



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: «Синоптические процессы, приводящие к выпадению сильных
осадков в Санкт-Петербурге»

Исполнитель Федоров Гаврил Васильевич
(фамилия, имя, отчество)

Руководитель кандидат физико-математических наук
(ученая степень, ученое звание)

Топтунова Ольга Николаевна

(фамилия, имя, отчество)

«К защите допускаю»
заведующий кафедрой

(подпись)

кандидат физико-математических наук, доцент

(ученая степень, ученое звание)

Анискина Ольга Георгиевна

(фамилия, имя, отчество)

« 07 » июня 2023 г.

Санкт-Петербург
2023

СОДЕРЖАНИЕ

СОКРАЩЕНИЯ	3
ВВЕДЕНИЕ	4
1. Метеорологическое явление осадки	7
1.1 Общая характеристика	7
1.2 Осадки в прогнозах погоды	8
2. Физико-географическая характеристика г. Санкт-Петербург	11
2.1 Общая характеристика	11
2.2 Природные условия	11
2.3 Водные ресурсы	12
2.4 Описание природных особенностей	12
3. Прогноз погоды	14
3.1 Классификация метеорологических прогнозов	14
3.2 Прогнозирование погоды на длительный срок	15
3.3 Долгосрочное прогнозирование с использованием метода эталонных полей	16
4. Выявление эталонных полей давления в г. Санкт-Петербург	20
4.1 Сбор данных и формирование выборки	20
4.2 Сбор данных и формирование выборки	27
4.3 Выявление и анализ эталонных полей для теплого периода	29
4.4 Выявление и анализ эталонных полей для холодного периода	39
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	49
СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ	51
ПРИЛОЖЕНИЕ 1	53
ПРИЛОЖЕНИЕ 2	55

СОКРАЩЕНИЯ

мм – миллиметр

м – метр

км – километр

°С – градус цельсия

° – градус

гг – годы

ВВЕДЕНИЕ

Современные прогнозы погоды опираются на решение математических уравнений, описывающих гидродинамику атмосферы. Однако вопросы оправданности и точности таких прогнозов до сих пор остаются недостаточно удовлетворительными для различных потребителей метеоинформации. В связи с этим развитие прогностических методов и создание новых становятся актуальными задачами в нашем современном мире.

В данном исследовании анализируются эталонные поля давления, при которых наблюдаются выпадения сильных осадков. Для этого был выбран г. Санкт-Петербург в качестве подходящего пункта для наблюдений. Обычно на метеорологических станциях проводится анализ синоптических ситуаций, которые характеризуются определенными явлениями, и такие данные фиксируются в так называемый "альбом аналогов". В обычных случаях, такие типовые поля отбираются специалистами синоптиками вручную. Однако в данном исследовании были применены численные методы для решения этой задачи.

Актуальность данного исследования имеет важное значение не только для больших городов, где правильное прогнозирование обеспечивает безопасность населения, помогает управлять городской инфраструктурой, позволяет планировать и развивать город с учетом климатических условий, а также снижает экономические потери, связанные с негативными последствиями сильных осадков, - но и для любого другого места.

Целью работы является выявление закономерностей между полями атмосферного давления у земли и выпадению сильных осадков. Для достижения этой цели был взят и рассмотрен период с 2015 по 2022 годы для метеостанций Санкт-Петербург, Кронштадт. С помощью *sdo* осуществлялась предварительная подготовка данных, далее согласно методу эталонов,

реализованном на Fortran, отбирались типовые поля, в которых выпадают сильные осадки. Полученные результаты визуализировались с помощью программы Open GrADS.

Объектом исследования данной работы является прогноз сильных осадков в г. Санкт-Петербург. Предметом – метод эталонных полей.

Для проведения данного исследования используются следующие источники данных:

1. Архив метеорологических данных, доступный на сайте gr5.ru.
2. Поля реанализа приземного атмосферного давления ERA 5 с разрешением $2,5^\circ \times 2,5^\circ$.

Для достижения поставленной цели требуется выполнить следующие *задачи работы*:

- Выбрать из архивных данных случаи с выпадением сильных осадков и случаи с отсутствием осадков (для контрольной выборки) для станций Санкт-Петербург и Кронштадт.
- Выбрать и скачать соответствующие поля реанализа и осуществить их предварительную подготовку с помощью программного пакета Climate Data Operator (CDO) для последующего анализа.
- Применить метод эталонов, реализованный на Fortran, для определения сходства выбранных полей на обучающей выборке.
- Проверить метод на контрольной выборке.

Все вычисления выполнялись для теплого и холодного периода.

Выпускная квалификационная работа включает в себя 4 главы:

В первой главе описаны общие характеристики метеорологического явления осадки. Представлена информация о том, какие осадки бывают в прогнозах погоды и их термины.

Во второй главе рассматриваются физико-географическая характеристика исследуемого пункта для данного исследования.

В третьей главе представляется метод эталонных полей в качестве использования в долгосрочном прогнозировании, о важности и актуальности исследование данного метода для использования в прогнозирование. Описаны основные формулы для расчета.

Во четвертой главе представлена практическая часть работы, где описаны все основные этапы исследования, включающие в себя сбор исходных данных, программы для обработки и анализа, необходимых для последующих расчетов, преобразование данных в средства для визуализации с помощью программ, анализ полученных результатов.

В заключении представлены выводы, выполненные на основе проведенного исследования.

1. Метеорологическое явление осадки

1.1 Общая характеристика

Осадки – процесс конденсации водяного пара в атмосфере с образованием капель воды, которые выпадают на Землю в виде дождя, снега, града и т.д. [4]. Осадки выпадают из облаков в различных формах, таких как дождь, изморось, снег, мокрый снег, снежная и ледяная крупа, снежные зерна, град, ледяной дождь, ледяные иглы. Кроме того, в атмосфере могут образовываться и осаждаться другие формы влаги, такие как роса, иней, жидкие налет, твердые налет, иней. Когда переохлажденные осадки, такие как дождь, морось или туман, достигают земли или предметов, это может привести к образованию гололеда [5]. Осадки измеряются в метеорологии с использованием различных инструментов и методов. Наиболее распространенным способом измерения осадков является использование дождемера или плювиометра. Дождемер — это устройство, способное измерять количество жидкости (обычно дождя), выпавшей за определенный период времени. Плювиометр представляет собой контейнер с узким отверстием, в котором собирается и измеряется дождевая вода.

Сильные осадки или ливневой дождь – это осадки, представляющие собой осадки большой интенсивности, но малой продолжительности. Они образуются из кучево-дождевых облаков и могут выпадать в виде капель или в твердой форме, такой как снег, мокрый снег, крупа или град. Характерными чертами обильных осадков являются быстрое увеличение интенсивности в начале, резкие колебания интенсивности, быстрая смена облачности и частые грозы. Они часто сопровождаются усилением ветра с порывами и шквалами. Ливневые осадки наблюдаются при неустойчивых воздушных массах, холодных (особенно в тылу циклона) или местных (над сушей летом) при

прохождении холодных фронтов, над сушей летом и при прохождении тёплых фронтов. [6].

1.2 Осадки в прогнозах погоды

В прогнозах погоды используются термины, указывающие на наличие или отсутствие осадков, а также характеризующие их тип (фазовое состояние), количество и продолжительность. Термины и соответствующие им количественные характеристики жидких и смешанных осадков (таблица 1.1), для твердых осадков (таблица 1.2).

Таблица 1.1 – Термины и соответствующие им количественные характеристики жидких и смешанных осадков

Термины	Количество осадков за 12 часов, мм
Без осадков, сухая погода	-
Небольшой дождь, слабый дождь, морось, морозящие осадки, небольшие осадки	0,0-2
Дождь, дождливая погода, осадки (дождь со снегом; мокрый снег; снег, переходящий в дождь; дождь, переходящий в снег)	3-14
Сильный дождь, ливневый дождь (ливень), сильные осадки (сильный мокрый снег, сильный дождь со снегом, сильный снег с дождем)	15-49
Очень сильный дождь, очень сильные осадки (очень сильный мокрый снег, очень сильный дождь со снегом, очень сильный снег с дождем)	≥50

Таблица 1.2 – Термины и соответствующие им количественные характеристики твердых осадков

Термины	Количество осадков за 12 часов, мм
Без осадков, сухая погода	-
Слабый снег, небольшой снег	0,0-1
Снег, снегопад	2-6
Сильный снег, снегопад	7-19
Очень сильный снег, очень сильный снегопад	≥20

Сильные, ливневые осадки чаще всего наблюдаются в регионах с определенными климатическими условиями. Некоторые из таких мест: экваториальные и тропические регионы, где сходятся теплые и влажные воздушные массы. Такие места включают тропические леса, дождевые леса и сезонные муссоны; побережья и горные регионы, где горы и побережья также могут быть подвержены сильным дождям. Горы обычно вызывают подъем влажного воздуха, что может привести к образованию гроз и интенсивных осадков. Побережья могут быть подвержены осадкам из-за взаимодействия моря и сухого воздуха; умеренные широты с изменчивым климатом, где смены атмосферных фронтов способствуют образованию гроз и интенсивных осадков.

В России сильные, ливневые осадки чаще всего наблюдаются в различных регионах с разными климатическими условиями. В южных районах, в том числе на Кавказе и в Крыму, летние месяцы характеризуются частыми ливнями, вызванными интенсивным теплым воздушным потоком. В районах Урала и Сибири, особенно в июле и августе, также бывают сильные ливни, связанные с изменчивыми атмосферными фронтами. В горных

районах, таких как Алтай, Камчатка, Хабаровский край, часто выпадают сильные осадки из-за подъема влажного воздуха с горных перевалов и влияния теплых морских течений.

Ливневые дожди в Санкт-Петербурге не являются редкостью. Город, расположенный на побережье Балтийского моря, подвержен влиянию влажных воздушных масс и частым сменам погоды. Летние месяцы, особенно июль и август, характеризуются высокой вероятностью сильных ливневых осадков. Такие ливни могут сопровождаться грозами, сильными порывами ветра и временными подтоплениями улиц.

2. Физико-географическая характеристика г. Санкт-Петербург

2.1 Общая характеристика

Город Санкт-Петербург расположен на северо-западе Российской Федерации, в Невской низменности. Он протянулся с северо-запада на юго-восток на 90 километров, занимая побережье Невской губы Финского залива, устье реки Невы и многие острова невской дельты. Рельеф города варьируется по районам: в центре высота составляет 1-5 метров, на севере – 5-30 метров, на юге и юго-западе – 5-22 метра [7].

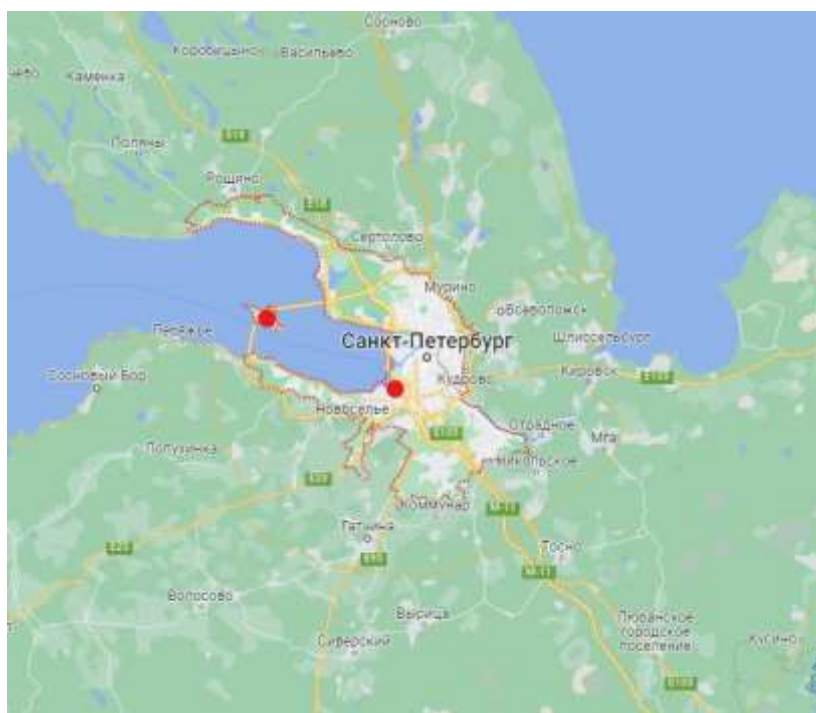


Рисунок 2.1 – Карта города Санкт-Петербург с указанием выбранных станций [10]

2.2 Природные условия

В Санкт-Петербурге морской климат с умеренно теплым летом и умеренно холодной зимой. Частые вторжения теплых воздушных масс

вливают на климат города. Влажность высокая и составляет не менее 80% в течение 145 дней в году. Средняя температура января $-6,1^{\circ}\text{C}$, июля $-18,1^{\circ}\text{C}$. За последние десятилетия средние температуры зимних месяцев повысились на $2,5-3,1^{\circ}\text{C}$. Абсолютный минимум и максимум температуры составляют -36°C и $37,1^{\circ}\text{C}$ соответственно. Ветры преимущественно дуют с запада, юго-запада и юга. Общее количество осадков за год составляет 633 мм, большая часть которых выпадает с июня по октябрь. В течение года бывает 191 день с осадками. С конца мая по начало июля наблюдаются «белые ночи».

