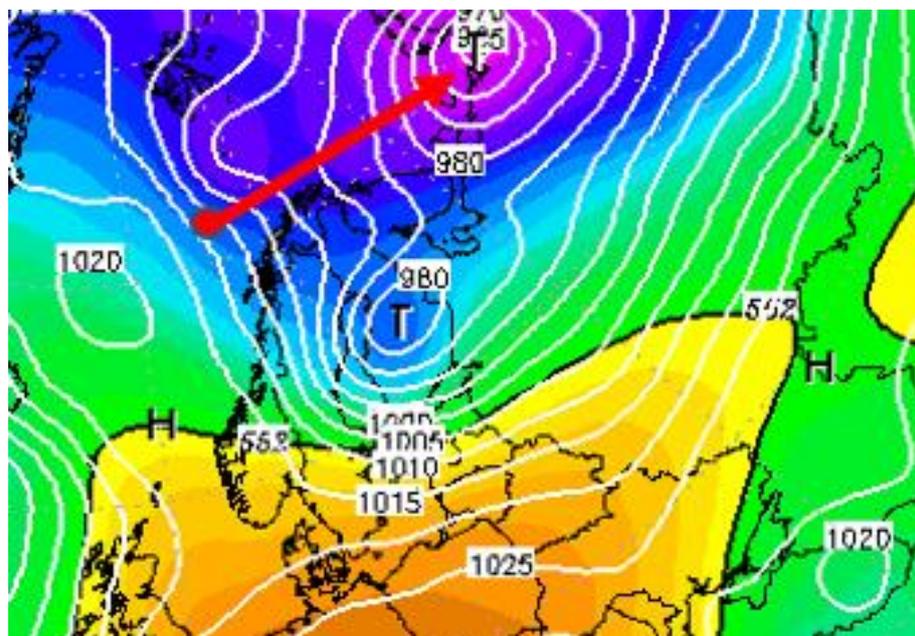


Рисунок 1.6 - Синоптическая карта с траекторией циклона
(АТ500+приземная)

Такой тип циклона, приводящий к наводнениям, встречается наиболее часто после 2000 года. Это может быть связано с тем, что в последний годы отмечаются значительные изменения климата многих регионов [13].

2. Циркуляционные процессы в умеренном поясе

2.1 Западный перенос воздушных масс

Западный перенос – это доминирующий перенос воздуха с запада на восток. Характеризуется высокой повторяемостью ветров западного направления. Эта циркуляция наблюдается между 50-й и 70-й параллелям Северного и Южного полушарий. Западный перенос имеет циркуляционную природу формирования и возникает в результате равного воздействия на воздушные частицы двух сил: силы Кориолиса и силы барического градиента [8].

С Атлантического океана западный перенос вторгается в Евразию, за счет этого он приносит влагу, формирует атмосферные осадки. С продвижением воздуха количество осадков снижается [8].

Зимой западный перенос воздушных масс помимо осадков приносит увеличение температуры, а летом – снижение температуры. Это связано с тем, что, например, в летнее время с океана поступают более холодные воздушные массы, а зимой океан отдает накопленное летом тепло [8].

На территорию Забайкалья западный перенос проникает только местами, из-за того, что область его воздействия ограничивается хребтами в области Якутии и Забайкалья [8].

За счет этого в области региона Якутии и Забайкалья западный перенос приносит неравномерное количество осадков, особенно в зимний период – в области действия западного переноса осадков больше, чем в восточной части от нее. Такое распределение осадков формирует мощный покров снега, что в свою очередь благотворно влияет на режим температур почв, а вследствие и процесс перезимовки растений [8].

2.2 Циклоны и антициклоны

Циклоны и антициклоны – атмосферные вихри, которые имеют синоптический масштаб. Они обладают особенностями строения метеорологических полей, за счет чего формируются различные условия погоды в разных областях этих вихрей [9].

Циклон – это область пониженного давления, в которой наблюдаются замкнутые изобары или изогипсы. Центр циклона – это область с самым низким давлением [9].

Атмосферное давление над уровнем моря на территории умеренных широт, обычно составляет 950 – 1010 гПа. Схематично циклон изображен на рисунке 2.1 [9].

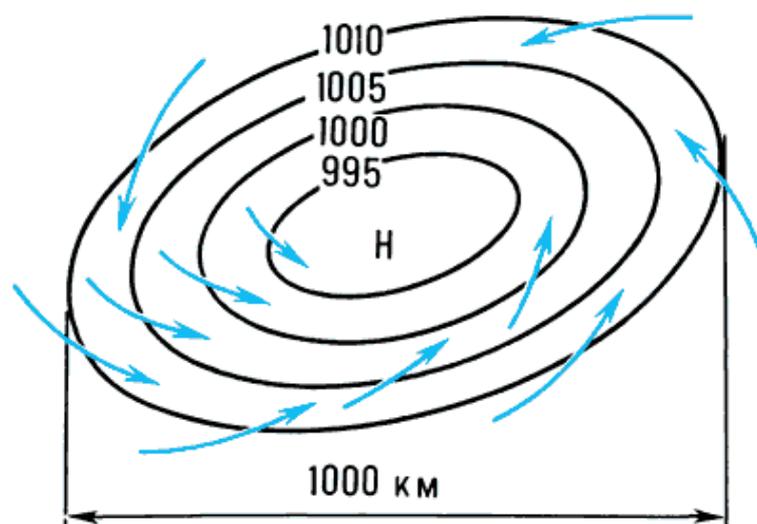


Рисунок 2.1 – Схематичное изображение циклонического вихря

Размер циклона в умеренных широтах в максимальной стадии развития, может отличаться в разных условиях: его диаметр изменяется от 500 км до 2000 км [9].

В тропических циклонах давление меньше – 950 – 970 гПа, а иногда опускается до 900 гПа [9].

Антициклон – область повышенного давления, которая имеет замкнутые изобары. Центр – это область с самым высоким давлением. Схематично антициклон изображен на рисунке 2.2 [9].

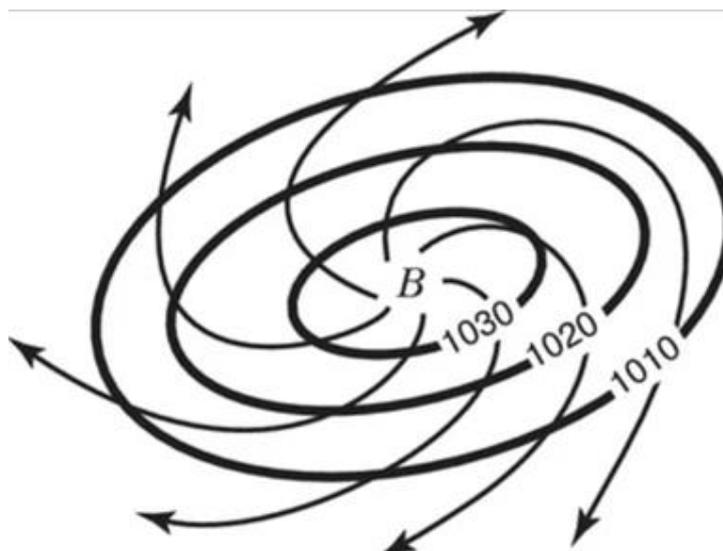


Рисунок 2.2 – Схематичное изображение антициклонического вихря

В центральной части антициклона атмосферное давление над уровнем моря составляет 1000 – 1035 гПа. А его размер в стадии максимального развития больше, чем у циклона и составляет 2000 – 3000 км [9].

Циклоны и антициклоны зарождаются у земной поверхности, затем начинают обнаруживаться на высотных картах. В зависимости от степени развития их делят на низкие, средние и высокие [9].

По вертикальному развитию циклоны и антициклоны разделяют на несколько групп:

1. Низкие. В этом случае замкнутые изогипсы наблюдаются на приземной карте, возможны на АТ850, выше они не наблюдаются [10].
2. Средние. В этом случае замкнутые изобары наблюдаются в нижних и средних областях тропосферы [10].

3. Высокие. В этом случае замкнутые изобары наблюдаются на всех картах стандартных высот [10].

4. Верхние. В этом случае замкнутые изобары отсутствуют на приземной карте, но наблюдаются на некоторых уровнях тропосферы [10].

5. Стратосферные циркуляции – это высокие циклоны и антициклоны, которые располагаются от тропосферы до нижнего уровня стратосферы [10].

Проводя анализ циклонов и антициклонов, рассматривают оси барических объектов, они представлены на рисунке 2.3. Виды осей:

1) горизонтальные – оси большая и малая ось, при замкнутых изобарах в форме эллипса [10];

2) высотная ось – линия от центра циклона (антициклона) на приземной карте до центра этого же циклона (антициклона) на картах абсолютной топографии [10].

Можно получить проекцию высотной оси циклонов (антициклонов) на горизонтальную плоскость, если нанести на карту местоположение центров на разных высотах [10].

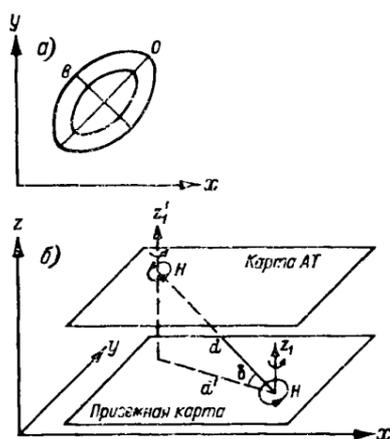


Рисунок 2.3 – Оси барических систем
a - схема горизонтальных осей симметрии
б - схема наклонной оси

В некоторых случаях положение центров на приземной карте и картах абсолютной топографии неизменно. Такая ось называется вертикальной [10].

На картах погоды невозможно точно определить местоположение центра циклона (антициклона).

Циклоны и антициклоны в своем развитии проходят несколько стадий:

- 1) возникновение циклона или антициклона – на этой стадии появляется первая замкнутая изобара. Продолжительность около суток [10];
- 2) молодой циклон или антициклон – на этой стадии циклон углубляется, а антициклон усиливается [10];
- 3) максимальное развитие циклона или антициклона – на этой стадии давление в центре изменяется немного [10];
- 4) заполнение циклона и разрушение антициклона – это последняя стадия жизни барического образования [10].

Если рассматривать фронтальную природу образования циклона, то можно выделить три стадии развития, они представлены на рисунке 2.4 [10].