2.3 Водные ресурсы

По территории города протекает более 40 рек, рукавов и каналов, а также около 20 искусственных каналов, общей протяженностью более 160 километров. Главная река — Нева с многочисленными притоками, такими как Большая Нева, Малая Нева, Большая Невка, Малая Невка, Средняя Невка, Фонтанка, Мойка, Екатерингофка и другие. Ширина Невы в черте города колеблется от 300 до 600 метров, а глубина в основном колеблется от 8 до 11 метров, максимальная глубина достигает 26 метров. В Неву также впадают реки Охта, Славянка, Ижора, Волковка и другие. За всю историю города было зарегистрировано около 300 наводнений с подъемом уровня воды более 150 сантиметров над нормальным уровнем Невы. В 2011 году была построена плотина для предотвращения наводнений. В Невскую губу впадают реки Каменка, Сестра, Черная, Дудергофка, Стрелка, Караста и др. На севере города расположены такие озера, как Суздальское, Щучье, а также крупное водохранилище – Сестрорецкий разлив [8].

2.4 Описание природных особенностей

Санкт-Петербург расположен в южной подзоне тайги. Естественные леса занимают около 275 квадратных километров на севере и юго-западе

города. В этих лесах преобладают сосна (44%), береза (38%), ель (13%) и осина (4%). Вдоль побережья Финского залива встречаются черноольховые леса, а также сообщества камыша, тростника и осоки. Переходные и верховые болота занимают около 2% территории, большая часть торфяников осушена и используется. Площадь искусственных зеленых насаждений составляет около 44 квадратных километров. В районах с хвойными лесами преобладают подзолистые почвы, в мелколиственных лесах и сельскохозяйственных угодьях - дерново-подзолистые и дерново-глеевые почвы. На заболоченных участках преобладают торфянисто-глеевые и болотно-торфяные почвы.

3. Прогноз погоды

3.1 Классификация метеорологических прогнозов

Атмосфера постоянно находится в движении и играет важную роль в изменении климата и влиянии на Землю в целом. Для характеристики состояния атмосферы используется термин «метеорологическая величина», в которую входят такие параметры, как температура, направление и скорость ветра, давление, влажность воздуха, осадки и облачность. Эти метеорологические элементы формируют различные атмосферные явления, в том числе туман, грозы, осадки, обледенение. Прогнозирование этих явлений является важной задачей в современном мире.

Изменчивость погодных условий в основном зависит от взаимного расположения зон повышенного и пониженного атмосферного давления. Изменение давления влечет за собой изменение других метеорологических параметров, таких как скорость ветра и температура. Таким образом, изменения погоды в большинстве случаев связаны с барическим полем в районе исследований.

Прогноз погоды делится на разные типы в зависимости от времени прогноза. Существуют следующие виды прогнозов:

- Сверхкраткосрочный прогноз;
- Краткосрочный прогноз;
- Среднесрочный прогноз;
- Долгосрочный прогноз;
- Сверхдолгосрочный прогноз.

Классификация сроков метеорологических прогнозов [9] выглядит следующим образом (таблица 3.1):

Таблица 3.1 – Классификация сроков метеорологических прогнозов

Вид прогноза	Срок действия
Текущий прогноз погоды	Действует на период от 0 до 2 часов
Сверхкраткосрочный прогноз погоды	Действует на период до 12 часов
Краткосрочный прогноз погоды	Действует на период от 12 до 72 часов (3 сутки)
Среднесрочный прогноз погоды	Действует на период от 72 до 240 часов (от 3 суток до 10 суток)
Внутремесячный прогноз погоды	Действует на период от 10 до 30 суток
Долгосрочный прогноз погоды	Действует на период от 30 суток до 2-х лет

3.2 Прогнозирование погоды на длительный срок

Разработка методов долгосрочного прогноза погоды является важной задачей в области метеорологии и научных исследований в целом. Численные методы позволяют добиться более точного прогноза погоды на срок от 5 до 10 дней. Однако возможности численных моделей ограничены прогнозом примерно на 10-14 дней. Поэтому разработка методов прогноза метеорологических явлений с более длительным периодом прогноза является актуальной задачей. Для долгосрочного прогноза погоды используют гидродинамические и синоптические методы с учетом принципов аналогии. Однако единого подхода и методики оценки долгосрочного прогноза не существует. Одни ученые используют ансамблевые прогнозы, другие полагаются только на синоптические методы, а третьи комбинируют разные подходы. В настоящее время комбинированный подход считается перспективным для долгосрочного прогнозирования погоды.

3.3 Долгосрочное прогнозирование с использованием метода эталонных полей

Одной из самых главных приоритетных целей в прогнозировании является усовершенствование и разработка новых методов долгосрочного прогноза погоды. Для достижения данной цели была поставлена задача изучить общую циркуляцию атмосферы – систему движения воздуха в атмосфере Земли, на основании которой была разработана методика долгосрочного прогнозирования, в которой лежат основы синоптико-статистической модели, разработанной профессором, доктором физико-математических наук В.Ф. Мартазиновой [14]. Данная разработка хороша тем, что учитывает множество деталей, которые непосредственно влияют на итоговый результат. Данный метод “эталонов” является простым в использовании и довольно понятным, благодаря которому можно с высокой точностью определить возможность возникновения того или иного явления.

Эталонным полем называют такое поле, которое находится в достаточной близости к остальным полям в данном классе, а само такое поле является одним из фактических полей в выборке, что, следовательно, дает больше информативности при описывании всех полей, которые входят в нее.

Общий вид выборки полей давления выглядит следующим образом [2]:

$$X = X(z) = (X_1, X_2, \dots, X_k), 1 < z < k \quad (3.1)$$

где

k – число выбранных полей;

$X(k)$ – конкретное поле из архива, представленное в виде матрицы

$$X(k) = \begin{bmatrix} x_{11} & x_{12} & \dots & x_{1n} \\ x_{21} & x_{22} & \dots & x_{2n} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ x_{i1} & x_{i2} & \dots & x_{in} \end{bmatrix} \quad (3.2)$$

где

x_{ij} – значение давления в узле регулярной сетки;

i – число параллелей, $i = 1, m$;

j – число меридианов, $j = 1, n$

На данном этапе были сформулированы выборки полей давления для каждого периода, внутри каждого которых находились "эталонные" поля.

В рамках данной методики составления долгосрочного прогноза погоды следующим шагом является выделение "эталонного поля".

Эталонные поля давления – это гидрометеорологическое поле, имеющее наибольшее сходство с другими полями в данном наборе [3]. Такое поле находится в относительной близости к другим полям, что позволяет ему лучше отображать другие поля.

Для расчета эталонных полей используется следующая формула:

$$C_{i,p} = \frac{1}{q} \sqrt{\sum_{j=1}^q (x_{ij} - x_{pj})^2}, \quad i, p = 1, k, q = 576 \quad (3.3)$$

где

$C_{i,p}$ – параметр близости (удалённости) между i -м и p -м барическими полями;

$x_{i,j}, x_{p,j}$ – давление в узлах регулярной сетки сравниваемых полей;

k – число выбранных полей;

q – число узлов регулярной сетки

Для определения подобия i -го поля со всеми другими полями используется формула в виде:

$$S_i = \frac{1}{k} \sum_{p=1}^k C_{i,p} \quad (3.4)$$

Наименьшее значение S_i определяет, что i -е поле наиболее лучше всего описывает p -поля, что указывает на то, что данное поле по такому показателю можно считать эталоном для других полей [12].

С помощью найденных значений $C_{i,p}$ и S_i можно определить эталонные поля давления.

С помощью описанного метода можно определить эталонные поля для различных метеорологических явлений, таких как интенсивные осадки (более 5 мм/сутки), дни с резкими перепадами температуры (10 °С и более), туманы и грозы.

Также, эталонные поля давления можно использовать при нахождении года-аналога в долгосрочных прогнозах погоды. Как известно, в долгосрочных прогнозах используется принцип аналогичности, где выбираются группы лет, в которых развитие макроциркуляционных процессов было сходным с текущим годом. При использовании метода аналогов при нахождении года-аналога, вместо традиционного, принципа аналогичности, где требуется совпадение процессов на одной территории и в одни и те же календарные дни, может применяться принцип «плавающего» аналога. Принцип «плавающего» аналога позволяет допускать географическое несовпадение фигур ПВФЗ или распределения знака барического поля текущего и аналогового полей [13]. Обычно аналоговые поля ищутся в интервале предыдущих двух месяцев от начального месяца, основываясь на принципе двухмесячной квазипериодичности атмосферных

процессов. При этом аналоги подбираются в пределах $\pm 15^\circ$ по меридиану и $\pm 60^\circ$ по широте. Определенные аналоговые поля могут быть использованы в качестве предикторов для предсказания различных метеорологических явлений.

После подбора годов-гомологов (групп лет со сходным развитием процессов) формулируется долгосрочный прогноз. При необходимости, он может разбиваться на декады.

4. Выявление эталонных полей давления в г. Санкт-Петербург

4.1 Сбор данных и формирование выборки

Для формирования выборки были взяты данные с случаями выпадения сильных осадков с сайта gr5.ru (см. Приложение 2) за период 2015 – 2022 гг [1].

Все случаи были поделены на теплый и холодный периоды. Для отработки и проверки метода формировалась исходная выборка делилась на две: две трети отобранных случаев шли на формирование обучающей выборки, одна треть – на контрольную. В контрольную выборку еще добавлялось такое же количество случаев дней без осадков. Так как данные по количеству осадков на метеостанции есть только за 12 часов, то рассматривались не конкретные часы, а все сутки. Данные реанализа имеют часовое поле, соответственно на формирование выборки в каждом случае шли все 24 часа.

В отобранный период со станции Санкт-Петербург было зафиксировано 37 случаев выпадения сильных осадков за холодный период (таблица 4.1) и 46 случаев было зафиксировано за теплый период (таблица 4.2). В отобранный период со станции Кронштадт было зафиксировано 9 случаев выпадения сильных осадков за холодный период (таблица 4.3) и 20 случаев было зафиксировано за теплый период (таблица 4.4). Также, было отобрано такое же количество случаев с отсутствием осадков для станции Санкт-Петербург – 37 случаев за холодный период и 46 случаев за теплый период, и для станции Кронштадт – 9 случаев за холодный период и 20 случаев за теплый период.

Таблица 4.1 – Даты с случаями выпадения сильных осадков за
холодный период для ст. Санкт-Петербург

Холодный период		
Дата	Станция	Кол-во осадков
13.01.2015	Санкт-Петербург (26063)	6
08.02.2015	Санкт-Петербург (26063)	10
22.11.2015	Санкт-Петербург (26063)	8
12.01.2016	Санкт-Петербург (26063)	8
15.02.2016	Санкт-Петербург (26063)	7
07.11.2016	Санкт-Петербург (26063)	6
08.11.2016	Санкт-Петербург (26063)	7
08.11.2016	Санкт-Петербург (26063)	14
10.11.2016	Санкт-Петербург (26063)	6
09.10.2017	Санкт-Петербург (26063)	19
08.12.2017	Санкт-Петербург (26063)	7
21.12.2017	Санкт-Петербург (26063)	10
02.02.2018	Санкт-Петербург (26063)	6
05.02.2018	Санкт-Петербург (26063)	6
19.03.2018	Санкт-Петербург (26063)	8
20.03.2018	Санкт-Петербург (26063)	7
26.12.2018	Санкт-Петербург (26063)	6
17.01.2019	Санкт-Петербург (26063)	17
05.03.2019	Санкт-Петербург (26063)	8
05.03.2019	Санкт-Петербург (26063)	9
27.10.2019	Санкт-Петербург (26063)	16
29.10.2019	Санкт-Петербург (26063)	6
08.12.2019	Санкт-Петербург (26063)	18
23.12.2020	Санкт-Петербург (26063)	6

Продолжение таблицы 4.1

Холодный период		
Дата	Станция	Кол-во осадков
26.12.2020	Санкт-Петербург (26063)	6
02.01.2021	Санкт-Петербург (26063)	7
22.01.2021	Санкт-Петербург (26063)	6
21.02.2021	Санкт-Петербург (26063)	10
22.02.2021	Санкт-Петербург (26063)	7
21.03.2021	Санкт-Петербург (26063)	9
21.10.2021	Санкт-Петербург (26063)	26
30.11.2021	Санкт-Петербург (26063)	6
30.11.2021	Санкт-Петербург (26063)	16
13.12.2021	Санкт-Петербург (26063)	7
31.12.2021	Санкт-Петербург (26063)	6
21.01.2022	Санкт-Петербург (26063)	13
22.02.2022	Санкт-Петербург (26063)	6

Таблица 4.2 – Даты с случаями выпадения сильных осадков за теплый период для ст. Санкт-Петербург

Теплый период		
Дата	Станция	Кол-во осадков
28.05.2015	Санкт-Петербург (26063)	16
23.06.2015	Санкт-Петербург (26063)	15
15.04.2016	Санкт-Петербург (26063)	6
27.05.2016	Санкт-Петербург (26063)	15
16.06.2016	Санкт-Петербург (26063)	28
17.06.2016	Санкт-Петербург (26063)	21
06.07.2016	Санкт-Петербург (26063)	20
06.07.2016	Санкт-Петербург (26063)	27
12.07.2016	Санкт-Петербург (26063)	16
01.08.2016	Санкт-Петербург (26063)	15
02.08.2016	Санкт-Петербург (26063)	22
23.08.2016	Санкт-Петербург (26063)	21
29.08.2016	Санкт-Петербург (26063)	26
13.04.2017	Санкт-Петербург (26063)	12
14.04.2017	Санкт-Петербург (26063)	8
17.07.2017	Санкт-Петербург (26063)	21
18.07.2017	Санкт-Петербург (26063)	15
24.07.2017	Санкт-Петербург (26063)	18
06.08.2017	Санкт-Петербург (26063)	15
24.08.2017	Санкт-Петербург (26063)	28
25.08.2017	Санкт-Петербург (26063)	18
13.09.2017	Санкт-Петербург (26063)	20
18.09.2017	Санкт-Петербург (26063)	17
18.04.2018	Санкт-Петербург (26063)	17

Продолжение таблицы 4.2

Теплый период		
Дата	Станция	Кол-во осадков
06.07.2018	Санкт-Петербург (26063)	21
06.07.2018	Санкт-Петербург (26063)	25
21.07.2018	Санкт-Петербург (26063)	15
21.08.2018	Санкт-Петербург (26063)	17
28.06.2019	Санкт-Петербург (26063)	35
09.07.2019	Санкт-Петербург (26063)	20
24.08.2019	Санкт-Петербург (26063)	18
13.09.2019	Санкт-Петербург (26063)	16
09.06.2020	Санкт-Петербург (26063)	17
18.06.2020	Санкт-Петербург (26063)	16
19.06.2020	Санкт-Петербург (26063)	18
30.06.2020	Санкт-Петербург (26063)	15
28.07.2020	Санкт-Петербург (26063)	27
23.08.2020	Санкт-Петербург (26063)	16
27.08.2020	Санкт-Петербург (26063)	15
18.05.2021	Санкт-Петербург (26063)	25
19.05.2021	Санкт-Петербург (26063)	25
26.06.2021	Санкт-Петербург (26063)	16
29.07.2021	Санкт-Петербург (26063)	22
02.08.2021	Санкт-Петербург (26063)	17
03.08.2021	Санкт-Петербург (26063)	48
07.08.2021	Санкт-Петербург (26063)	31

Таблица 4.3 – Даты с случаями выпадения сильных осадков за
холодный период для ст. Кронштадт

Теплый период		
Дата	Станция	Кол-во осадков
08.11.2016	Санкт-Петербург (26060)	8
10.11.2016	Санкт-Петербург (26060)	6
19.03.2018	Санкт-Петербург (26060)	6
17.01.2019	Санкт-Петербург (26060)	12
05.03.2019	Санкт-Петербург (26060)	8
02.12.2019	Санкт-Петербург (26060)	9
21.02.2021	Санкт-Петербург (26060)	9
22.02.2021	Санкт-Петербург (26060)	6
30.11.2021	Санкт-Петербург (26060)	8

Таблица 4.4 – Даты с случаями выпадения сильных осадков за теплый период для ст. Кронштадт

Теплый период		
Дата	Станция	Кол-во осадков
01.08.2016	Санкт-Петербург (26060)	34
06.08.2016	Санкт-Петербург (26060)	16
16.08.2016	Санкт-Петербург (26060)	20
23.08.2016	Санкт-Петербург (26060)	26
29.08.2016	Санкт-Петербург (26060)	29
13.08.2017	Санкт-Петербург (26060)	21
24.08.2017	Санкт-Петербург (26060)	36
13.09.2017	Санкт-Петербург (26060)	18
13.09.2017	Санкт-Петербург (26060)	18
18.09.2017	Санкт-Петербург (26060)	16
18.04.2018	Санкт-Петербург (26060)	16
06.07.2018	Санкт-Петербург (26060)	22
21.07.2018	Санкт-Петербург (26060)	29
18.06.2020	Санкт-Петербург (26060)	37
28.07.2020	Санкт-Петербург (26060)	35
28.07.2021	Санкт-Петербург (26060)	17
02.08.2021	Санкт-Петербург (26060)	23
03.08.2021	Санкт-Петербург (26060)	24
07.08.2021	Санкт-Петербург (26060)	18
14.08.2021	Санкт-Петербург (26060)	15

4.2 Сбор данных и формирование выборки

Для последующего анализа были взяты данные реанализа ERA5 с разрешением $2.5^\circ \times 2.5^\circ$ для отобранных случаев с выпадением сильных осадков за холодный и теплый периоды и случаев с отсутствием осадков за холодный и теплый периоды в формате NetCDF (*.nc).

Далее, для последующих анализа и вычислений, необходимо поделить данные на обучающую и контрольную выборки для каждого периода. В обучающей выборке будут содержаться две трети из всех случаев с сильными осадками. Оставшиеся случаи пойдут на контрольную выборку, при этом в контрольную выборку дополнительно было добавлено такое же количество случаев с отсутствием осадков.

С помощью программы CDO (climate data operators) взятые нами данные можно преобразовать в массивы данных, необходимые для выполнения работы с данными на языке программирования Fortran для последующего анализа.

CDO (climate data operators) – это набор инструментов и библиотек для выполнения работ с климатическими данными. Данная программа является отличным средством для обработки, анализа и визуализации данных. Поддерживает множество форматов данных и обладает большим количеством команд, насчитывающих более 600 команд в последних версиях CDO, которые можно использовать в различных аспектах климатического анализа.

Преобразования в массивы данных в программе CDO скаченных нами данных реанализа в формате .nc представлен следующим образом:

```

rm -rf /data0/home/1122/gavril/test/obuch/mergetime.nc /data0/home/1122/gavril/test/obuch/fields.txt && log
cdo -b 64 mergetime /data0/home/1122/gavril/test/obuch/*.nc /data0/home/1122/gavril/test/obuch/mergetime.nc
cdo output /data0/home/1122/gavril/test/obuch/mergetime.nc > /data0/home/1122/gavril/test/obuch/fields.txt
cdo showtimestamp /data0/home/1122/gavril/test/obuch/mergetime.nc > /data0/home/1122/gavril/test/obuch/dates.txt
cdo ntime /data0/home/1122/gavril/test/obuch/mergetime.nc > /data0/home/1122/gavril/test/obuch/ntime.txt

echo ""
echo " ***** ATTENTION *****"
echo " number of timesteps saved in output/ntime.txt"
echo " *****"
echo ""

rm log
exit

```

Рисунок 4.1 – Код для подготовки данных из *.nc в txt

С помощью языка программирования Fortran описанный выше метод эталонов можно записать в виде кода, который представлен в приложении 1.

Таким образом, с помощью описанного выше кода, с использованием статистического анализа, были выявлены эталонные поля давления для сильных осадков для каждого периода.

4.3 Выявление и анализ эталонных полей для теплого периода

Так, для теплого периода, в результате были получены следующие первые несколько строк значений коэффициента S_i (таблица 4.5).

Таблица 4.5 – Коэффициенты S_i для обучающей выборки теплого периода

Дата	Значения S_i
18.04.2018	2,531
24.08.2017	2,533
02.08.2016	2,533
09.07.2019	2,536
28.06.2019	2,537
02.08.2016	2,539
25.08.2017	2,539
09.07.2019	2,54

Из таблицы 4.5 видно, что эталонное поле давления в обучающей выборки значение коэффициента S_i был равен 2,531. Это значение соответствует дате 18 апреля 2018 года. Таким образом, данное поле необходимо добавить к контрольной выборке (с случаями выпадения сильных осадков и с случаями их отсутствием), после чего необходимо еще раз выполнить расчет. В результате окончательного расчета были получены значения коэффициента S_i , первые несколько значений представлены в таблице 4.6. Синим цветом закрашены случаи с выпадением сильных осадков.

Таблица 4.6 – Коэффициенты S_i для контрольной выборки теплого периода

Дата	Значения S_i
14.08.2021	2,691
26.06.2021	2,698
07.08.2021	2,701
27.08.2020	2,705
13.09.2019	2,707
18.04.2018	2,707
09.06.2020	2,709
02.08.2021	2,712
09.07.2017	2,713
06.05.2016	2,720

Таким образом, исходя из таблицы 4.6 видно, что к эталонному полю наиболее близкими оказались случаи с сильными осадками. Это указывает на то, что наименьшие значения параметра схожести S_i действительно соответствуют случаям с сильными осадками.

На рисунках 4.2, 4.3, и 4.4 представлено барическое поле характерное при сильных осадках за даты 18 апреля 2018 года, 24 августа 2017 года и 2 августа 2016 года, которые являются эталонами согласно полученным расчетам. На рисунке 4.5 в качестве проверки и наглядности метода представлено барическое поле, характерное при сильных осадках за 14 августа 2021 года, которое было получено после окончательного расчета. Для визуализации полученных данных использовалась система OpenGrADS, которая предоставляет инструменты для анализа и отображения географических сеток. Красной точкой отмечен исследуемый пункт.

Также для информативности за такие же даты дополнительно были получены следующие карты (см. Приложение 2) [11]:

- Карта погоды для случая с выпадением сильных осадков за 18 апреля 2018 года (рисунок 4.6)
- Карта погоды для случая с выпадением сильных осадков за 24 августа 2017 года (рисунок 4.7)
- Карта погоды для случая с выпадением сильных осадков за 2 августа 2016 года (рисунок 4.8)
- Карта погоды для случая с выпадением сильных осадков за 14 августа 2021 года (рисунок 4.9)