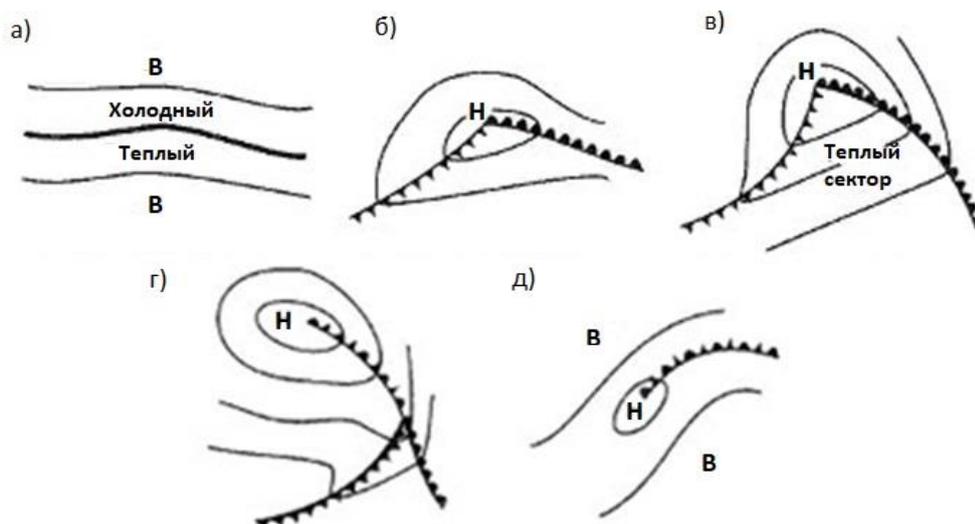


Рисунок 2.4 – Стадии развития циклона

- а) начальная стадия; б) молодой циклон; в) молодой циклон;
г) окклюдированный циклон; д) заполнившийся циклон*

Первая стадия развития называется фронтальная волна. Она наблюдается от первых признаков зарождения до первой замкнутой изобары [10].

Вторая стадия называется молодой циклон. Наблюдается от образования барического образования до начала окклюдирования [10].

Третья стадия называется окклюдированный циклон. Эта стадия наблюдается от начала окклюдирования до исчезновения циклона [10].

На всех этапах развития барическое образование обладает трехмерной структурой. Каждая стадия длится от нескольких часов до нескольких дней [10].

Каждый циклон и антициклон проходит все стадии развития за свою жизнь. Иногда волны на фронтах не подвергаются дальнейшему развитию [10].

Когда циклон находится в стадии молодого циклона имеется вероятность начала стадии заполнения, а когда антициклон находится на стадии молодого антициклона может начаться процесс разрушения, минуя стадию максимального развития [10].

Все барические образования разделяются на фронтальные и внутримассовые, в зависимости от условий возникновения [9].

Внутримассовые барические образования разделяются на:

1) тропические циклоны – формируются над океанами между 5° и 20° в обеих частях Земли. Давление по горизонтали в тропических циклонах меняется значительно больше, чем в умеренных широтах. За счет этого скорость ветрового потока часто выше 80-100 км/ч [9];

2) термические циклоны – образуются в летний период над сушей при нагреве воздуха от подстилающей поверхности. В дневное время на приземной карте очерчиваются максимум двумя изобарами. Ночью они заполняются или начинают исчезать [9];

1) Передняя часть циклона. Она находится перед теплым фронтом, и он формирует погоду в этой части [10].

При приближении к центру циклона и теплему фронту слоистая облачность становится более мощной, что повышает возможность выпадения обложных осадков [10].

При приближении к холодному фронту фиксируются атмосферные осадки ливневого характера. По мере приближения к зоне теплого фронта наблюдается ухудшение видимости. В холодное время года перед теплым фронтом возможен гололед и обледенение, так как внизу находится холодный воздух, а наверху теплы. В зоне атмосферных фронтов наблюдается сильный ветер [11].

2) Тыловая часть циклона. Она находится за холодным фронтом. Эта зона оказывает значительное воздействие на формирование погоды [10]. Возможно выпадение ливневых осадков при высоком проценте относительной влажности и неустойчивом воздухе [10].

В сухих холодных воздушных массах, при росте давления за холодным фронтом, образуются нисходящие движения воздуха, которые приводят к безоблачной или малооблачной погоде [10].

3) Теплый сектор циклона. Он находится в области между теплым и холодным фронтом. Погода имеет два типа в некоторых случаях возможны приподнятые инверсии, тогда частица воздуха не поднимается высоко и задерживающий слой расположен низко, что вызывает возникновение дымки или туманов [11].

Большое воздействие на погоду оказывает влажный и устойчивый теплый воздух. Этой воздушной массе присущи слоистые и слоисто-кучевые облака, которые могут приносить морозящие осадки и адвективные туманы [10].

В стадии молодого циклона зимой над сушей в области теплого сектора сплошные слоистые, слоисто-дождевые и слоисто-кучевые облака. Нижняя

граница облаков низкая, иногда опускается до земли, за счет чего присутствует плохая видимость. Осадки преимущественно обложного и морозящего характера [11].

Погода летом над сушей зависит от относительной влажности воздуха и устойчивости теплого воздуха. Наблюдается малооблачная или облачная погода с кучевой и мощно-кучевой облачностью, возможны грозы и ливневые осадки. Днем в основном наблюдается кучевая облачность [10].

Также в летнее время возможны шквалы, турбулентность особенно на фронтах второго рода [11].

В заполняющихся циклонах все процессы слабее [11].

Начало окклюзии циклона наступает на стадии максимального развития. В некоторых случаях при окклюдировании циклона может образовываться вторичный теплый сектор и наблюдаются несколько областей в которых погодные условия совпадают с погодой в молодом циклоне, в этом случае происходит регенерация [10].

Схема вертикального разреза окклюдированного циклона изображена на рисунке 2.6 [10].

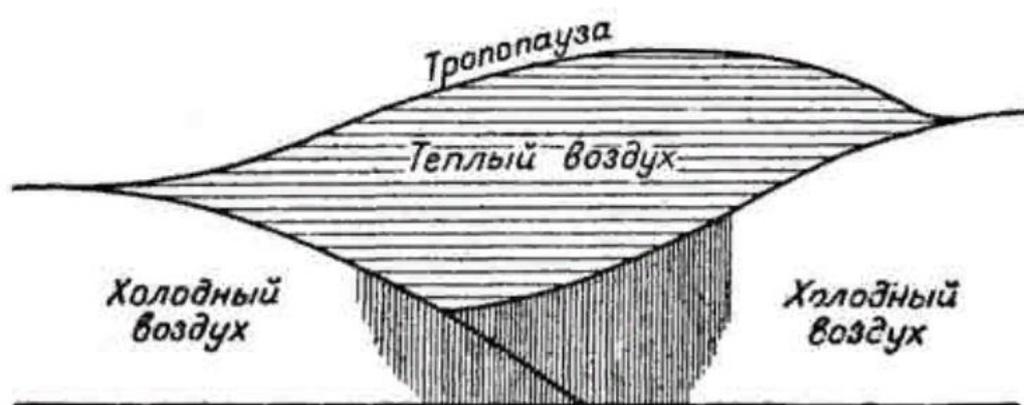


Рисунок 2.6 – Схема вертикального разреза циклона в состоянии окклюзии

Иногда во вторичном теплом секторе в холодное время года относительно теплый воздух внизу, который наблюдается за фронтом

окклюзии, имеет неустойчивость, а в области верхней тропосферы становится холодным, за счет этого возможны ливневые осадки [10].

Есть две области циклона, которые кардинально различны по погодным условиям:

- 1) центральная и передняя часть циклона перед фронтом окклюзии [10];
- 2) тыловая часть циклона за фронтом окклюзии [10].

В заполняющемся окклюдированном барическом образовании фронты могут размываться, наблюдаются сплошные облака и обложные осадки. Зоны этих облаков и осадков становятся обособленными.

Со временем погода начинает выравниваться, контрасты температур ослабевают и циклон заполняется. Однако, на высотах циклон продолжает наблюдаться достаточно длительное время [10].

Погода в ложбине схожа с погодой в циклоне, но в ложбине имеется возможность для турбулентного подъема воздуха [11].

Погода в гребне схожа с погодой в антициклоне. Летом с утра возможно появление радиационного тумана. Зимой возможны радиационные туманы и ночью, и утром. При наличии инверсии в приземном слое, могут наблюдаться довольно низкие слоистые и слоисто-кучевые облака и выпадать слабые осадки [11].

На восточной периферии антициклона адвекция холода, из-за этого отмечается хорошая погода, особенно в центральной части, где наблюдается штиль. На западной периферии антициклона ветер южных составляющих, в переходные сезоны в некоторых случаях отмечается дымка и адвективные туманы [11].

Летом в седловине возможны кучево-дождевые облака, ливни и грозы. Зимой возможны радиационные туманы [11].

2.4. Погодные условия в антициклоне

Обычно на погоду в антициклонах оказывают влияние параметры воздушных потоков,двигающиеся с различных очагов формирования и взаимодействие их с подстилающей поверхностью [10].

В центре антициклона воздух опускается вниз, за счет этого преимущественно господствует малооблачная погода. В зимний период возможны сплошные слоистые и слоисто-кучевые облачные системы. Они наблюдаются в перифериях антициклона под слоем инверсии при большой относительной влажности [10].

На границах антициклона наблюдаются погодные условия, которые схожи с погодными условиями в примыкающих секторах циклонов, которые находятся рядом [10].

На северной границе антициклона возможна связь с теплым сектором ближайшего циклона. В холодное время года здесь наблюдается значительная и сплошная слоисто и слоисто-кучевая облачность, иногда возможны небольшие осадки, также возможны туманы [10].

В теплое время года на северной границе антициклона возможны облака верхнего яруса, а в дневное время может возникать кучевая облачность [10].

Западная граница антициклона находится по соседству с передней частью циклона. Зимой здесь наблюдаются слоистые и слоисто-кучевые облачные системы. Они могут достигать больших высот, если имеются увлажненные и достаточно холодные воздушные массы. В этом случае возможны большие области, в которых наблюдаются слабые осадки, которые смещаются вдоль изобар, огибая антициклон по часовой стрелке [10].

Летом на западной границе антициклона возможны грозы, в случае, когда температура воздуха повышена и влажность значительна [10].

Южная граница антициклона соседствует с северной областью низкого давления. За счет этого здесь возможны облака верхнего яруса, иногда среднего, а в холодное время года возможны осадки в виде снега из высокостроенных облаков. Также в развитом антициклоне на южной границе зимой возможны сильные ветра и большие градиенты давления. В таких условиях возможно образование метелей [10].

Восточная граница антициклона находится по соседству с тыловой частью циклона. Летом, в неустойчивой воздушной массе, здесь наблюдаются кучевые и кучево-дождевые облачные системы. Из последнего типа облаков возможны ливневые осадки. Зимой возможна ясная погода или небольшие слоисто-кучевые облака, которые образуются за счет растекания кучево-дождевых облаков [10].

Погода в циклонах и антициклонах противоположна. Циклонам присущи плохие погодные условия, выпадение осадков, тогда как антициклон, наоборот, приносит хорошую, безоблачную или малооблачную погоду без выпадения атмосферных осадков [10].

Погодные условия различны не только в самих барических системах, но и в различных частях этих систем. Так же они по-разному изменяются при переходе из одной стадии развития в другую [10].

На погодные условия циклонов и антициклонов оказывают влияние различные воздушные массы, фронты, сезон. За счет этого прогнозирование погодных условий в том или ином барическом образовании является обособленной задачей [10].

2.5 Фронты

Фронты – это зоны, в которых происходит переход между воздушными массами, которые отличаются друг от друга по протяженности, строению и перемещению [10].

Можно разделить фронты по протяженности и циркуляционной значимости:

1) Основные – эти фронты являются высокими, тропосферными. Их горизонтальная протяженность составляет несколько тысяч километров, а вертикальная несколько километров. За счет этого они прослеживаются на приземных картах и картах барических топографии несколько дней. При этом они меняют свою форму и преодолевают большие расстояния. Этот тип фронтов разделяет воздушные массы, которые значительно отличаются друг от друга по своим свойствам. На этих фронтах начинают свою жизнь внетропические циклоны [10].

2) Вторичные – эти фронты располагаются низко, за счет этого они видны только на приземной карте, продолжительность их жизни пару суток. Их горизонтальная протяженность составляет несколько сотен километров, а вертикальная – 1-1,5 километр. При благоприятных условиях они могут перерасти в основные фронты. В тыловой части циклона наблюдаются холодные вторичные циклоны. Такие фронты находятся в циклоне, с которым они связаны и не выходят за его пределы [10].

3) Верхние - эти фронты образуются в тропосфере. Их можно обнаружить только на картах барической топографии и вертикальных разрезах. В условиях, когда на пути перемещения обычного фронта встречается сильно охлажденный воздух, он может стать верхним фронтом. К этому типу фронта относятся хорошо выраженные ВФЗ (высотно-фронтальная зона) шириной до 500 км [10].

Также можно разделить фронты по их вертикальному строению и условиям погоды:

1) простые фронты – этот тип фронтов подразделяется теплый и холодный [10];

2) сложные фронты – также их называют фронтами окклюзии, они бывают теплыми, холодными и нейтральными [10].

В случаях, когда теплый воздух поднимается вверх вдоль линии холодного фронта, фронт называют анафронтом. А в случаях, когда теплый воздух движется вниз по вертикальной линии холодного фронта – катафронтом [10].

Помимо этого, фронты могут быть обостренными, в тех случаях, когда они хорошо видны, и размытыми, когда они слабовыраженные [10].

Еще фронты можно классифицировать по географическим признакам:

1. Арктические фронты [10].
2. Полярные фронты (или фронт умеренных широт) [10].
3. Тропический фронт [10].

Теплый фронт смещается к более холодной воздушной массе, а за ним следует теплый воздух, а холодный воздух, который находится перед фронтом, отступает. Как правило такие фронты являются анафронтами [10].

Холодный фронт сдвигает теплый воздух, за ним перемещается холодный воздух, а теплый воздух перед фронтом отступает. Эти фронты, как правило, являются катафронтами [10].

Фронты, которые почти не перемещаются со временем называют малоподвижными. На рисунке 2.7, показано положение изобар для этих фронтов [10].

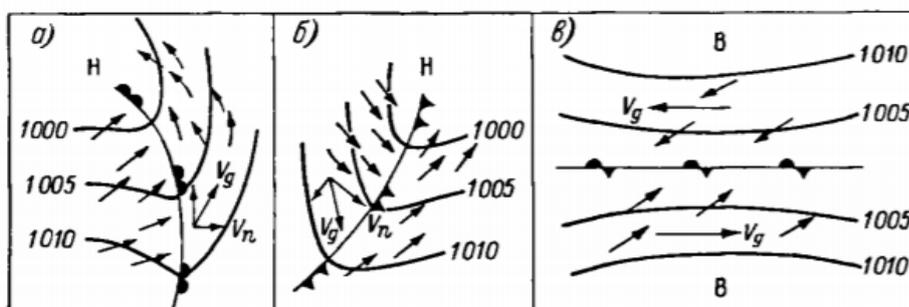


Рисунок 2.7 – Схема изобар на приземной карте

а – теплый фронт

б – холодный фронт

в – малоподвижный фронт

На направление ветра относительно изобар оказывает влияние подстилающая поверхность. Так в приземном слое, где влияние подстилающей поверхности велико, ветер отклоняется от изобар, тогда как в слое, где влияния подстилающей поверхности уже нет, ветер направлен вдоль изобар [10].

На перемещение фронта влияют изменения циркуляции. За счет этих изменений часть теплого фронта может превратиться в холодный, а холодный, наоборот, в теплый, а малоподвижные фронты могут начать смещаться. По зависимости этого смещения относительно воздушной массы можно отличить теплый и холодный фронт. Так как участки этих фронтов составляют основной фронт, они влияют на изменение этого фронта [10].

При изменении этого фронта могут возникать циклоны, в центре которых может поменяться знак фронта. В циклонах холодный фронт смещается значительно медленнее, чем теплый. Именно поэтому происходит слияние теплого и холодного фронта, при этом теплый воздух поднимается вверх, и таким образом образуется окклюзия. Схема такого процесса изображена на рисунке 2.8 [10].

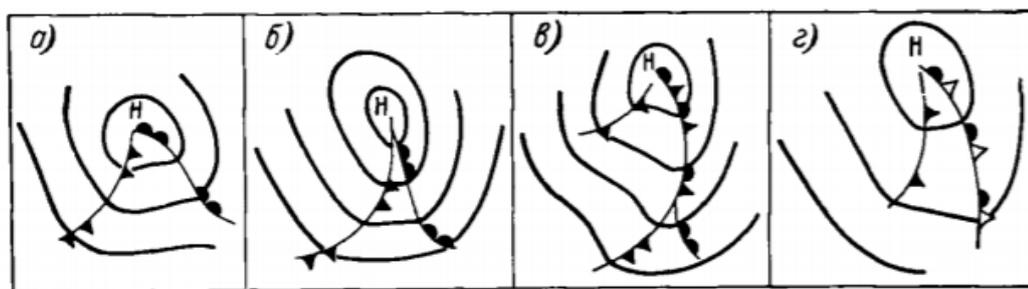


Рисунок 2.8 – Схема образования фронта окклюзии

Фронты окклюзии бывают теплые и холодные. Это зависит направления перемещения фронта и температур по обеим его сторонам. Если эти температуры приблизительно равны, то фронт называют нейтральным. Любой фронт окклюзии может быть малоподвижным [10].

Фронты окклюзии входят в систему основных фронтов, только являются неким деформированным участком этого фронта, но часто их относят к вторичным фронтам, так как воздушные массы по обе стороны фронта окклюзии близки по своим свойствам [10].

При переходе через фронт окклюзии разница температур небольшая (меньше 5°). По горизонтальной протяженности эти фронты, как и вторичные, не выходят за пределы циклона, на некоторых участках она может составлять пару тысяч километров. На таких участках фронт может стать основным и на нем может образоваться новый циклон. Срок жизни фронта окклюзии зависит от того, насколько развит циклон., чаще всего этот срок составляет 2-3 дня [10].

Так же все фронты могут быть резко или слабо выраженными, так же их называют обостренными и размытыми. В случаях, когда фронт обостренный, метеорологические параметры резко меняются при переходе через фронт, за счет этого их легко обнаружить на приземной карте. В случаях, когда размыт, эти параметры меняются незначительно, что затрудняет нахождение этого фронта на приземной и высотных картах [10].

3. Анализ синоптических особенностей формирования современных невских наводнений

3.1 Постановка целей и задач научно-исследовательской работы

С момента начала работы Комплекса защитных сооружений Санкт-Петербург (КЗС «Морзащита») от наводнений в 2011 году, городу перестали угрожать значительные подъемы уровня реки Невы в результате формирования длинной волны над Балтийским морем. Благодаря работе КЗС удалось предотвратить 13 наводнений, 9 из которых попадают в группу «особо опасные» или «сильные» (при подъеме воды до 2 м) [4].

Актуальность данного исследования заключается в том, что после начала работы комплекса защитных сооружений в настоящее время наблюдаются подтопления городских территорий, которые фиксируются при предотвращенных наводнениях.

Причиной невских наводнений является длинная волна, которая возникает при продвижении глубоких циклонов над Балтийским морем.

Известно, что циркуляционные процессы над северо-западом меняются [2], поэтому проанализировать современные невские наводнения и синоптические процессы, сопутствующие их возникновению, является актуальной задачей. В работе использован архив дат невских наводнений с 1921 года по 2020 год и синоптические карты по данным реанализа по модели GFSR (Глобальная система прогноза погоды).

Целью данной работы является анализ синоптических условий формирования невских наводнений и особое внимание предполагается уделить тем наводнениям, которые произошли после 2011 года.

Для выполнения поставленной цели предполагается решить следующие задачи:

1. Необходимо проанализировать все невиские наводнения, которые были в период с 1921 года по 2020 год и оценить их повторяемость. В данной работе невиские наводнения были разделены на две группы: невиские наводнения и сильные невиские наводнения, уровень подъема воды реки Невы у ординара превышает 2 м;

2. Проанализировать синоптические процессы, сопутствующие двум группам невиских наводнений, особое внимание уделить сильным;

3. Оценить изменения циркуляционных процессов, формирующих современные невиские наводнения. Особое внимание предполагается уделить наводнениям, которые вызвали подтопления после начала работы КЗС, то есть после 2011 года;

3.2 Анализ повторяемости невиских наводнений с 1921 г. по 2020 г.

В ходе работы над бакалаврским проектом были проанализированы невиские наводнения за период с 1921 г. по 2020 г. Они были разделены на две группы: сильные наводнения ($h \geq 2$ м) и обычные наводнения ($1,6 \text{ м} \leq h \leq 2 \text{ м}$). Всего было проанализировано 156 наводнений.

На первом этапе работы были проанализированы все виды наводнений, их повторяемость (рисунок 3.1 а) и средние за 10 лет уровни подъема воды (рисунок 3.1 б). Период исследования был разделен по десятилетиям: 1 – 1921 - 1930 гг.; 2 – 1931 – 1940 гг.; 3 – 1941 – 1950 гг.; 4 – 1951 – 1960 гг.; 5 – 1961 – 1970 гг.; 6 – 1971 -1980 гг.; 7 – 1981 – 1990 гг.; 8 – 1991 – 2000 гг.; 9 - 2001 – 2010 гг.; 10 – 2011-2020 гг.)