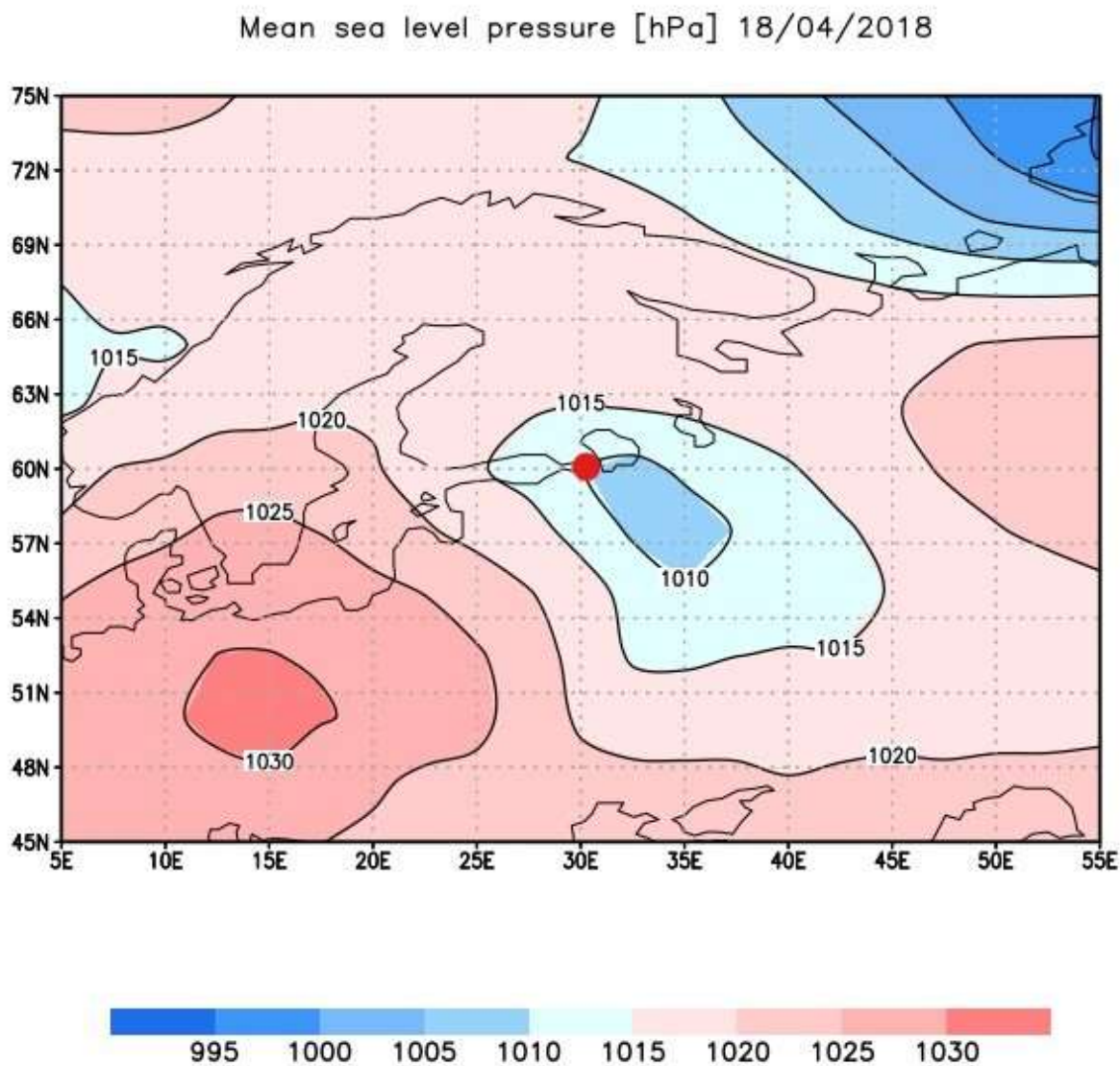


Рисунок 4.2 – барическое поле у земли за 18 апреля 2018 года

Mean sea level pressure [hPa] 24/08/2017

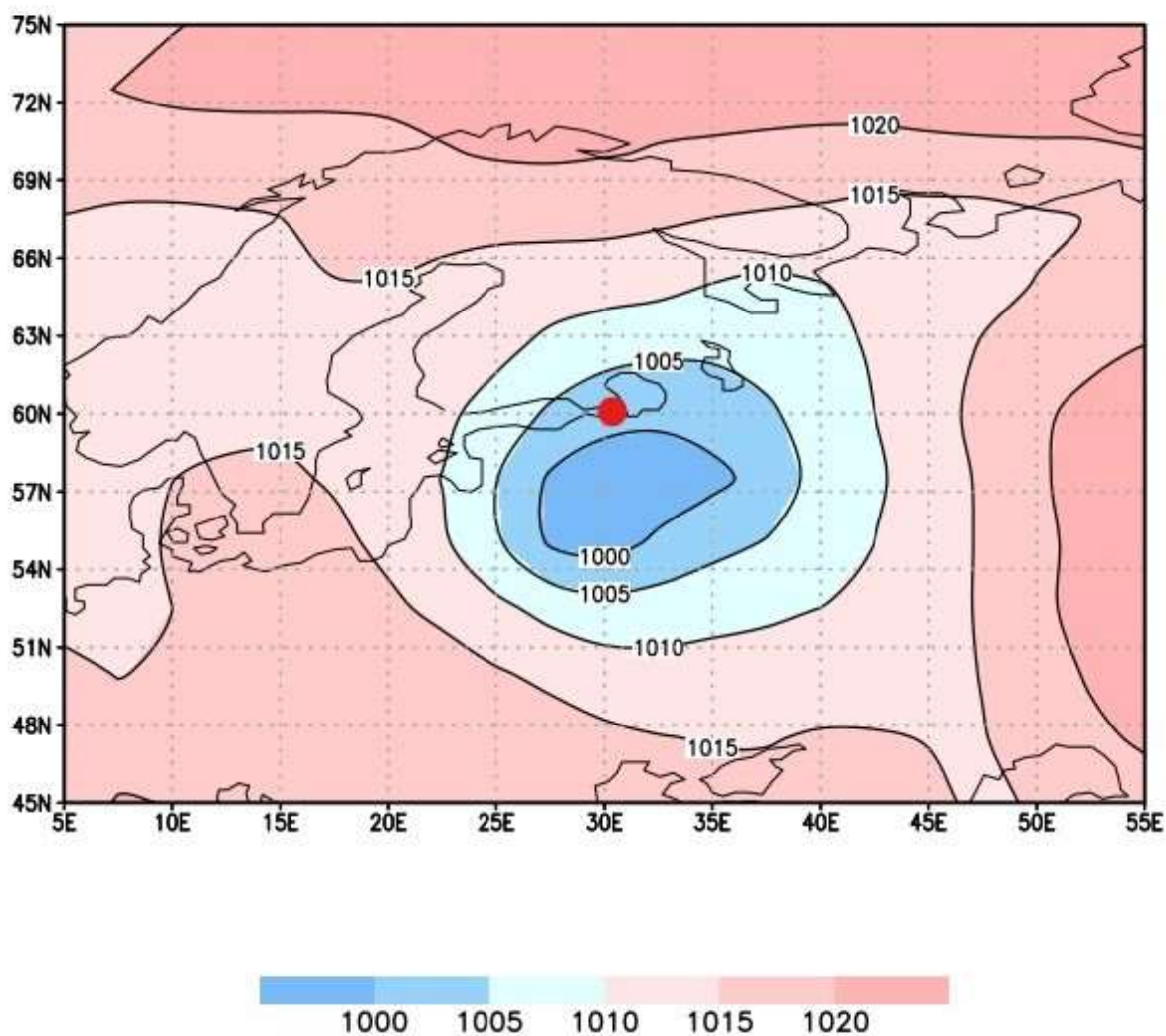


Рисунок 4.3 – барическое поле у земли за 24 августа 2017 года

Mean sea level pressure [hPa] 02/08/2016

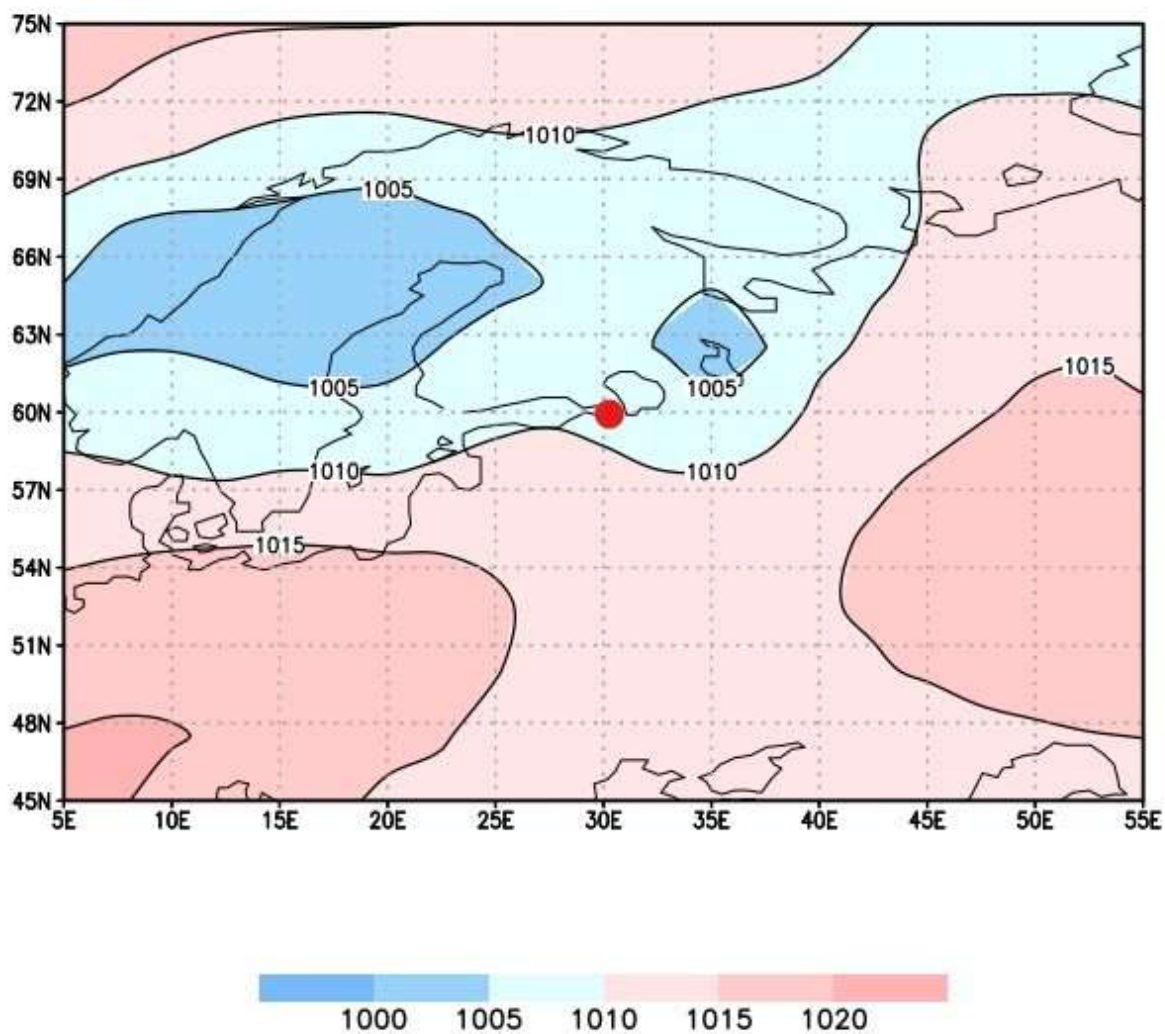


Рисунок 4.4 – барическое поле у земли за 2 августа 2016 года

Mean sea level pressure [hPa] 14/08/2021

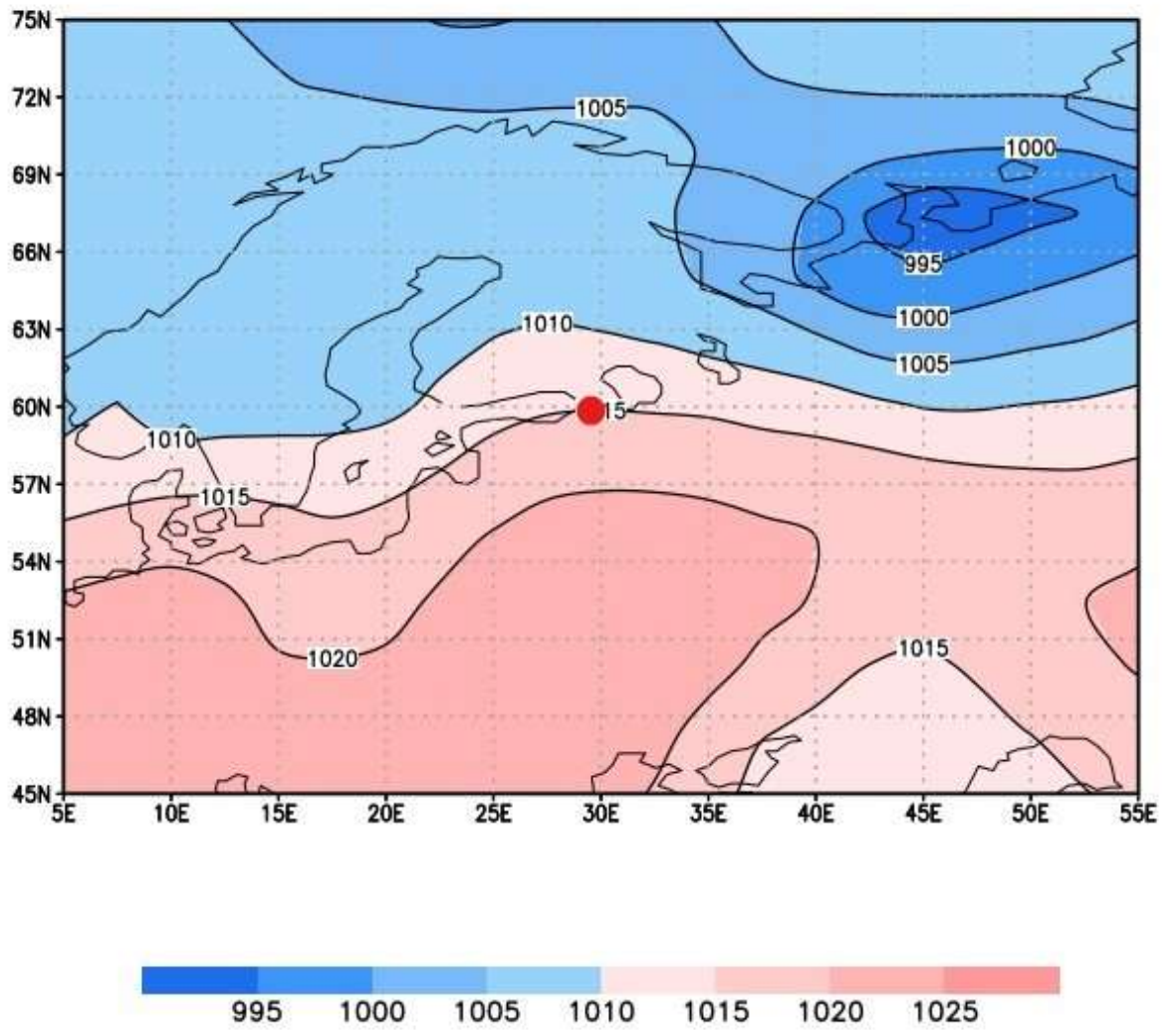


Рисунок 4.5 – барическое поле у земли за 14 августа 2021 года

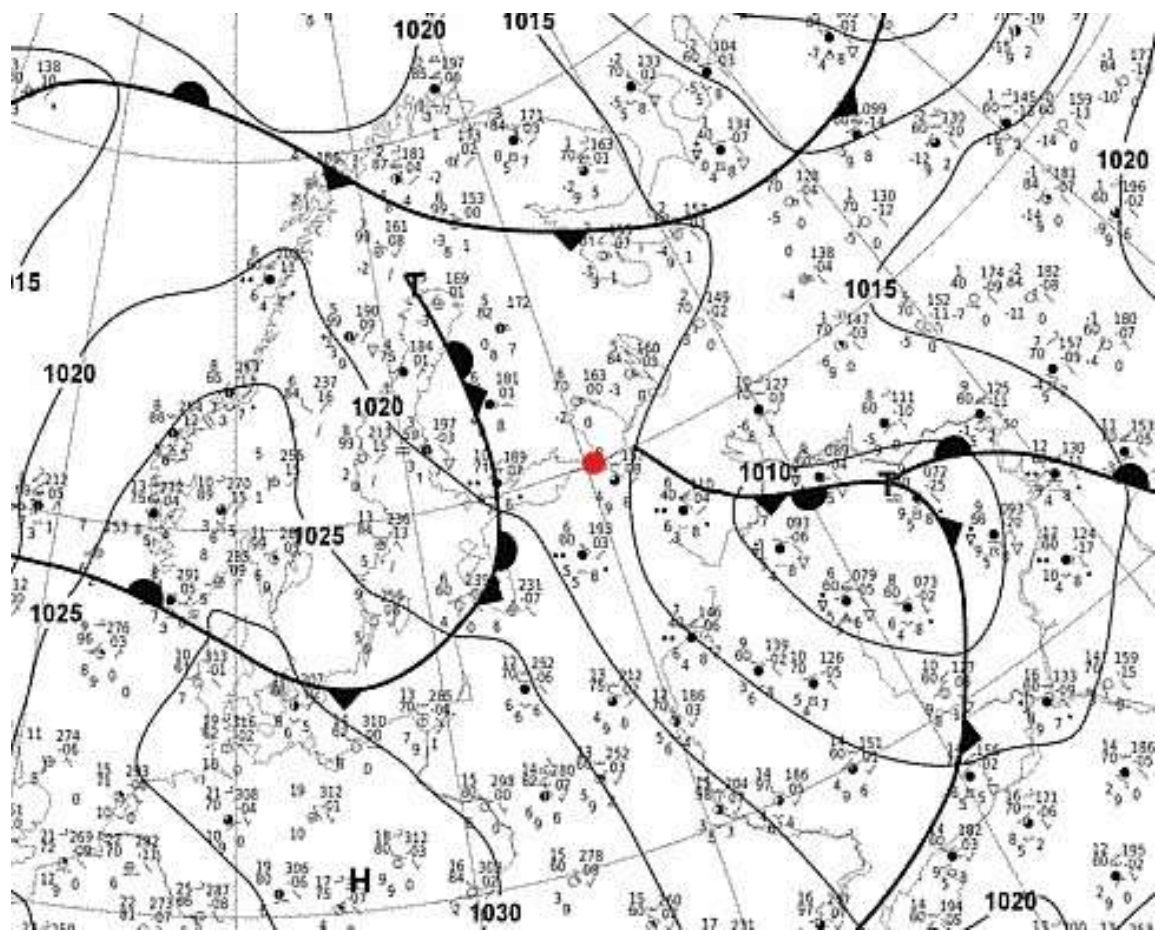


Рисунок 4.6 – карта погоды для г. Санкт-Петербург за 18 апреля 2018 года

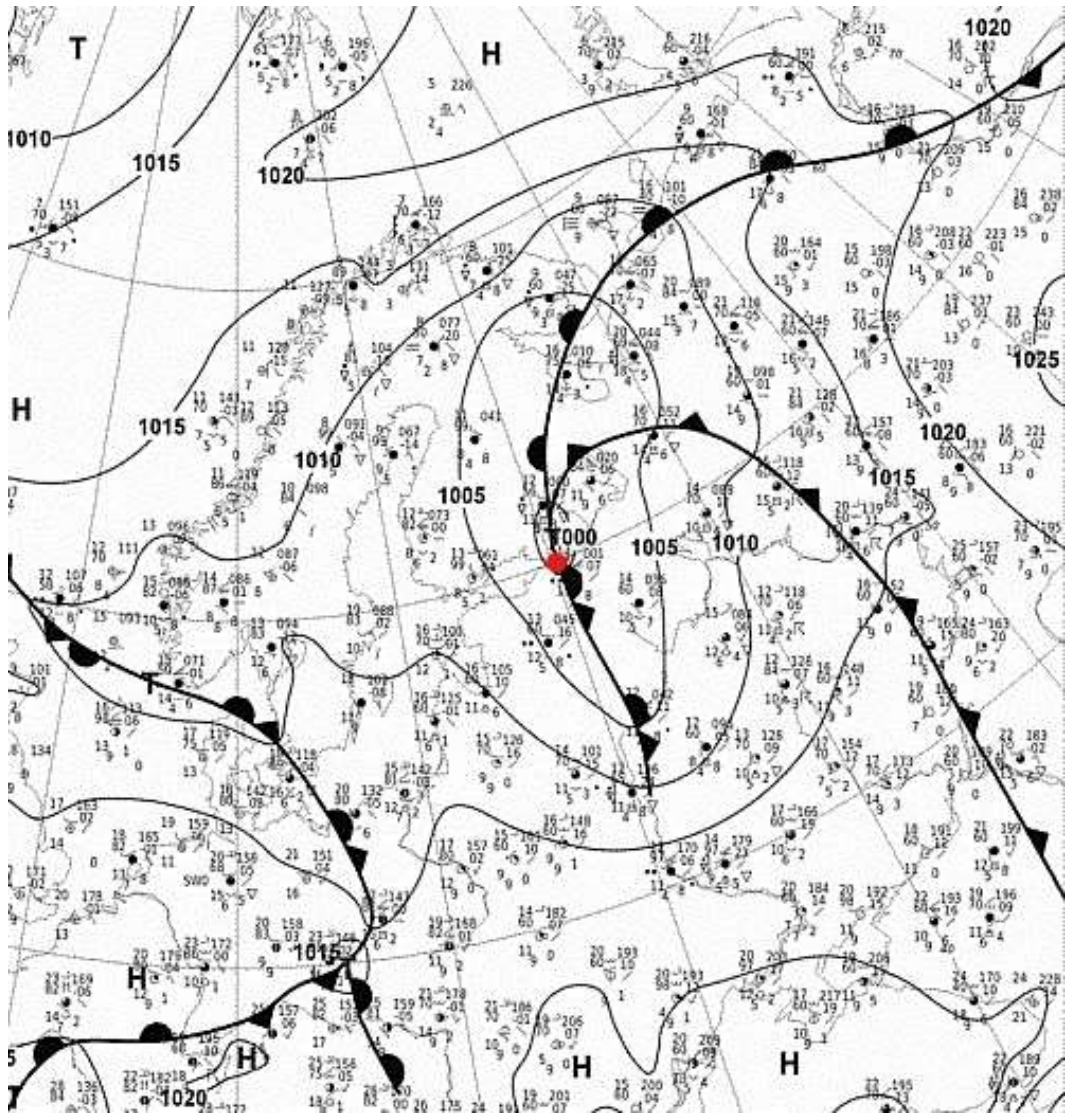


Рисунок 4.7 – карта погоды для г. Санкт-Петербург за 24 августа 2017 года

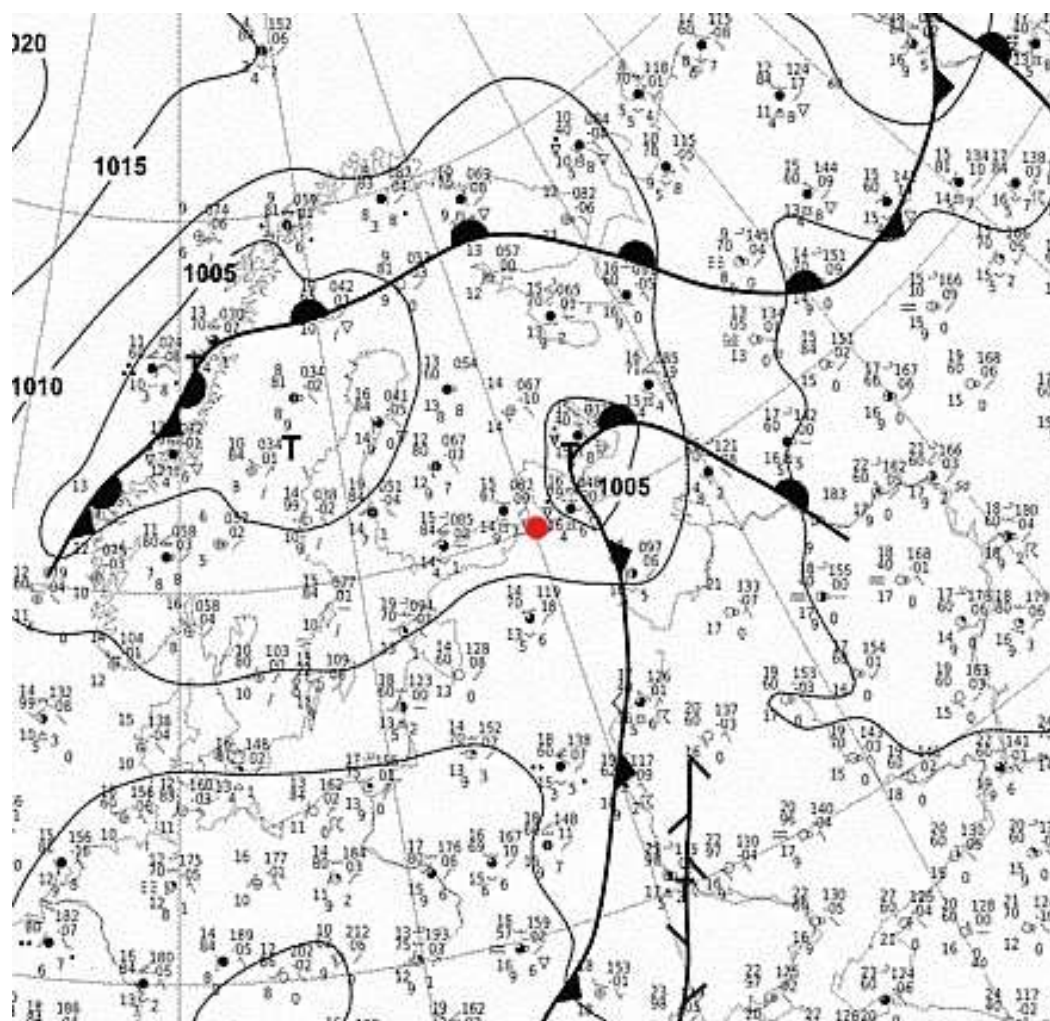


Рисунок 4.8 – карта погоды для г. Санкт-Петербург за 2 августа 2016 года

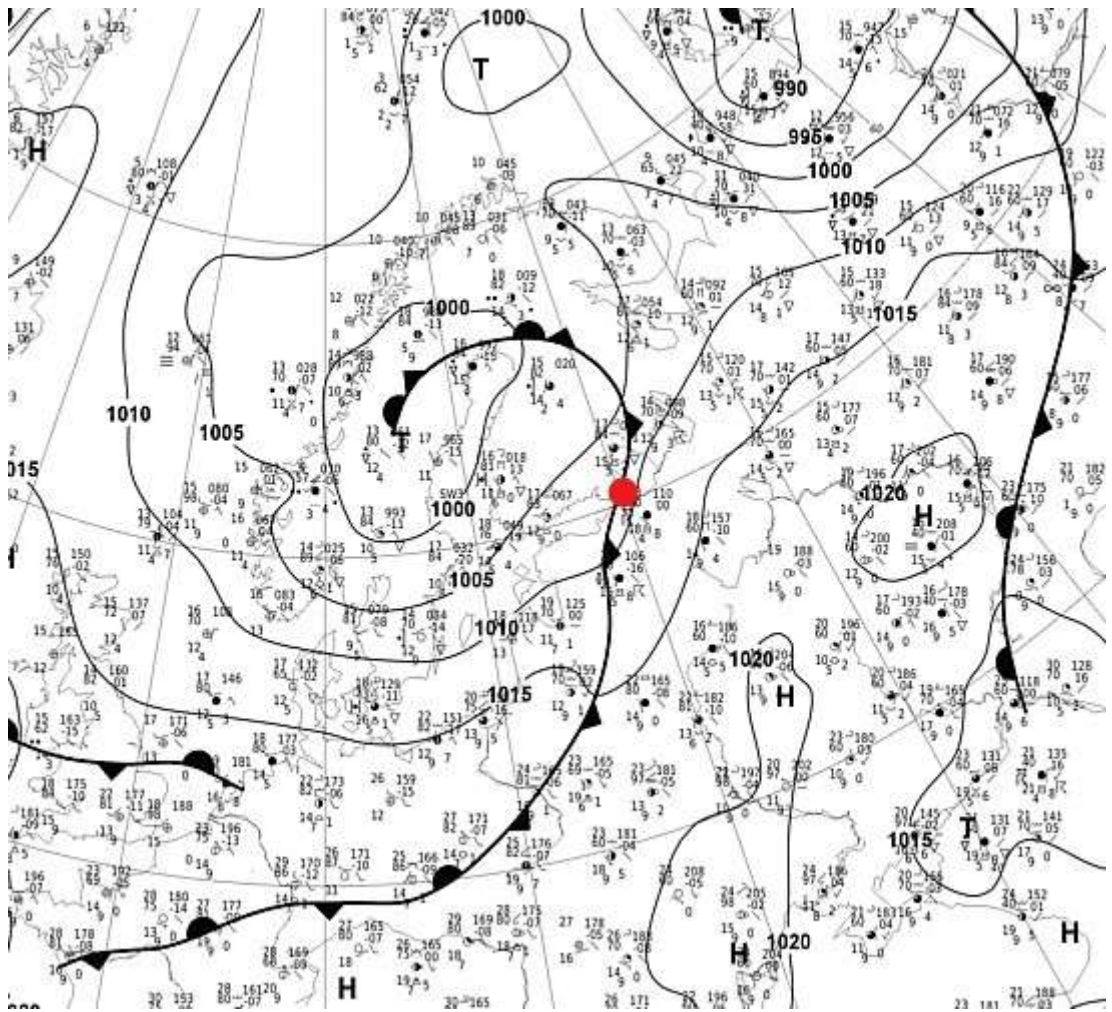


Рисунок 4.9 – карта погоды для г. Санкт-Петербург за 14 августа 2021 года

По рисункам 4.6, 4.7, 4.8 и 4.9 из синоптического анализа выявленных эталонных полей можно подчеркнуть, что синоптическая ситуация, представленная в данных полях во всех рисунках схожа. Во всех случаях было установлено, что в данном регионе отмечается прохождение фронта окклюзии.

4.4 Выявление и анализ эталонных полей для холодного периода

Для холодного периода, после расчетов были получены следующие первые несколько строк значений коэффициента S_i (таблица 4.7).

Таблица 4.7 – Коэффициенты S_i для обучающей выборки холодного периода

Дата	Значения S_i
29.10.2019	4,511
20.03.2018	4,522
22.11.2015	2,536
27.10.2019	4,556
26.12.2018	4,565
17.01.2019	4,573
12.01.2016	4,598
08.02.2015	4,588

Из таблицы 4.7 видно, что эталонное поле давления в обучающей выборки значение коэффициента S_i был равен 4,511. Коэффициенты близости здесь почти в 2 раза выше, чем для теплого, что говорит о том, что в целом поля менее схожи между собой и вариантов выпадения сильных осадков в холодный период гораздо больше. Однако здесь наименьшее значение соответствует дате 29 октября 2019 года. Поле также добавляется в контрольную выборку и после окончательного расчета были получены значения коэффициента S_i . Первые несколько значений коэффициента представлены в таблице 4.8. Синим цветом закрашены случаи с выпадением сильных осадков.