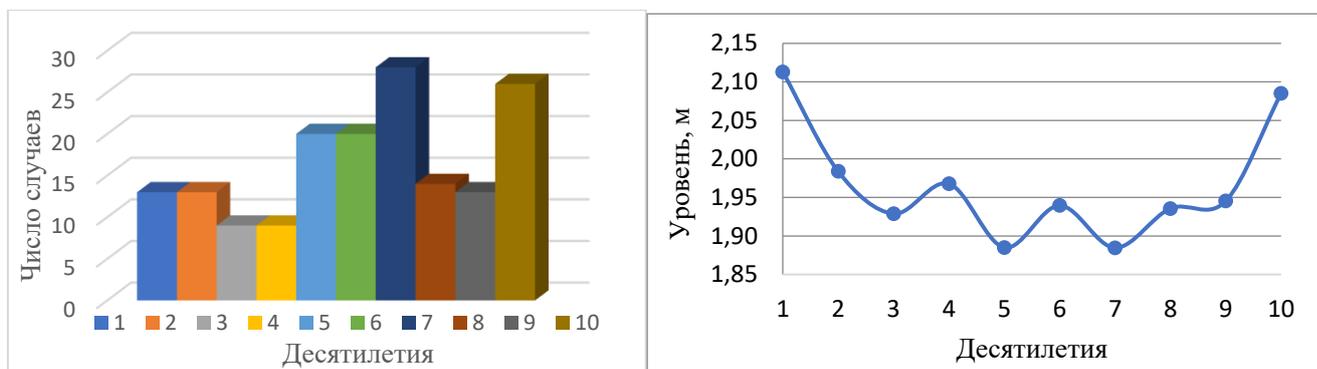
Результаты осреднения по 10 лет представлены в таблице 3.1. По данным таблицы и гистограммы можно сделать вывод о том, что в период 1981–1990 гг. было зафиксировано самое большое количество наводнений (28). Самая низкая повторяемость наводнений была зафиксирована в течении двух периодов – 1941–1950 гг. и 1951-1960 гг. (9). В то же время, средний

уровень подъема воды при наибольшем количестве наводнений был 1,88 м, а при наименьшем количестве – 1,97.

Таблица 3.1

Уровень наводнений в Санкт-Петербурге в период с 1921 г. по 2020 г.

Уровень подъема воды при невыходах по десятилетиям за 100 лет										
Десятилетия	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Период	1921-1930 гг.	1931-1949 гг.	1941-1950 гг.	1951-1960 гг.	1961-1970 гг.	1971-1980 гг.	1981-1990 гг.	1991-2000 гг.	2001-1010 гг.	2011-2020 гг.
Уровень, м	2,11	2,03	1,74	1,74	1,89	1,62	1,78	1,66	2,15	2,05
	1,93	2,39	2,16	1,95	1,71	1,79	2,16	2,01	1,71	2,6
	1,65	1,65	1,7	1,69	1,75	2,4	2,15	1,73	1,82	2,94
	2,28	1,77	2,12	2,22	2,03	2,42	1,78	1,84	1,83	2,67
	1,87	2,08	2,16	1,98	2,14	2,16	1,8	1,75	1,99	2,12
	3,8	1,91	1,9	2,93	1,71	1,64	1,6	2,04	1,65	2,48
	2,25	1,69	1,96	1,82	2,45	2,81	1,82	1,67	2,39	2,4
	1,7	2,3	1,89	1,7	1,78	1,76	1,72	2,19	2,24	1,9
	1,88	2,37	1,73	1,68	1,72	1,87	1,9	1,84	2,25	2,68
	1,82	2,33			1,67	1,67	1,7	2,27	1,79	2,3
	2,58	1,71				2,31	1,68	1,6	1,68	2,51
	1,97	1,89				2,04	1,99	1,72	1,92	1,85
	1,63	1,67				2	2,01	2,14	1,87	1,87
						1,95	1,72	2,64		2,14
						1,65	2,31			2,07
						1,95	1,7			1,8
						1,65	2,16			1,7
						1,72	1,81			1,65
						1,72	2,07			2,36
						1,66	1,91			1,65
						2,6			1,73	
						1,77			1,96	
						1,73			1,72	
						1,99			1,63	
						1,68			1,7	
						2			1,73	
						1,61				
						1,62				
Средний за 10 лет уровень, м	2,11	1,98	1,93	1,97	1,89	1,94	1,88	1,94	1,95	2,09



а

б

Рисунок 3.1 – Наводнения в Санкт-Петербурге в период с 1921 г. по 2020 г.

а – повторяемость, б – средний за 10 лет уровень подъема воды

Десятилетия: 1 – 1921 - 1930 гг.; 2 – 1931 – 1940 гг.; 3 – 1941 – 1950 гг.; 4 – 1951 – 1960 гг.; 5 – 1961 – 1970 гг.; 6 – 1971 -1980 гг.; 7 – 1981 – 1990 гг.; 8 – 1991 – 2000 гг.; 9 - 2001 – 2010 гг.; 10 – 2011-2020 гг.)

Данный факт можно объяснить тем, что доля сильных наводнений в период с 1951 – 1960 гг. была выше (44%), чем в период с максимальной повторяемостью (39%).

Также можно заметить, что после 70-х годов повторяемость наводнений заметно увеличилась. Это связано с тем, что в эти годы наблюдалось глобальное потепление и увеличение числа случаев западной формы циркуляции. [3]

Далее были проанализированы сильные наводнения ($h \geq 2\text{м}$), их повторяемость (рисунок 3.2 а) и средние за 10 лет уровни подъема воды (рисунок 3.2 б). Результаты осреднения по 10 лет представлены в таблице 3.2.

Таблица 3.2

Уровень сильных наводнений в Санкт-Петербурге в период с 1921 г. по 2020 г.

	Уровень подъема воды при сильных невыхских наводнениях по десятилетиям за 100 лет									
Десятилетия	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Период	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, м	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
						2,00	2,60			2,40
										2,68
										2,30
										2,51
										2,07
									2,36	
Средний за 10 лет уровень, м	2,60	2,28	2,15	2,58	2,21	2,31	2,21	2,26	2,26	2,43

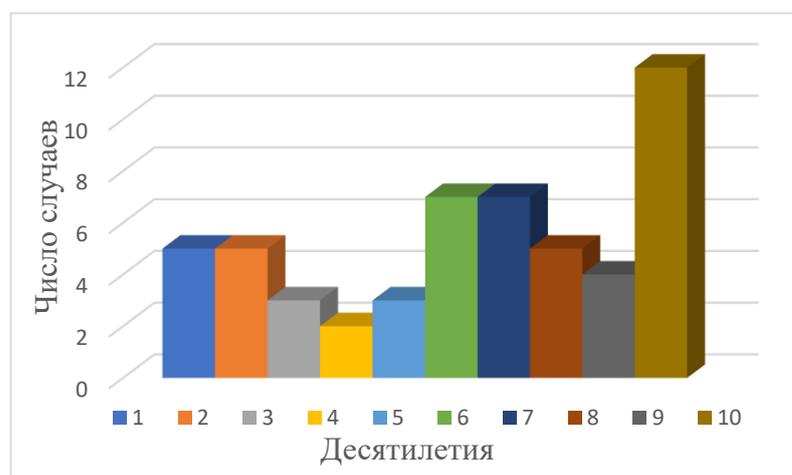


Рисунок 3.2 – Сильные наводнения в Санкт-Петербурге в период с 1921 г. по 2020 г.

(Десятилетия: 1 – 1921 - 1930 гг.; 2 – 1931 – 1940 гг.; 3 – 1941 – 1950 гг.; 4 – 1951 – 1960 гг.; 5 – 1961 – 1970 гг.; 6 – 1971 -1980 гг.; 7 – 1981 – 1990 гг.; 8 – 1991 – 2000 гг.; 9 - 2001 – 2010 гг.; 10 – 2011-2020 гг.)

За период 2011–2020 гг. было зафиксировано самое большое количество сильных наводнений (12). А наименьшее количество сильных наводнений было зафиксировано в период с 1951 по 1960 гг. (2).

За весь период, который подвергался исследованию было 3 сильных, близких к катастрофическим, наводнения: зафиксированы 23 сентября 1924 года (380 см), 15 октября 1955 года (293 см) и 27 декабря 2011 года (294 см).

В результате анализа повторяемости невских наводнений за период с 1921 по 2020 гг. можно сделать вывод о том, что последнее десятилетие повторяемость сильных невских наводнений значительно возросла. Средний уровень за десятилетие сопоставим с началом и серединой прошлого века, когда были зафиксированы самые сильные подъемы р. Невы.

3.3. Анализ траекторий движения барических образований при сильных невских наводнениях с 1921 по 2000 гг.

В ходе работы были построены траектории движения барических образований приводящих к возникновению сильных невских наводнений за период с 1921 по 2000 гг. Траектории представлены на рисунке 3.3.

Всего за период исследования было проанализировано 53 случая невских наводнений, при которых уровень подъема воды в реке Нева превышал 2 м.

Так как необходимо было выявить синоптические особенности формирования невских наводнений последних лет, то на первом этапе были проанализированы сильные невские наводнения до 2000 года, всего 41 случая из 53 зафиксированных за весь период исследования.

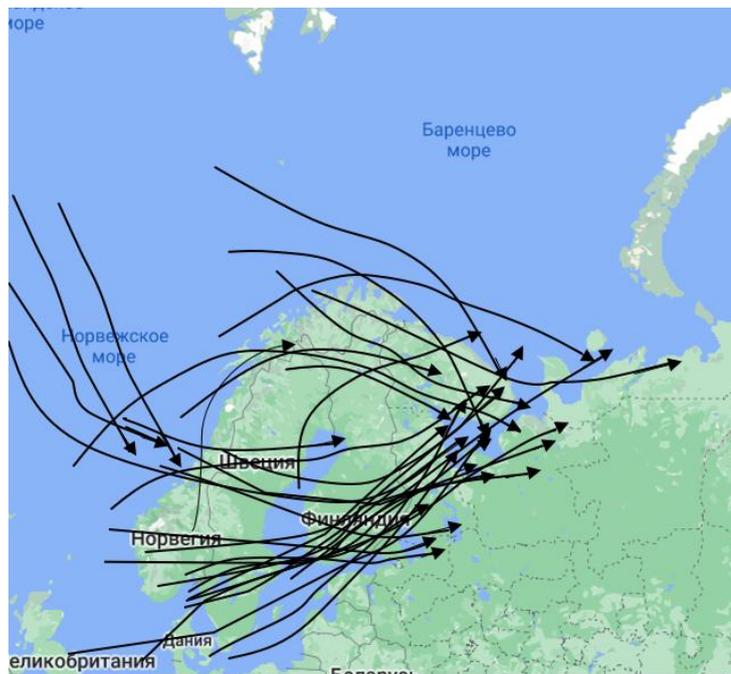


Рисунок 3.3 – Траектории движения барических образований при сильных наводнениях с 1921 года по 2000 год

Для построения траекторий, представленных на рисунке 3.3 были использованы карты реанализа модели GFSR (Глобальная система прогноза погоды), представленные на сайте немецкой метеорологической службы [12].

Для каждого случая при построении траекторий применялись совмещенные карты погоды: приземная и АТ500 с периодом 6 часов. Для того, чтобы выявить траекторию циклона, вызвавшего подъем уровня Невы, было целесообразно анализировать синоптическую ситуацию начиная за сутки до наводнения.

Далее все полученные траектории были осреднены и разделены на три основных типа. Осредненные траектории за период с 1921 год по 2000 год представлены на рисунке 3.4.