Таблица 4.8 – Коэффициенты S_i для контрольной выборки холодного периода

Дата	Значения S_i
15.02.2017	4,934
05.03.2015	4,937
02.01.2021	4,949
29.10.2019	4,953
31.12.2021	4,953
24.10.2016	4,966
30.11.2021	4,970
08.12.2015	4,978
21.10.2015	4,979
07.11.2015	4,984

Таким образом, исходя из таблицы 4.8 видно, что к эталонному полю наиболее близкими оказались случаи с отсутствием осадков. Это указывает на то, что наименьшие значения параметра схожести S_i не соответствуют случаям с сильными осадками. Собственно, о плохом применении метода говорят и сами высокие коэффициенты S_i .

На рисунках 4.10, 4.11, и 4.12 представлено барическое поле, характерное для сильных осадков за даты 29 октября 2019 года, 20 марта 2018 года и 22 ноября 2015 года, которые являются эталонами согласно полученным расчетам. На рисунке 4.13 в качестве проверки и наглядности метода представлено барическое поле за 15 февраля 2017 года, которое было получено после окончательного расчета. Для визуализации полученных данных использовалась система OpenGrADS. Красной точкой отмечен исследуемый пункт.

Также для информативности за такие же даты дополнительно были получены следующие карты [11]:

- Карта погоды для случая с выпадением сильных осадков за 29 октября 2019 года (рисунок 4.14)
- Карта погоды для случая с выпадением сильных осадков за 20 марта 2018 года (рисунок 4.15)
- Карта погоды для случая с выпадением сильных осадков за 22 ноября 2015 года (рисунок 4.16)
- Карта погоды для случая с выпадением сильных осадков за 15 февраля 2017 года (рисунок 4.17)

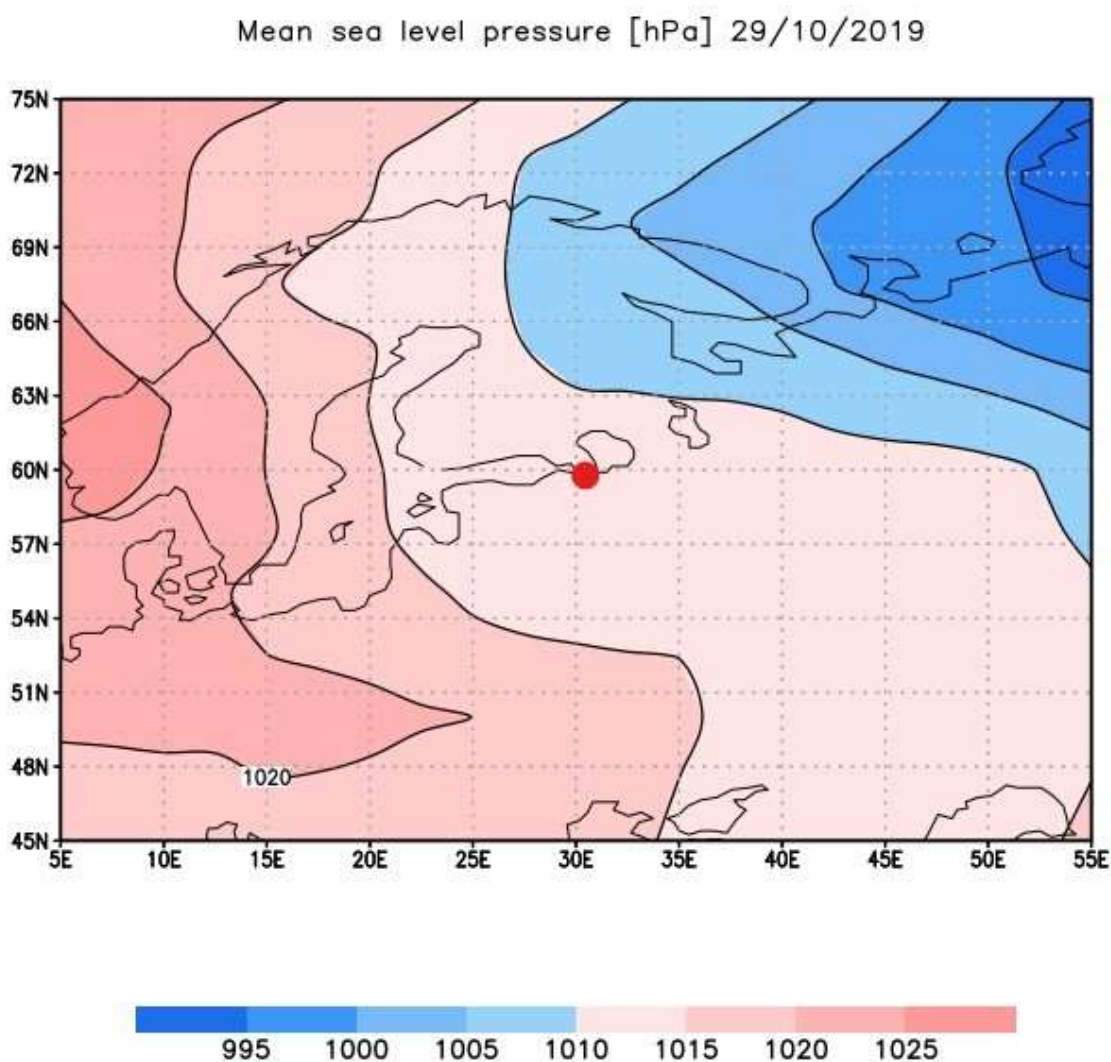


Рисунок 4.10 – барическое поле у земли за 29 октября 2019 года

Mean sea level pressure [hPa] 20/03/2018

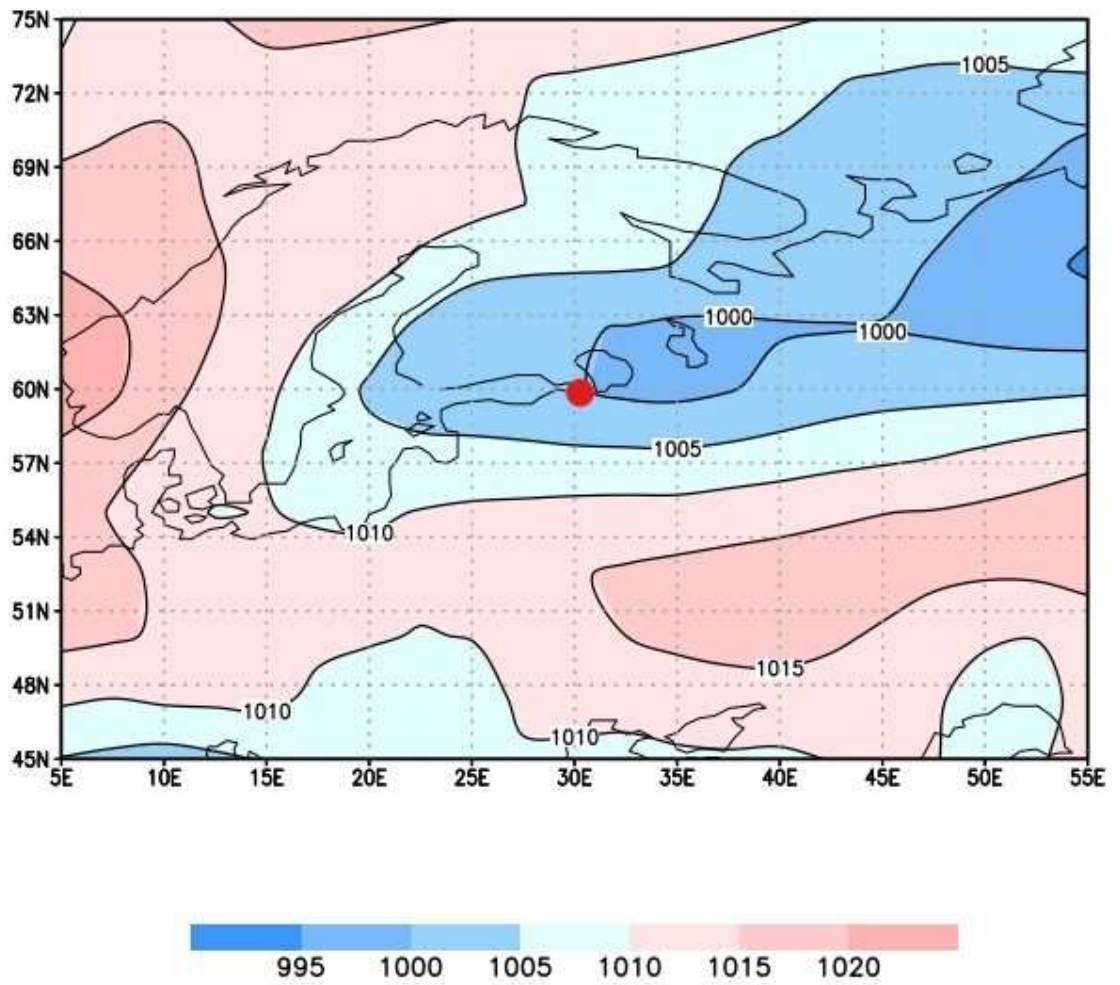


Рисунок 4.11 – барическое поле у земли за 20 марта 2018 года

Mean sea level pressure [hPa] 22/11/2015

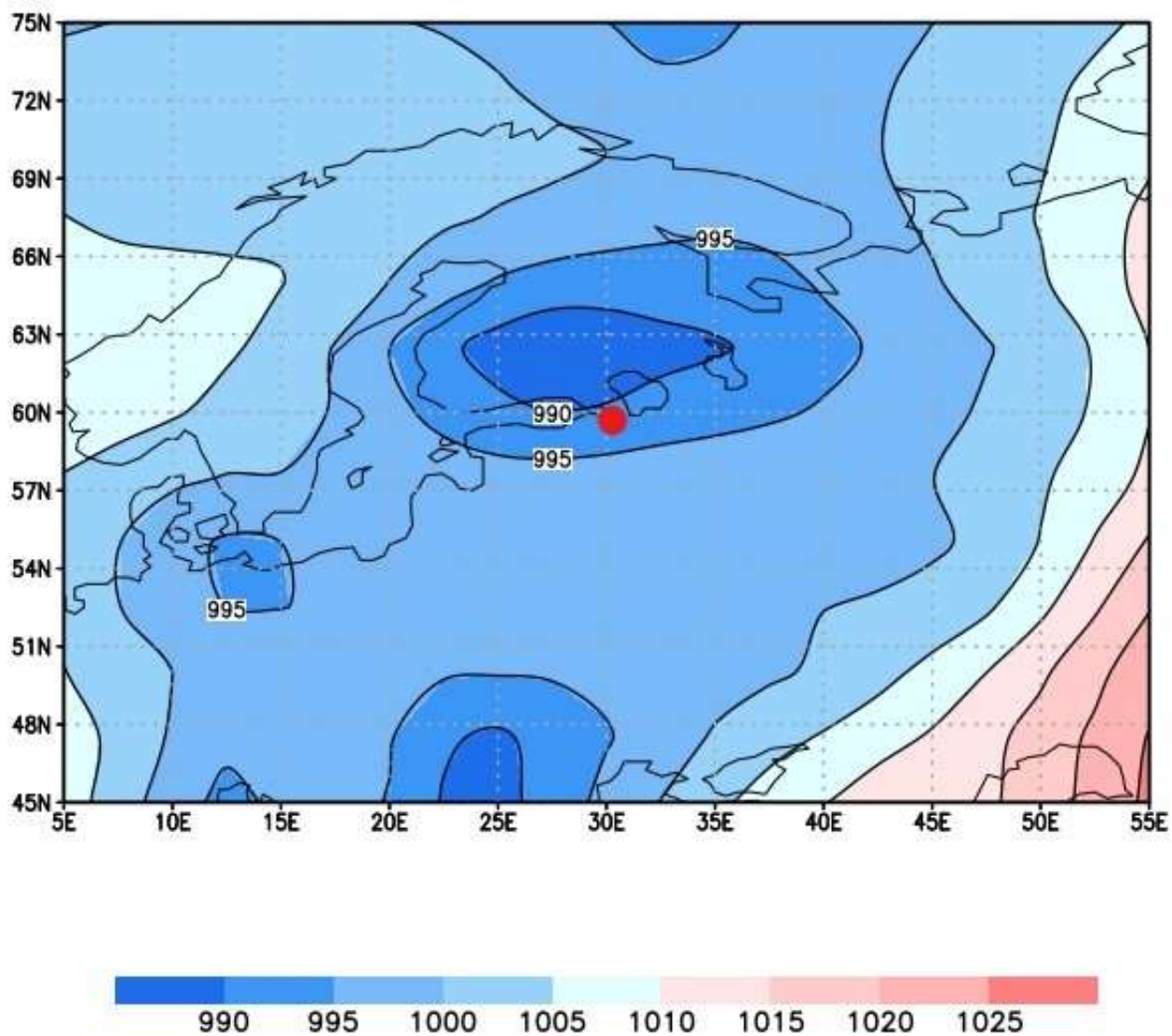


Рисунок 4.12 – барическое поле у земли за 22 ноября 2015 года

Mean sea level pressure [hPa] 15/02/2017

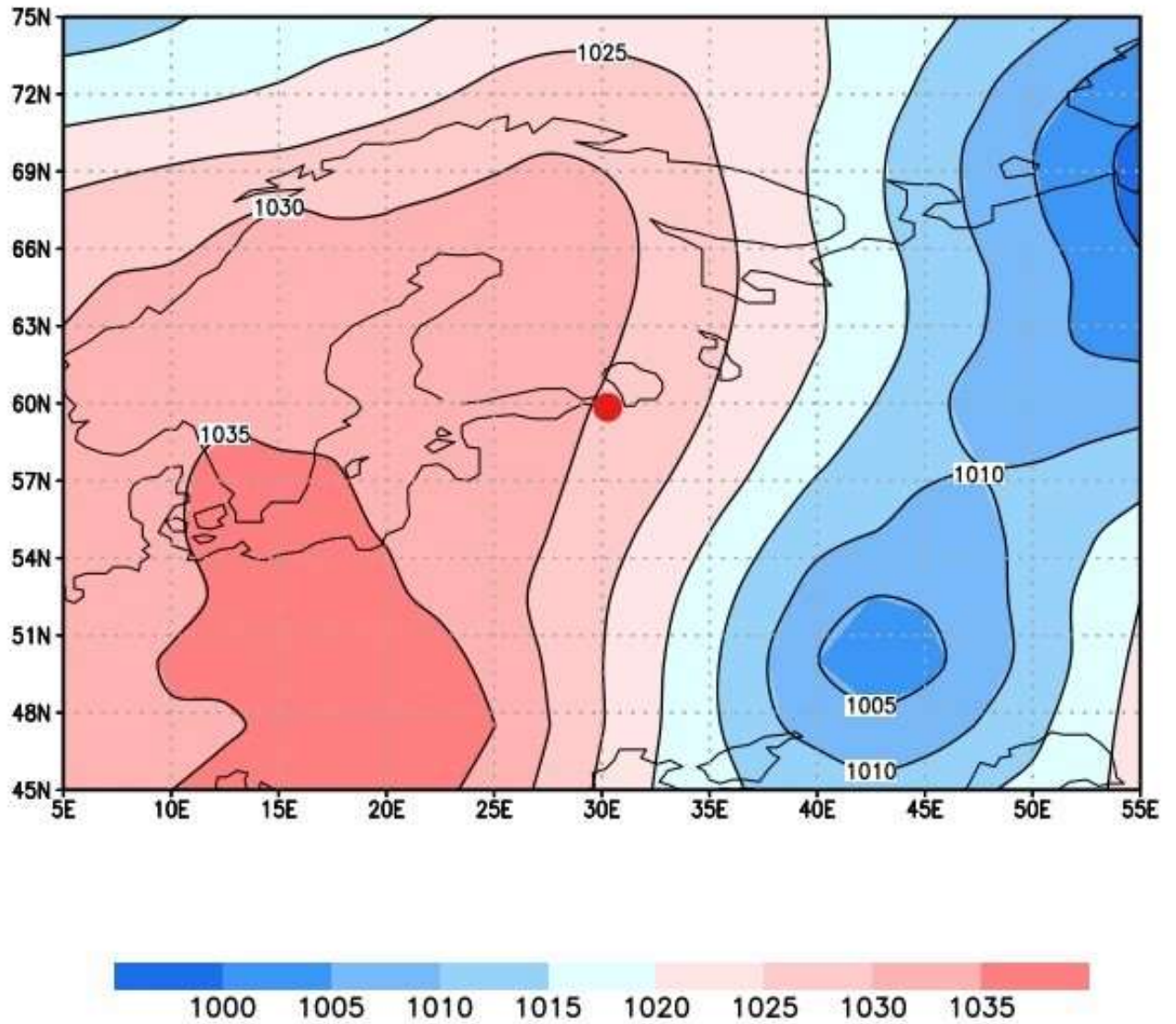


Рисунок 4.13 – барическое поле у земли за 15 февраля 2017 года

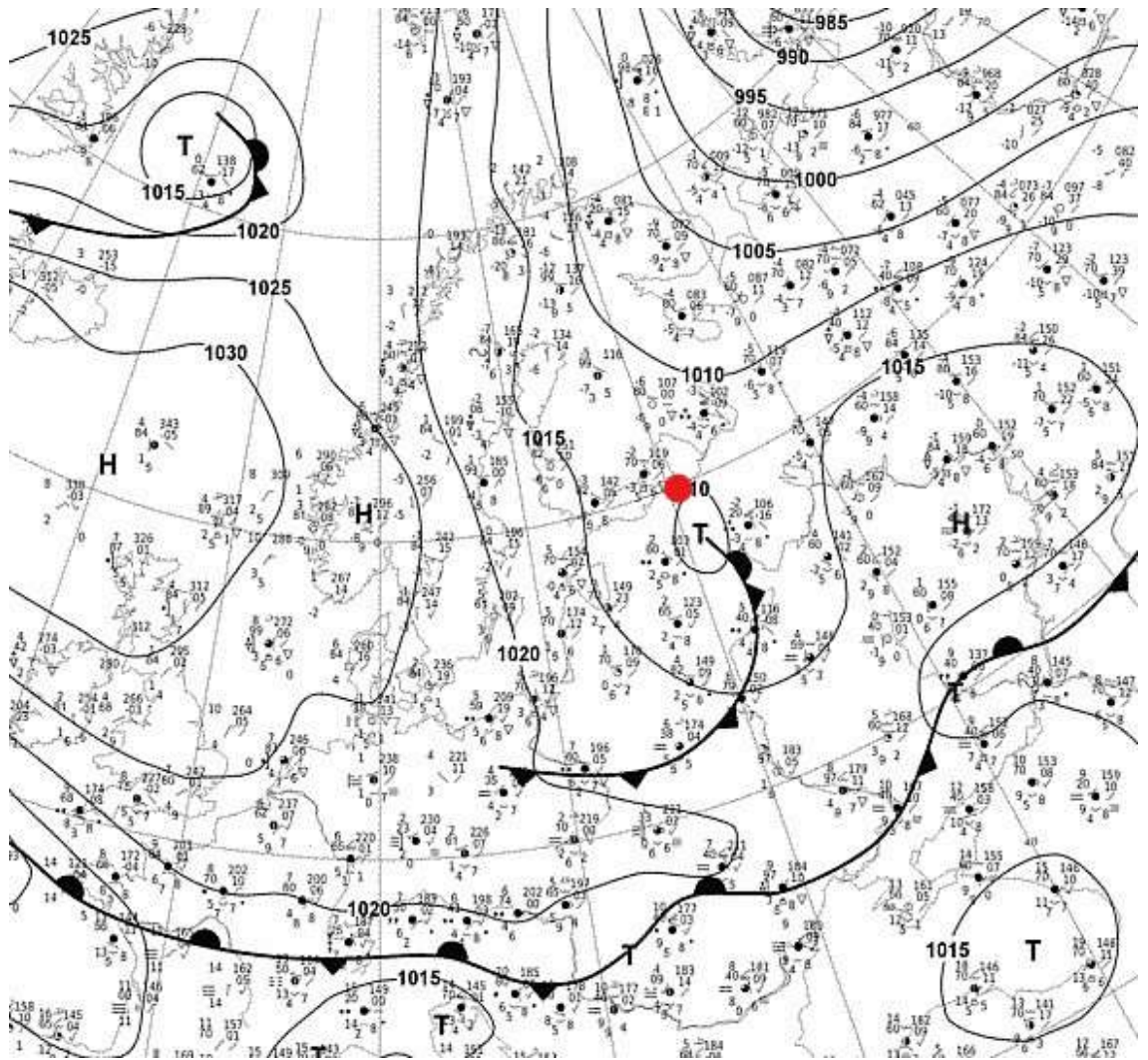


Рисунок 4.14 – карта погоды для г. Санкт-Петербург за 29 октября 2019 года

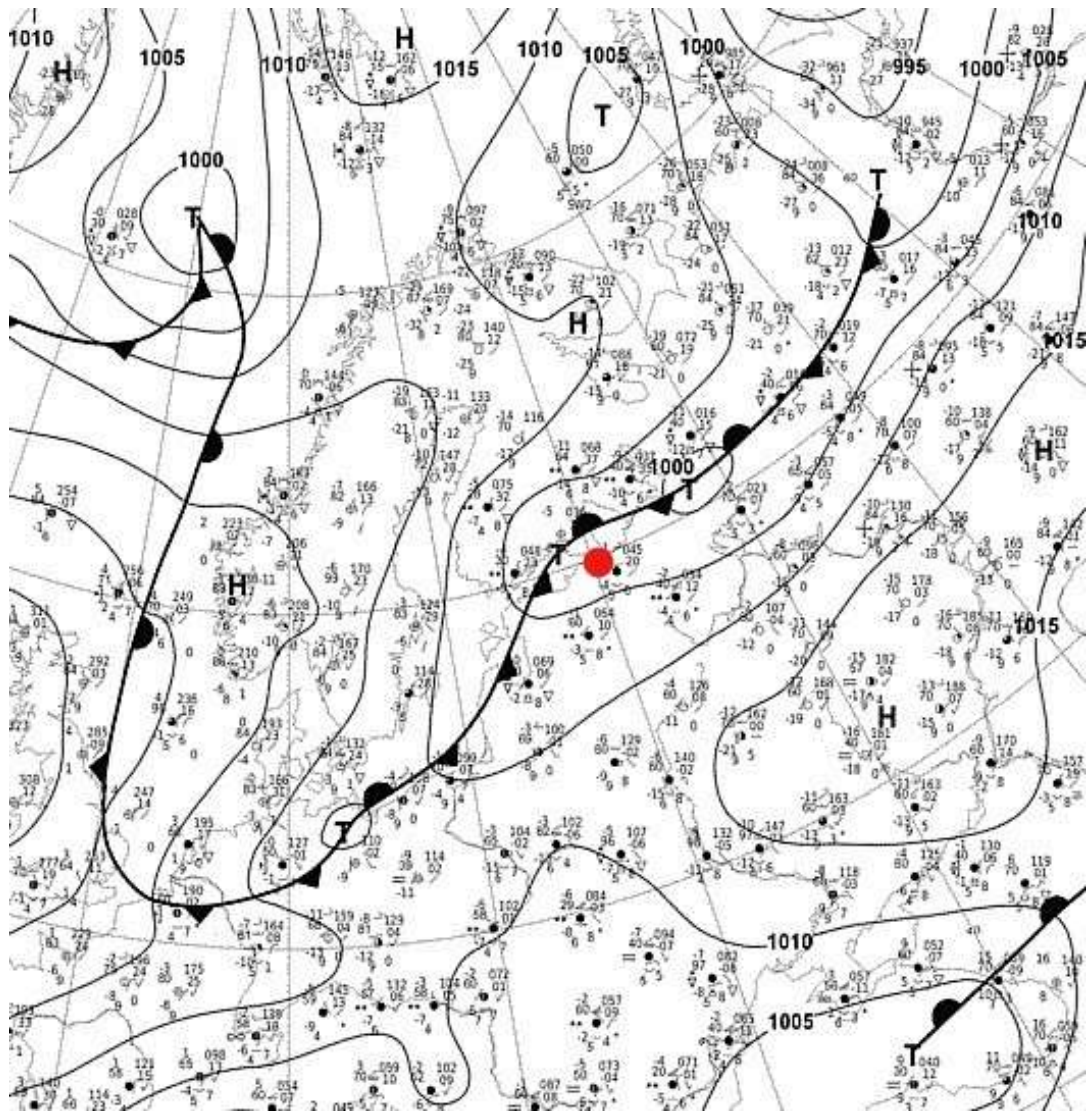


Рисунок 4.15 – карта погоды для г. Санкт-Петербург за 20 марта 2018 года

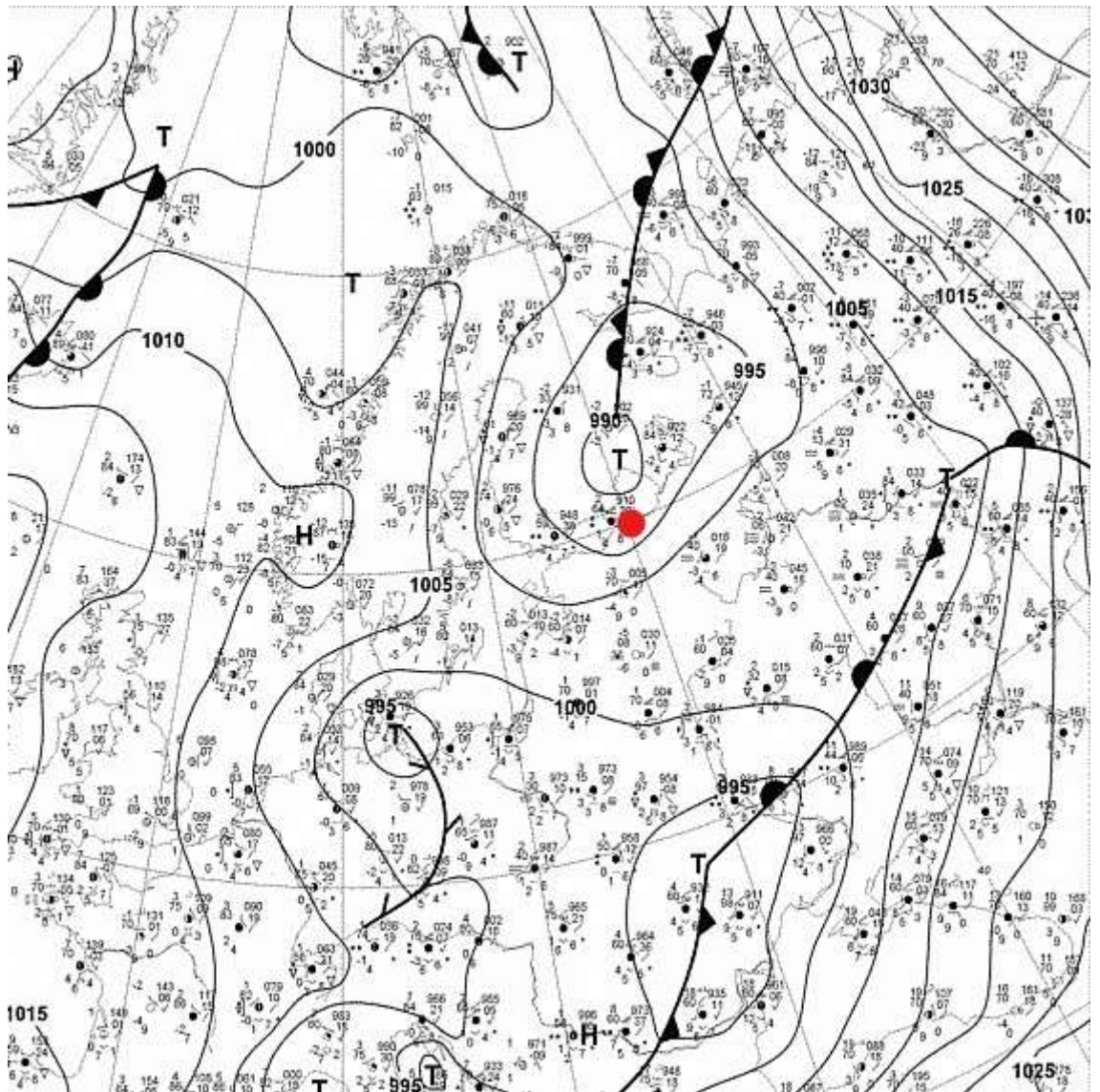


Рисунок 4.16 – карта погоды для г. Санкт-Петербург за 22 ноября 2015 года

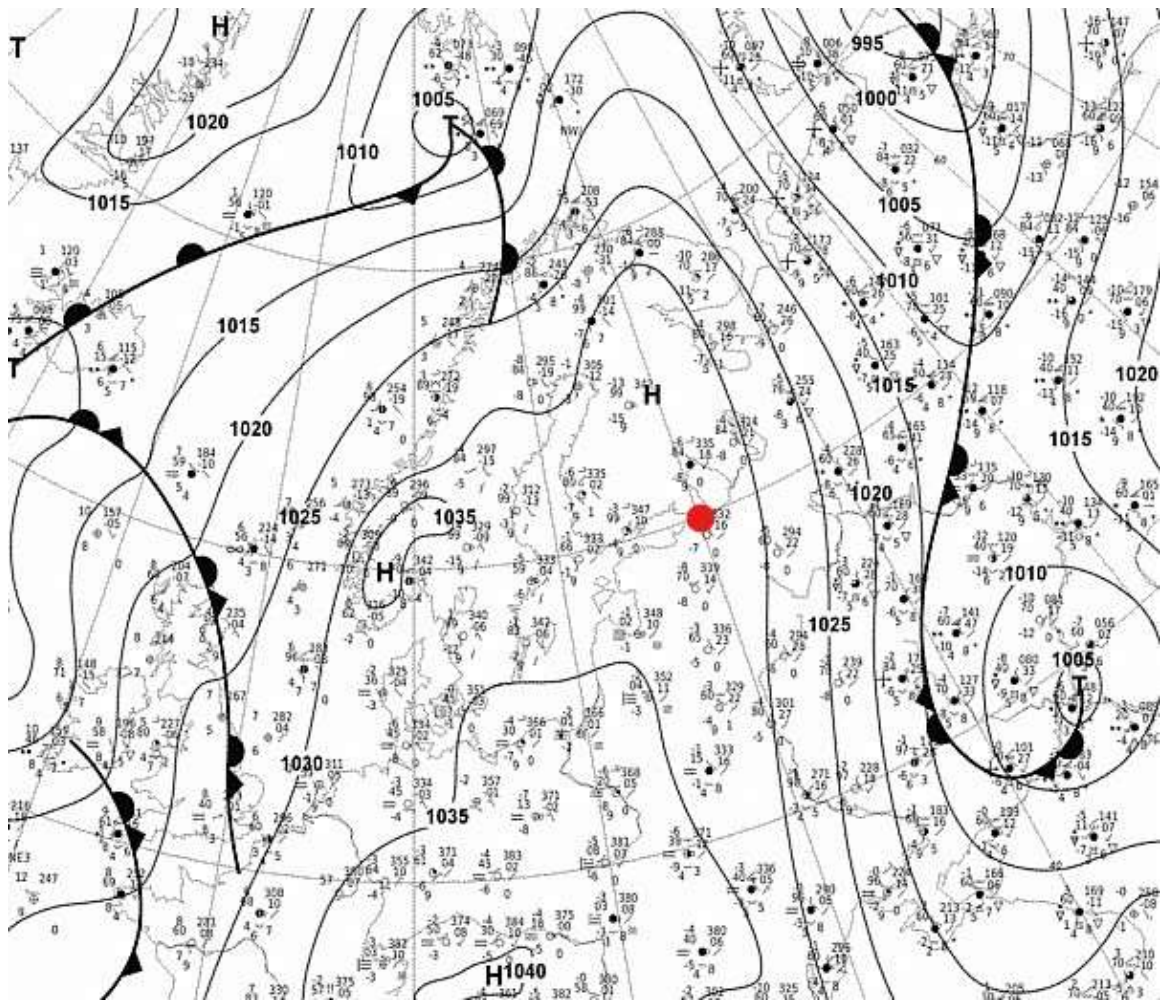


Рисунок 4.17 – карта погоды для г. Санкт-Петербург за 15 февраля 2017 года

По рисункам 4.14, 4.15 и 4.16 из синоптического анализа выявленных эталонных полей можно подчеркнуть, что синоптическая ситуация, представленная в данных полях во всех рисунках схожа за исключением рисунка 4.17. На рисунках 4.14, 4.15 и 4.16 видно, что в данном регионе наблюдается зона низкого давления, под влиянием прохождением фронтальных систем которой и приводит к возникновению и выпадению интенсивных осадков. На рисунке 4.17 наблюдается иная синоптическая ситуация. В данном рисунке исследуемый пункт находится под воздействием зоны высокого давления, интенсивные осадки не наблюдались.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе данного исследования была полностью достигнута поставленная в начале работы цель – проверка метода «эталонов» для прогноза сильных осадков.

Для достижения поставленной цели были успешно решены следующие конкретные задачи:

1. Были изучены основные критерии для формирования рабочих и контрольных выборок;
2. Были изучены способы и средства для обработки и визуализации данных;
3. Был изучен метод «эталонных полей» для долгосрочного прогнозирования. Исследован метод нахождения эталонных полей;
4. Применены численные методы для определения сходства выбранных полей давления. Выделены основные даты с эталонными полями для случаев с выпадениями осадков и их отсутствием для теплого и холодного периодов;
5. Были получены и построены карты данного исследуемого пункта для большей информативности и представления, а также для сравнения их с картами эталонных полей;
6. Был проведен анализ, полученный в результате расчетов.

Таким образом, на основании выполненного исследования можно сделать следующие выводы:

1. Метод эталонных полей давления, используемый для прогнозирования выпадения сильных осадков, демонстрирует значительный потенциал и перспективы для его применения в теплый период;
2. В ходе исследования было выявлено, что данный метод эталонных полей отлично подойдет для прогнозирования выпадения сильных

осадков в теплый период. Для выпадения сильных осадков в холодный период вариантов выпадения сильных осадков значительно больше.

3. В дальнейшем планируется продолжить исследования в области долгосрочного прогнозирования атмосферных явлений в целях усовершенствования данного метода.

СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Архив данных погоды: официальный сайт. – URL: <https://rp5.ru/> (дата обращения: 15.03.2023); (1)
2. В.М. Хан. Труды гидрометеорологического научно – исследовательского центра российской федерации / Выпуск 358 / В.М. Хан // 2015. 147- 149с.; (2)