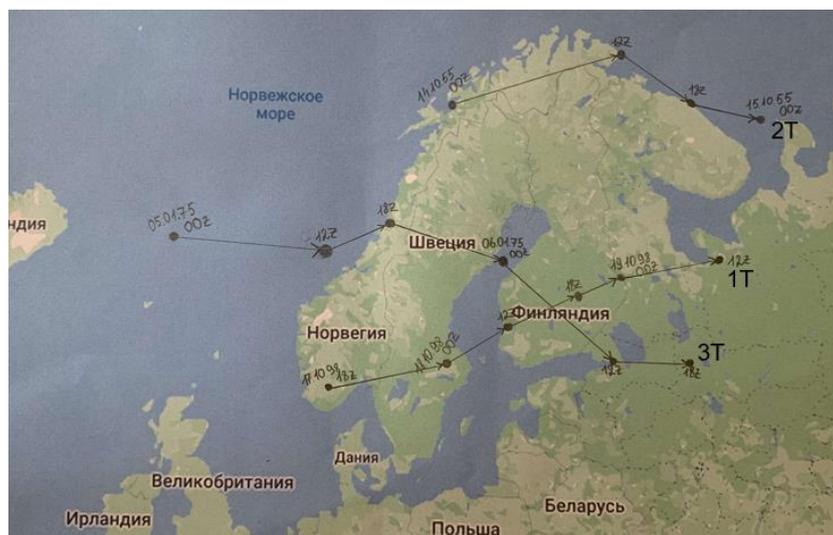


Рисунок 3.4 – Осредненные траектории движения барических образований при сильных наводнениях с 1921 года по 2000 год

В результате анализа траекторий барических депрессий, сопутствующих неврским наводнениям, были выделены три осредненных типа.

3 типа траекторий наводненческих циклонов с 1921 по 2000 гг.:

1) При первом типе (1Т) циклон, выходящий с Западной Европы со стороны Стокгольма, движется к горлу Финского залива, тем самым образуется длинная волна, которая следует в северо-восточном направлении на северо-восток Финляндии.

2) При втором типе (2Т) циклон, сформированный над северной частью Норвежского моря или северо-западом Кольского полуострова, смещается в западном направлении. В это время над Санкт-Петербургом наблюдается глубокая ложбина;

3) При третьем типе (3Т) циклон, выходящий со стороны Исландии, движется в сторону Ботнического залива, после смещается в юго-восточном направлении пересекая Финляндию. Наводнение возникает за счет того, что в Санкт-Петербурге формируется ложбина.

Наиболее опасным является первый тип, так как в этом случае образуется длинная волна от Стокгольма к Санкт-Петербургу, долгое время наблюдается

западный ветер, который подпирает Неву и вклад в наводнение могут вносить сейшевые колебания, которые проходят по оси Стокгольм-Санкт-Петербург. При такой ситуации наводнение наиболее часто бывает сильным или катастрофическим.

Примером такого случая было наводнение 19 октября 1998 года. Она представлена на картах погоды, рисунок 3.5

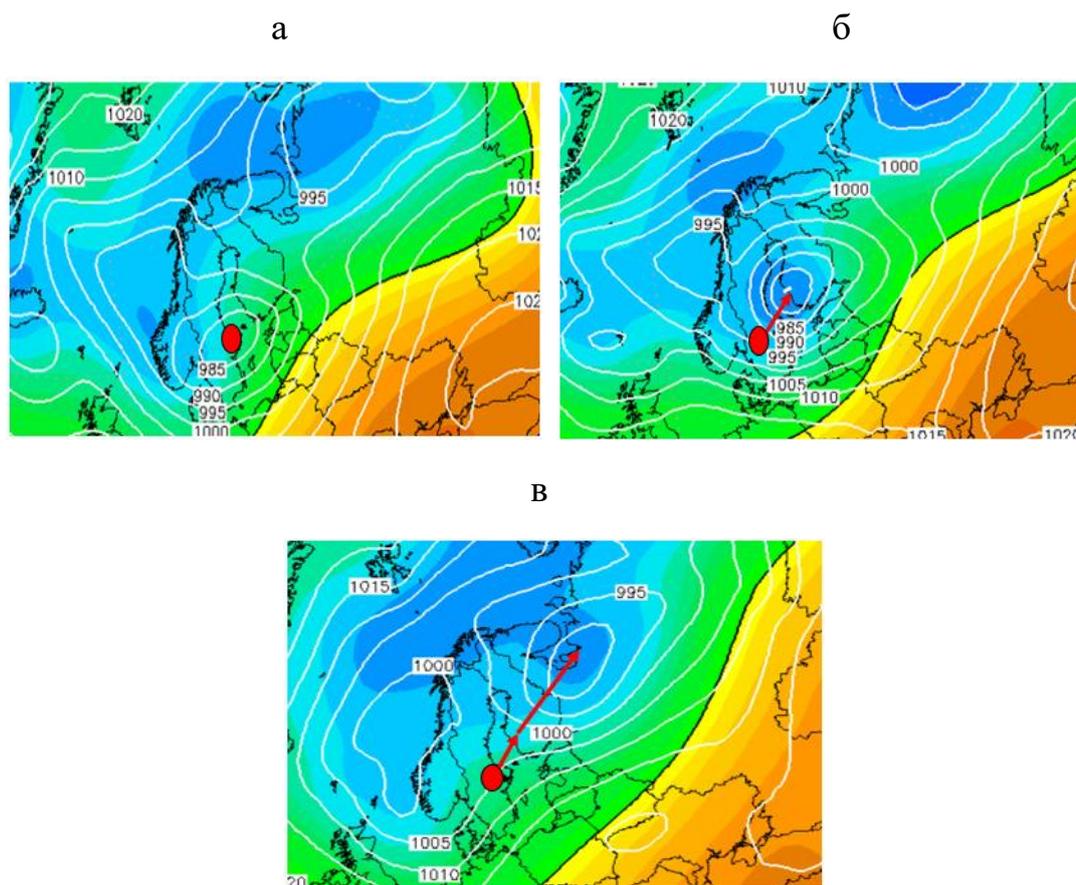


Рисунок 3. 5 – Синоптические карты наводнения 19 октября 1998 года
(АТ500+приземная)

Наводнение вызывает циклон, который выходит на Балтику в районе Стокгольма (рис.а), затем он движется в сторону Финского залива и когда он доходит до него, с сформированный длинной волной, циклон покидает Балтику, уходит на северо-восток Финляндии (рис. в), а длинная волна движется в сторону Санкт-Петербурга. За сутки циклон прошел 1900 километров. В этом случае уровень подъема воды составил 214 см.

Так же траектория наводненческого циклона такого типа наблюдалась 4 октября 1921 года. ПРИЛОЖЕНИЕ 1. 4 октября 1921 года наводнение вызывает циклон, который выходит со стороны Северного моря, затем он движется в сторону Стокгольма, затем к Санкт-Петербургу через центральную Балтику. Скорость движения циклона составляла 1700 километров за сутки (71 км/ч). В этом случае уровень подъема воды составил 211 см.

Подобный случай движения циклона, приводящего к подтоплению, наблюдался 16 октября 1994 года. Синоптические карты этого случая показаны на рисунке 3.6

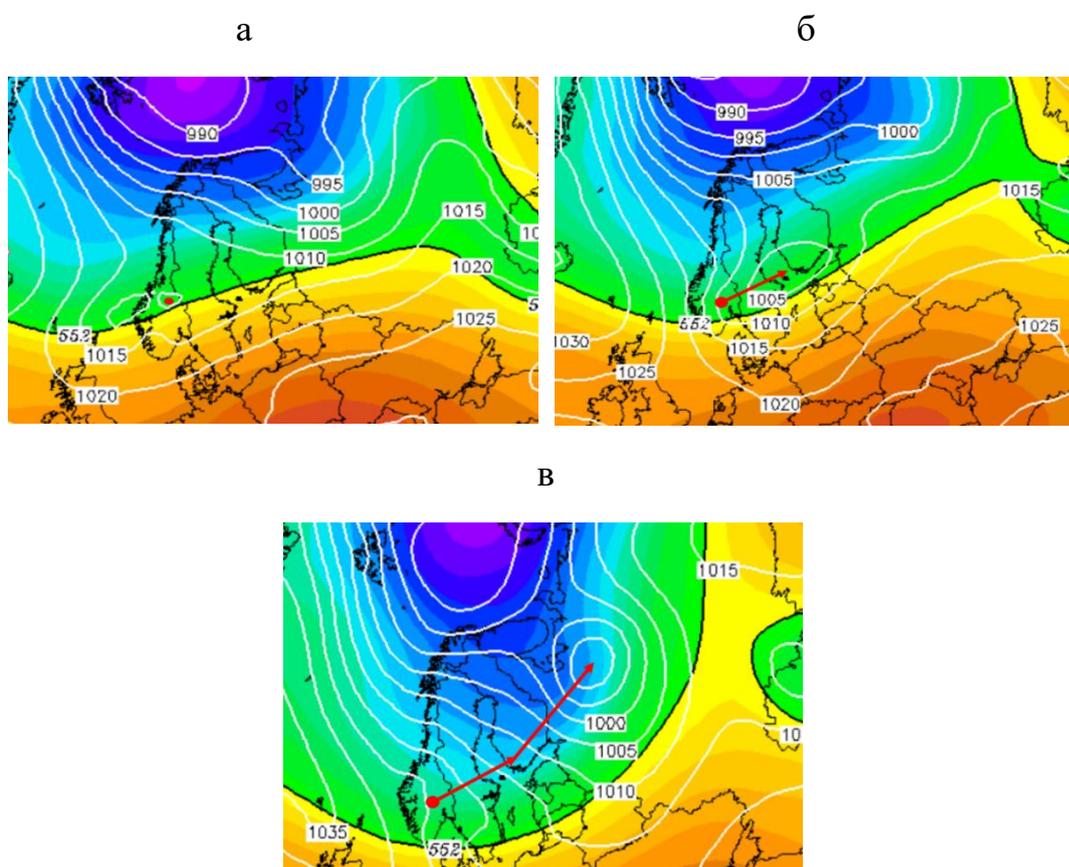


Рисунок 3. 6 – Синоптические карты наводнения 16 октября 1994 года
(АТ500+приземная)

Циклон образовался в Норвегии, далее двигался к Финляндияю, затем в сторону Архангельской области. Циклон прошел 1870 километров за сутки. Уровень воды достиг отметки 160 см.

Рассмотрим траекторию второго типа.

Случай с траекторией второго типа наблюдался 15 ноября 1955 года. Он представлен на картах погоды, рисунок 3.7.

Наводнение в Санкт-Петербурге вызывает глубокая ложбина. 1955 год известен в Санкт-Петербурге и наводнение, которое произошло 15 октября еще помнят очевидцы. Гидрометеослужба смогла спрогнозировать катастрофический подъем воды с заблаговременностью 7 часов.