3. В.Ф. Мартазинова, В.С. Мадерич, В.Е. Тимофеев, Е.К. Иванова. Возможности долгосрочного прогнозирования погодных условий над антарктическим полуостровом // УДК 551.510 // 44с; (3)
4. Информация о видах осадков: официальный сайт. – URL: <https://w1.weather.gov/glossary/index.php?word=PRECIPITATION> (дата обращения: 03.03.2023);
5. Информация о осадках: официальный сайт. – URL: <https://meteoinfo.ru/glossary/6242-2012-11-21-17-32-51> (дата обращения: 03.03.2023);
6. Информация о ливневых осадках: официальный сайт. – URL: <https://www.meteo vesti.ru/news/63432156082-kakie-osadki-nazyvayutsya-livnevymi> (дата обращения: 03.03.2023);
7. Информация об общих физико-географических характеристик г. Санкт-Петербурга: официальный сайт. – URL: <https://www.russiacb.com/regions/sankt-peterburg/about-saint-petersburg/> (дата обращения: 12.03.2023);
8. Информация о водных ресурсах г. Санкт-Петербурга: официальный сайт. – URL: https://www.nord-west-water.ru/activities/water_objects/protection_activities/spb/ (дата обращения: 12.03.2023);
9. Информация о классификации сроков метеорологических прогнозов: официальный сайт. – URL: <https://meteoinfo.ru/forcabout/1597-f> (дата обращения: 17.03.2023);

10. Карта г. Санкт-Петербурга: официальный сайт. – URL: <https://www.google.com/maps/place/Санкт-Петербург> (дата обращения: 12.03.2023);
11. Карты погоды: официальный сайт. – URL: https://www.wetter3.de/archiv_dwd_dt.html (дата обращения: 10 апреля 2023);
(4)
12. Л.Н. Ермакова, Н.И. Толмачева. Эталонные поля давления для интенсивных волн тепла в Пермском крае // 2007.
13. С.В. Морозова, Е.А. Полянская, Г.А. Пужлякова, Л.М. Фетисова. Региональная модель долгосрочного прогноза резких изменений температуры воздуха с месячной заблаговременностью / С.В. Морозова, Е.А. Полянская, Г.А. Пужлякова, Л.М. Фетисова // 2004. 195 – 198с.;
14. Учебные записки российского государственного гидрометеорологического университета №14. Научно-теоретический журнал. – СПб.: изд. РГГМУ, 2010. –210с // С.В. Морозова Физико-статистический метод прогноза экстремумов метеорологических величин // -50с

ПРИЛОЖЕНИЕ 1

```
integer,parameter :: Q=576,k=273
real,dimension (k,Q) :: f
real,dimension (k,k) :: c
real,dimension (k) :: S
character*14,dimension (k) :: day
character*14 tt

print*,"read dates ..."
open(1,file='/data0/home/1122/gavril/holo/obuch/dates.txt') ;
read(1,*)day
do i=1,k ; print*," daynum:", i, " date: ",day(i) ;enddo
close(1)
print*,"read dates ok";print*,""
print*,"read fields ..."
open(1,file='/data0/home/1122/gavril/holo/obuch/fields.txt') ;
do i=1,k ;read(1,*) f(i,:) ; enddo
close(1)
print*,"read fields ok";print*,""

print*,"calculate ..."
do i=1,k
do p=1,k
c(i,p)=0
do j=1,Q
c(i,p)=c(i,k)+(f(i,j)-f(p,j))**2
enddo
c(i,p)=sqrt(c(i,p))/Q
enddo
```

```

S(i)=sum(c(i,:))/k

enddo

print*,"calculate ok";print*,""
print*,"write /data0/home/1122/gavril/holo/obuch/cip.txt ..."

open(2,file='/data0/home/1122/gavril/holo/obuch/cip.dat')
write(2,'(<k>f10.2)') ((c(i,p),i=1,k),p=1,k)
close(2)

do i=k-1,1,-1
  do j=1,i
    if(S(j)>S(j+1)) then
      t=S(j) ; tt=day(j)
      S(j)=S(j+1) ; day(j)=day(j+1)
      S(j+1)=t ; day(j+1)=tt
    endif
  enddo
enddo

print*,"write /data0/home/1122/gavril/holo/obuch/etalon.txt ..."
open(3,file='/data0/home/1122/gavril/holo/obuch/etalon.dat')
write(3,'(a10,f10.3)') (day(i),s(i),i=1,k)

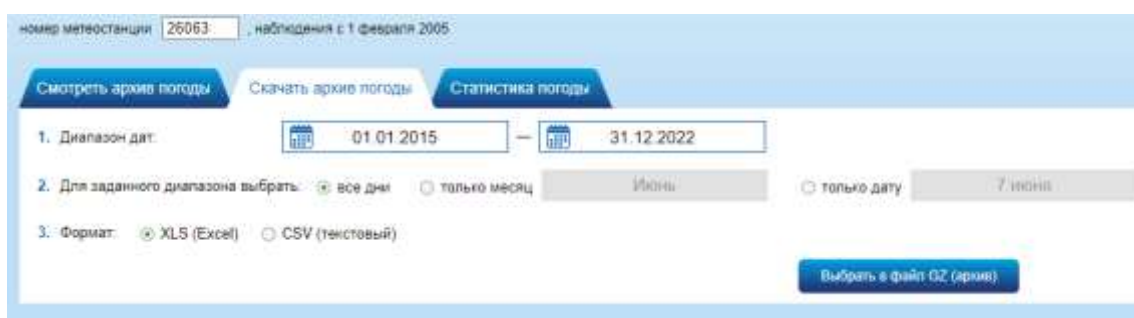
print*,"/data0/home/1122/gavril/holo/obuch/etalon.txt writed ok";print*,""
stop
end

```

ПРИЛОЖЕНИЕ 2



Пример получения карты погоды за 29 октября 2019 года с сайта wetter3.de



Пример получения архива погоды за период 2015 – 2022 с сайта r5.ru