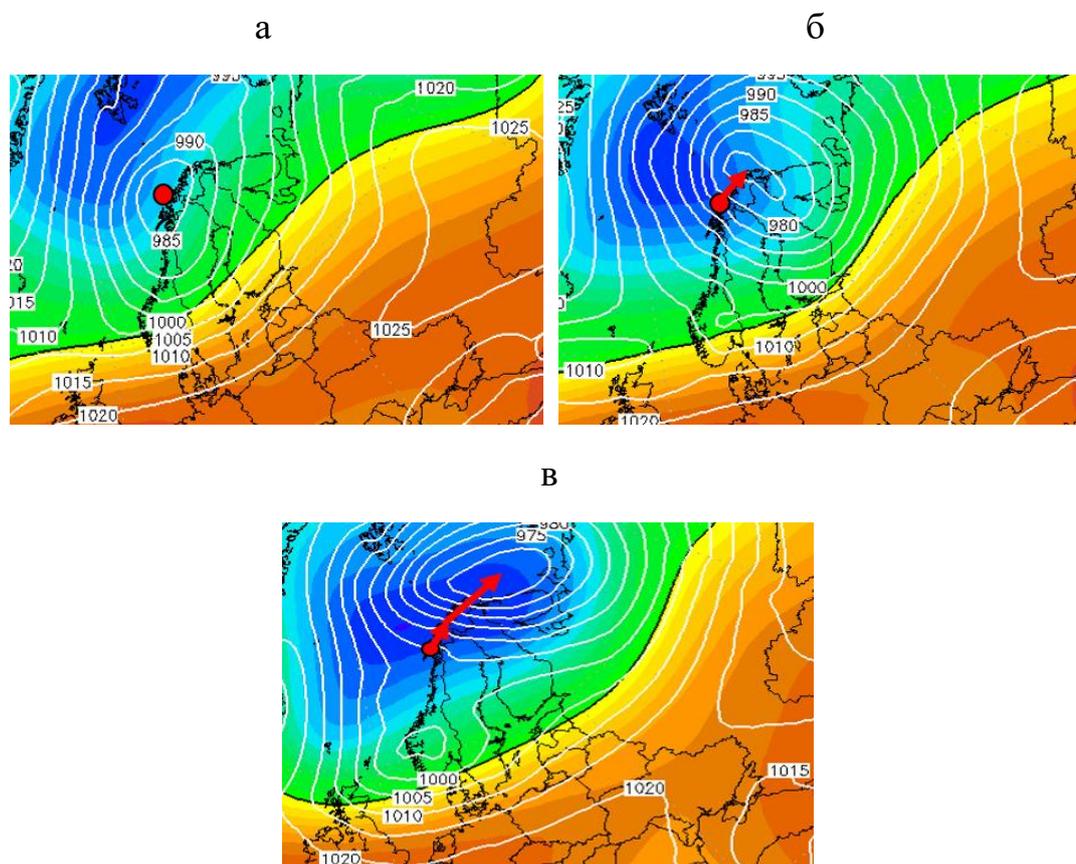


Рисунок 3. 7 – Синоптические карты наводнения 15 октября 1955 года
(АТ500+приземная)

Наводнение вызывает циклон, вернее продвижение по опасной траектории над Балтикой его ложбины. Циклон выходит с Норвегии и

двигается в сторону Баренцева моря. В этом случае уровень подъема воды составил 293 см. Это было одно из самых сильных наводнений, близкое к катастрофическому, за исследуемый период.

Так же случай траектории 2 типа наблюдался 23 сентября 1924 года, в этот день было катастрофическое наводнение с уровнем подъема воды до 380 см. Он представлен на картах погоды, рисунок ПРИЛОЖЕНИЕ 2.

Второе по силе катастрофическое наводнение в Санкт-Петербурге вызывает циклон, который движется с юго-запада Норвегии на север, в сторону Баренцева моря. За сутки циклон прошел расстояние равное 1160 километров.

По данным исследований, в этом случае в подъем воды уровня Невы внесли вклад сейши и барометрический фактор (закон обратного барометра: при понижении давления на 1 гПа фиксируется повышение уровня воды на 13 мм [3]. Это наводнение было катастрофическим и подъем воды составил 380 см.

Подобная ситуация наблюдалась и 24 ноября 1922 года. 24 ноября 1922 года циклон выходит с Норвежского моря, движется вдоль Скандинавского полуострова в сторону Кольского полуострова. Скорость движения циклона составила 1476 километров в сутки. Вода в Неве поднялась до отметки 228 см.

Рассмотрим 3 тип траектории.

В качестве примера приведем наводнение 6 января 1975 года. Он представлен на картах погоды, рисунок 3.8

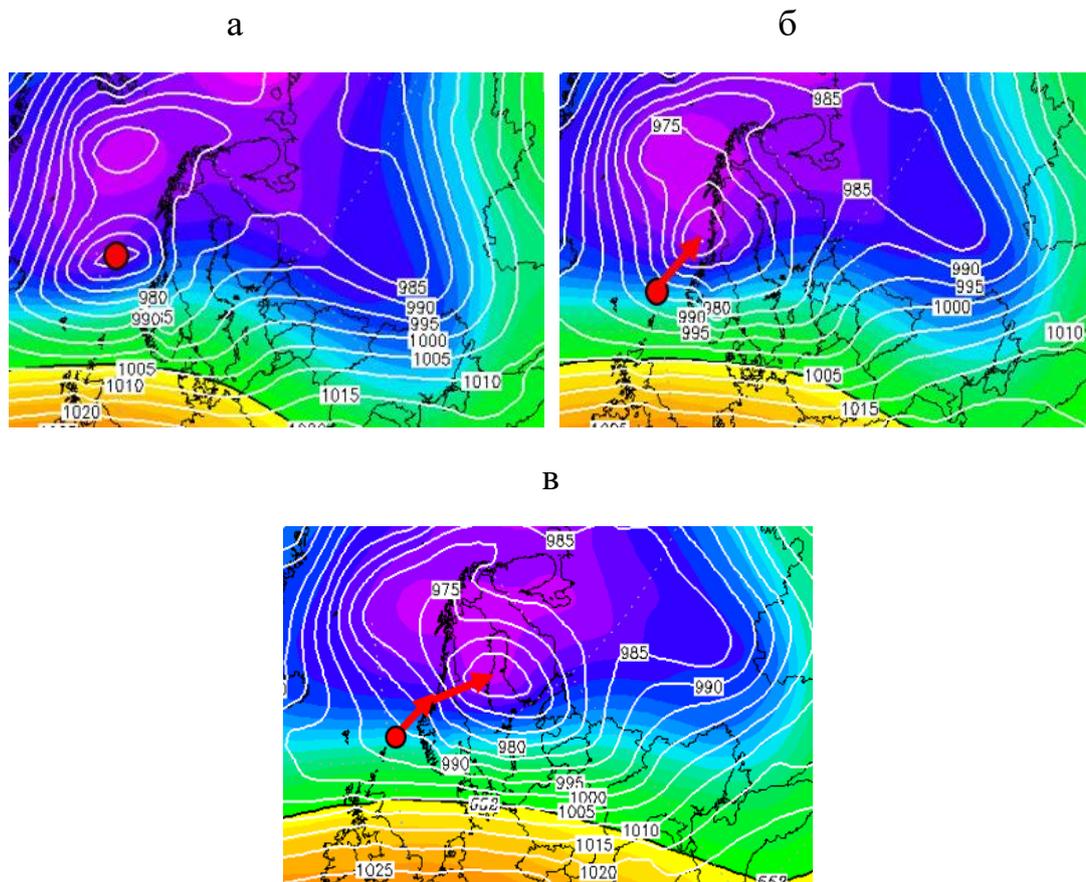


Рисунок 3. 8 – Синоптические карты наводнения 6 января 1975 года
(АТ500+приземная)

В результате анализа барического поля, представленного на рисунке 3.8 можно заключить, что наводнение вызывает циклон, который выходит с Северного моря, двигается в сторону Норвегии, а затем в сторону Финляндии. Циклон прошел 1144 километра за сутки. В этом случае уровень подъема воды составил 216 см.

Этот же тип траектории наводненческого циклона наблюдался 22 октября 1921 года. ПРИЛОЖЕНИЕ 3.

В результате анализа синоптической ситуации данного случая можно отметить, что наводнение вызывает циклон, который выходит с Норвежского моря, двигается в сторону Финляндии, а затем в сторону Карелии. За сутки этот циклон прошел 1247 километров. В этом случае уровень подъема воды

составил 193 см. Подобная траектория наводненческого циклона ситуация наблюдалась и 23 января 1993 года.

Наводнение вызвал циклон, который вышел с Норвежского моря, далее двигался к Финляндии, затем в сторону Архангельской области. Циклон прошел 1926 километров за сутки. Уровень подъема воды составил 204 см.

В результате анализа синоптической ситуации, сопутствующей формированию сильных невских наводнений в работе, были выделены 3 типа траекторий наводненческих циклонов. Циклоны, формирующие длинную волну в центральной Балтике, которая в дальнейшем вызывает сильные подъемы уровня в Санкт-Петербурге двигаются в среднем со скоростью 70 км/ч.

3.4. Основные траектории движения барических образований при невских наводнениях с 2000 года

Рассмотрим современные сильные невские наводнения. В перечень наводнений входят те, которые наблюдались с 2000 по 2011 гг до запуска комплекса защитных сооружений СПб и с 11 сентября 2011 по 2020 гг. в период работы КЗС.

После 2000 года синоптическая ситуация, сопутствующая формированию сильных невских наводнений, претерпела некоторые изменения. Преимущественно встречается новый тип синоптического процесса, когда Санкт-Петербург долгое время находится в южной части мощной многоцентровой циклонической депрессии, располагающейся над полярным регионом и северной Атлантикой. При таком случае воды Невы будут подпираться западным ветром несколько дней.

Также в последний годы наблюдается ситуация, близкая к 1 типу, но траектория несколько смещена к северу. Такой случай наблюдался 9 января 2005 года, он представлен на картах погоды, рисунок 3.9 В этом случае

фиксируется подъем воды за счет циклона, который выходит с Норвегии, движется в сторону Ботнического залива, а после смещается к Архангельской области. Более подробно траектория изображена

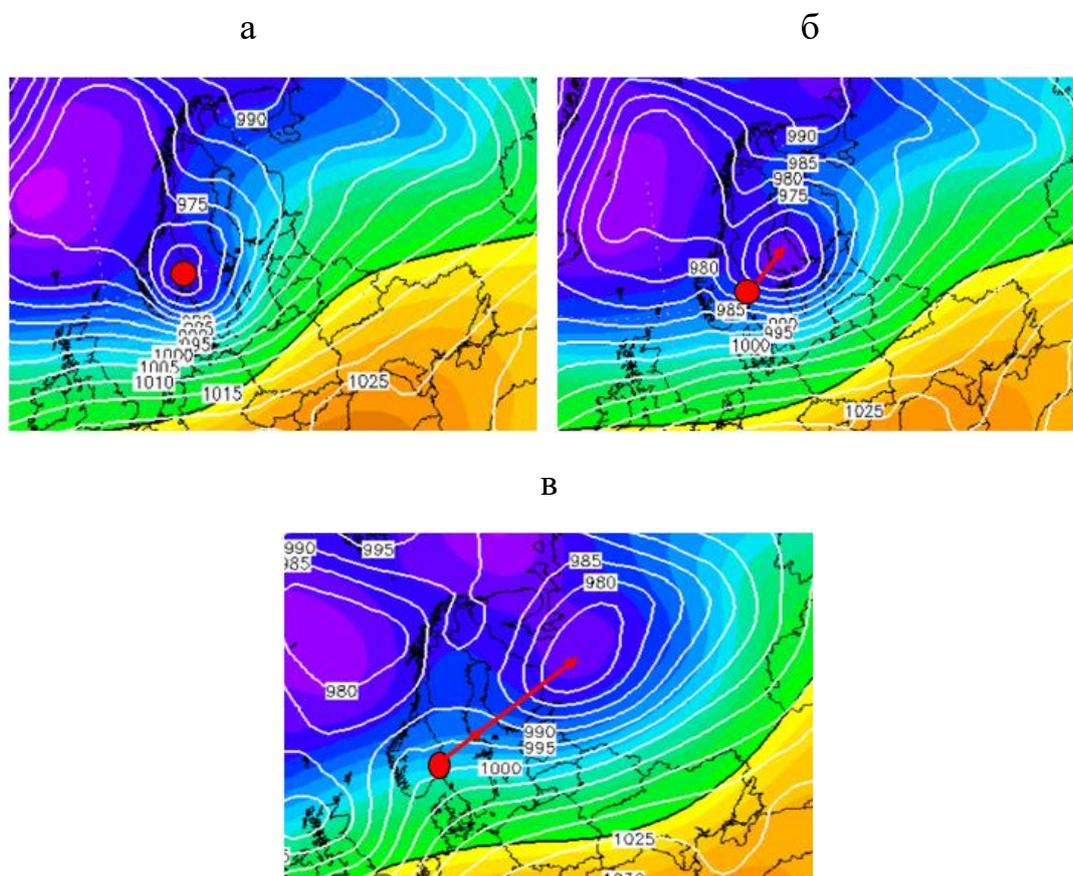


Рисунок 3. 9 – Синоптические карты наводнения 9 января 2005 года (АТ500+приземная) на рисунке 3.10

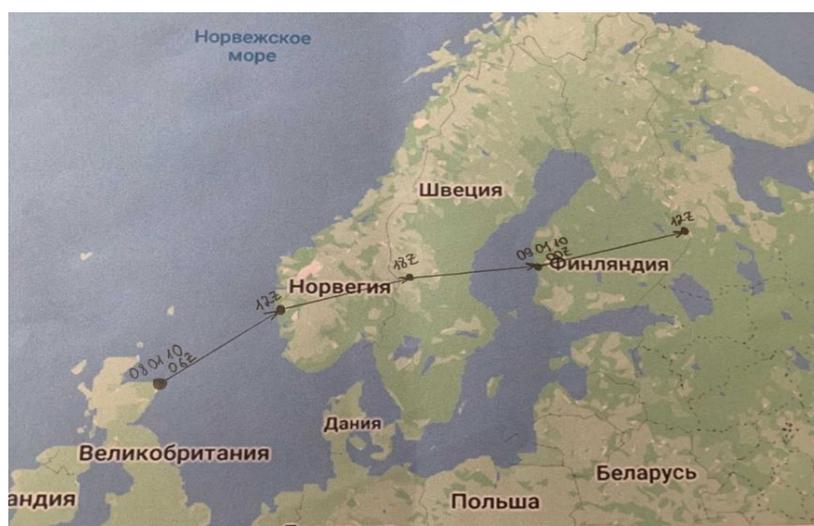


Рисунок 3.10 - Траектория циклона, при сильном невском наводнении 9 января 2005 года

За сутки циклон прошел расстояние равное 1396 километров, двигался со скоростью 58 км/ч. Уровень подъема воды достиг отметки 165 см.

Ситуация похожа на те, что были до 2000 года, но траектория несколько смещена к северу Ботнического залива.

Такая же ситуация наблюдалась и 28 октября 2008 года. Синоптические карты этого типа представлены на рисунке 3.10

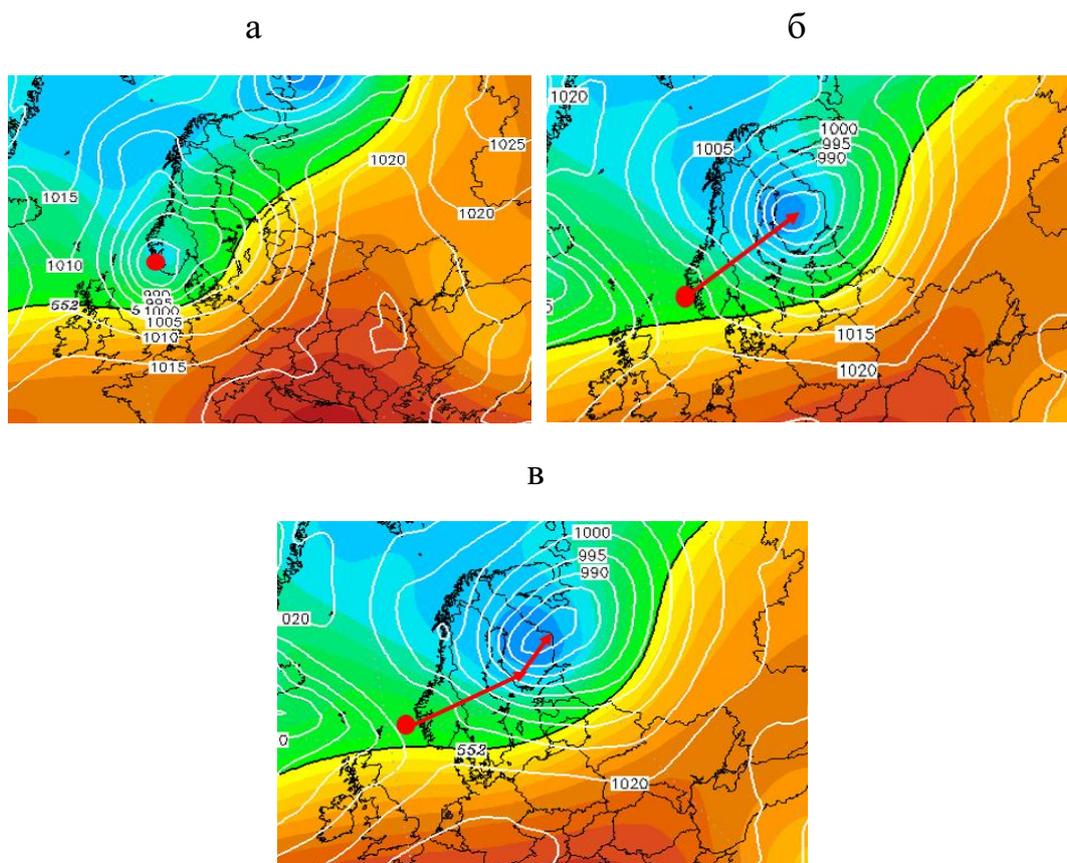


Рисунок 3.10 - Синоптические карты наводнения 28 октября 2006 года (АТ500+приземная)

Циклон, который привел к подъему уровня Невы вышел с Норвегии, двигался в сторону Финляндии, а после этого проследовал к Карелии. За сутки циклон прошел 1480 километров. Уровень воды достиг 224 см.

Подобная ситуация была и 17 ноября 2013 года, тогда, если бы не работа КЗС, то уровень подъема воды мог бы составить 212 см. Синоптические карты этого типа представлены на рисунке 3.11

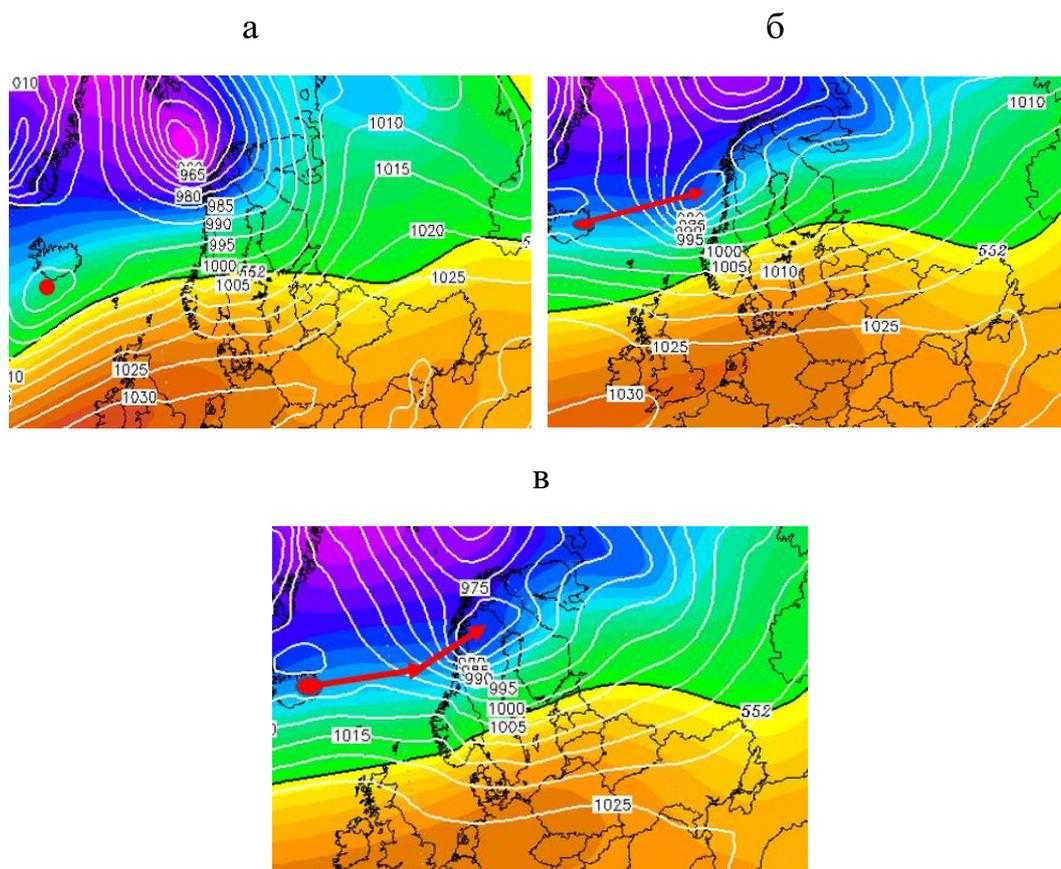
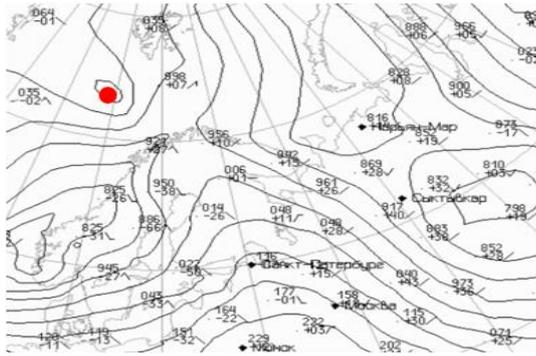


Рисунок 3.11 - Синоптические карты наводнения 17 ноября 2017 года
(АТ500+приземная)

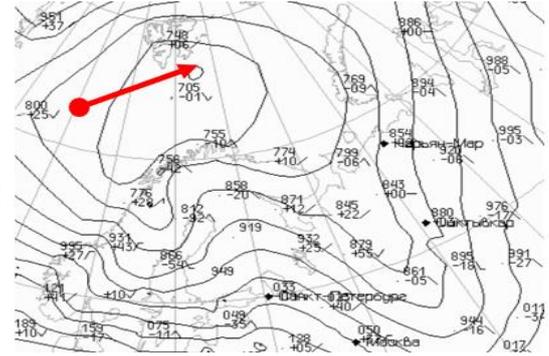
Подъем воды вызывает циклон, который выходит с Исландии, движется в сторону Норвежского моря, затем вдоль Швеции в сторону Финляндии. Циклон за сутки преодолел расстояние равное 2032 километра. Траектория похожа на 1 тип, но смещена к северу.

Траектория наводненческого циклона нового типа наблюдалась после ввода в эксплуатацию комплекса защитных сооружений (12.08.2011) 27 декабря 2011 года, синоптические карты этого типа представлены на рисунке 3.12

а



б



в

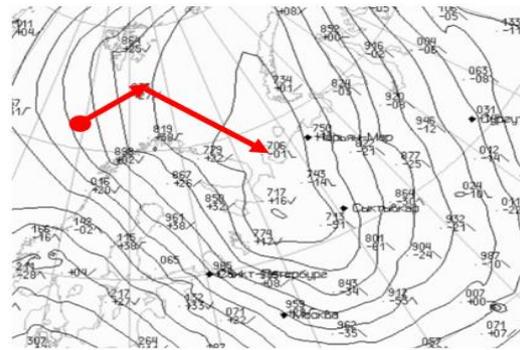
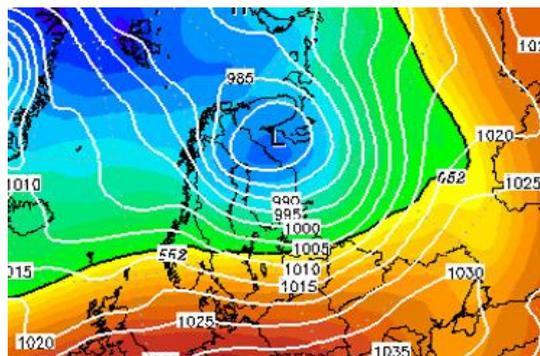


Рисунок 3.12 - Синоптические карты наводнения 27 декабря 2011 года
(приземная)

В этом случае циклон смещается с Гренландского моря в сторону Баренцева моря, огибая Скандинавский полуостров, а затем смещается к Канину полуострову. За сутки циклон проходит расстояние равное 1616 километров. Если бы не работа КЗС, то уровень подъема воды составил бы 294 см.

Ситуация такого же типа наблюдалась 13 декабря 2013 года. Она представлена на рисунке 3.13

а



б

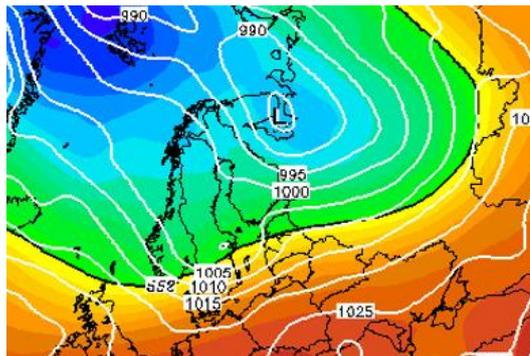


Рисунок 3.14 – Синоптические карты наводнения 27 сентября 2018 года
(АТ500+приземная)

В этом случае циклон незначительно смещается вдоль Кольского полуострова. За сутки циклон преодолел расстояние равное всего 352 километра. На рисунке 3.15 показана приземная карта этого наводнения.

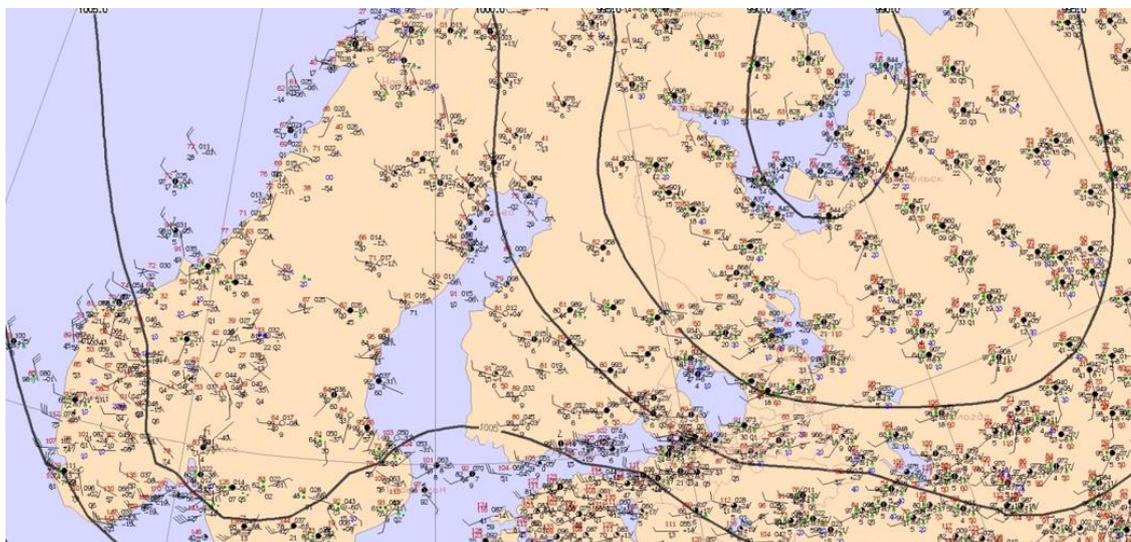


Рисунок 3.15 – Приземная карта наводнения 27 сентября 2018 года

В Санкт-Петербурге продолжительное время наблюдаются ветра западных направлений. В этом случае наблюдается длительный ветровой подпор у дельты Невы со стороны дамбы. Если бы не работа КЗС вода в Неве могла бы подняться до отметки 207 см.

Подобная ситуация наблюдалась и 13 сентября 2020 года. Синоптические карты этой ситуации представлена ПРИЛОЖЕНИЕ 4.

Циклон образовался в Норвежском море, в процессе развития распространился к северу, появился второй центр. Двигался с небольшой скоростью (27 км/ч), за сутки циклон прошел расстояние равное 644 километра. Уровень подъема воды мог составить 173 см.

В результате анализа современных невских наводнений можно сделать вывод о том, что современные сильные невские наводнения, при которых подтапливается городская территория, формируются сложной синоптической ситуацией. Санкт-Петербург и Балтика находятся в южной части многоцентровой депрессии, расположенной над полярным регионом и северной Атлантикой. В районе Балтики, Санкт-Петербурга продолжительное время фиксируются ветра западных направлений, Ветер, более суток не меняет свое направление. В этом случае могут наблюдаться подтопления территорий Санкт-Петербурга даже в случае своевременного открытия затворов дамбы.

Заключение

В результате выполнения научно-исследовательской работы все поставленные цели и задачи были выполнены.

С начала 70-х годов наблюдается тенденция к повышению числа наводнений

В ходе научно-исследовательской работы были проанализированы все сильные невские наводнения за период с 1921 года по 2020 год, были осреднены и построены траектории с 1921 года по 2000 год и проведена сравнительная характеристика с современными наводнениями.

Траектории были разделены на три основных типа. Первый тип встречается и в настоящее время, но он несколько смещен к северу. В последние годы современные невские подтопления вызываются сложной синоптической ситуацией с малоподвижной многоцентровой депрессией над полярным регионом и северной Атлантикой, Санкт-Петербург и Балтика находятся в южной части этого барического образования и именно подпор ветра, который более суток не меняет свое направление. В этом случае могут наблюдаться подтопления городских территорий даже в случае работы КЗС и своевременного открытия затворов дамбы.

Список литературы

1. Рожков В.А., Смирнова А.И., Терзиев Ф.С. Гидрометеорология и гидрохимия морей СССР. Том 3. Балтийское море. Выпуск 1. Гидрометеорологические условия - Гидрометеоиздат, Санкт-Петербург, 1992 г.
2. Ефимова Ю.В. Условия возникновения сильных невских наводнений. Диссертация на соискание ученой степени кандидата географических наук / Российский государственный гидрометеорологический университет. Санкт-Петербург, 2003
3. Пальцева Е.С., Угрюмов А.И., Федосеева Н.В. Многолетняя динамика исландской депрессии и формирование короткопериодных колебаний климата на северо-западе России. [Ученые записки Российского государственного гидрометеорологического университета](#). 2013. № 29. С. 100-109.
4. Дирекция комплекса защитных сооружений г. Санкт-Петербурга Министерства строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации [Электронный ресурс] – Режим доступа: www.dambaspb.ru. Дата обращения 25.02.2021 год.
5. Новикова И. В., Мостаманди С., Рубинштейн К. Г. Результаты динамической детализации приземного ветра и приземного давления над северо-западной частью России (регион Балтийского моря) для расчета наводнений. С. 167-168.
6. Тихонова Д.С., Шумихина А.А. Морские нагонные наводнения в Санкт-Петербурге. 2017. С. 36-45.
7. Научно-популярная энциклопедия вода России [Электронный ресурс] – Режим доступа: www.water-rf.ru. Дата обращения 10.03.2021 год.

8. Малая энциклопедия Забайкалья: Природное наследие / гл. ред. Р.Ф. Гениатулин. – Новосибирск: Наука, 2009. – 698 с.
9. Воробьев В.И. Основные понятия синоптической метеорологии. Учебное пособие. - СПб.: Изд. РГГМУ, 2003 - 48 с.
10. Зверев А.С. Синоптическая метеорология. – Л.: Гидрометеоздат, 1977.
11. Богаткин О.Г. Авиационная метеорология. - СПб.: Изд. РГГМУ, 2005.
12. Карты погоды. Данные реанализа модели GFSR (Глобальная система прогноза погоды) [Электронный ресурс] – Режим доступа: www.wetterzentrale.de. Дата обращения 22.02.2021 год.

