



МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Кафедра метеорологических прогнозов

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА
(магистерская диссертация)

На тему: «Исследование циклонических характеристик в северо-западном
регионе России»

Исполнитель Карасев Иван Максимович
(фамилия, имя, отчество)

Руководитель кандидат физико-математических наук
(ученая степень, ученое звание)
Анискина Ольга Георгиевна
(фамилия, имя, отчество)

«К защите допускаю»
заведующий кафедрой

(подпись)

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

Анискина Ольга Георгиевна
(фамилия, имя, отчество)

« 26 » мая 2023 г.

Санкт-Петербург
2023

Содержание

Введение.....	2
1 Цифровые методы идентификации циклонов.....	4
1.1 Идентификация циклонических образований.....	12
1.2 Прогнозирование вектора перемещения.....	13
1.3 Построение траекторий перемещения.....	14
1.4 Определение ложных траекторий перемещения.....	16
2 Используемые данные.....	18
3 Исследование циклонических ситуаций на северо-западе России....	20
3.1 Построение карт частоты случаев циклонических образований на уровне приземного давления.....	27
3.2 Поверхность 700 гПа.....	33
3.3 Поверхность 700 гПа с учётом минимального критерия завих- ренности E_{MIN}	42
3.4 Поверхность 500 гПа с учётом критерия минимальной завих- ренности E_{MIN}	47
3.5 Аномалии количества циклонических образований на высоте 700 гПа для января и июля за период с 1960-го по 2022-ой год.....	51
3.6 Анализ данных.....	55
4 Заключение.....	63
5 Список используемых источников.....	66

ВВЕДЕНИЕ

Барические образования (циклоны и антициклоны) определяют погоду и это уже давно всем известно. Частота появления циклонов в тех или иных регионах, траектории циклонов определяют региональный и глобальный климат. С другой стороны, изменение климата приводит к изменению характеристик циклонов – их траекторий и интенсивности.

Для определения характеристик циклонической активности раньше использовали ручной анализ [1, 2]. С развитием компьютерных технологий разрабатываются методы цифровой идентификации циклонов [3, 4, 5, 6, 7, 8]. Численные методы идентификации антициклонов наиболее сложны из-за слабых градиентов давления и тенденции к слабым максимумам, а также имеют слабые ветра и большое расстояние между точками максимумов давления и относительными максимумами завихренности антициклонов.

Сегодня существует такая точка зрения, что изменение климата проявляется в изменении траекторий и интенсивности циклонов. Это объясняет актуальность данного исследования.

Цель исследования ВКР – определить характеристики циклонической циркуляции на Северо-западе Российской Федерации.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие задачи:

- Обработать данные реанализа JRA по давлению на уровне земли и на высотах 700 и 500 гПа с 1960-го по 2022-ой год, для оценки циклонических характеристик.
- Построить карты общего количества циклонических образований для нашей территории на выбранных высотах, чтобы количественно оценивать случаи, в которых наблюдается циклоническая активность.
- Построить карты общего количества циклонических образований, критерий завихренности которых превышает значение E_{MIN} на высотах

700 и 500 гПа, чтобы пронаблюдать количество более мощных и интенсивных циклонических образований, исключая маловыраженные и малоподвижные циклоны.

- Оценить циклоническую активность в зимний и летний периоды (за 1 выбранный месяц: в данной работе это январь и июль), для понимания, как меняется интенсивность циклонической активности в разные сезоны.

- Также рассчитать аномалии от средне-климатического значения по каждому месяцу выбранного периода, для оценки изменчивости циклонической активности с начала и до конца периода исследования.

- Анализировать полученные результаты, для оценки влияния климата на режим циклонического образования на северо-западе России.

1 ЦИФРОВЫЕ МЕТОДЫ ИДЕНТИФИКАЦИИ ЦИКЛОНОВ

Внимание к траекториям циклонов отмечалось ещё в самом начале зарождения метеорологии, как науки. Исследования следов циклонов в средних широтах начались, когда в 1850-1860-х годах систематически готовились синоптические карты погоды. Ранние исследования были выполнены с использованием лагранжева подхода Э. Лумисом для Северной Америки, а Моном [9] для Европы. Лумис (в 1885 году!) был первым, кто собрал информацию о траекториях циклонов над северным полушарием, но всесторонний анализ стал возможен только в середине двадцатого века (Петтерссен, 1950; Кляйн, 1957). Петтерссен обратил внимание на важность зон, где наблюдается высокая скорость чередования барических образований (циклонов и антициклонов), которые он назвал напорными каналами.

В конце 20 века начали разрабатываться цифровые алгоритмы отслеживания циклонов (труднее отслеживаются антициклоны) цифровых данных о давлении. Чаще циклоны отслеживают по данным о давлении или геопотенциальной высоте [3, 6, 4, 5, 10]. В работе [5] рассматривается климатология циклонов Северной Атлантике на основе лагранжева подхода.

Метеорологическим сообществом для оценки качества методик обнаружения циклонов и отслеживания их траекторий создан проект IMPLAST (Intercomparison of Mid Latitude Storm Diagnostics) [11].

В рамках этого проекта рассматриваются различные методы определения циклонов, из интенсивности, размеров, жизненного цикла, траекторий (треков). Оценка происходит на основе одинаковых данных – данные реанализа Европейского центра среднесрочных прогнозов ERAInterim за период 1989-2009 гг. В проекте участвует 15 методов идентификации циклонов (таблица 1.1).

Таблица 1.1 – Различные методы идентификации циклонов и их характеристик [11]

Код*	Основные ссылки для описания метода	Используемая переменная	Фильтрация рельефа
M02	Murray and Simmonds (1991), Pinto et al. (2005)	приземное давление (min), вихрь	>1500 m
M03	Benestad and Chen (2006)	приземное давление (min, grad.)	нет
M06	Hewson et al. (1997), Hewson and Titley (2010)	приземное давление (min), вихрь, ветер, фронты	Следование рельефу
M08	Trigo (2006)	приземное давление (min, grad.)	нет
M09	Serreze (1995), Wang et al. (2006)	приземное давление (min, grad.), вихрь	нет
M10	Murray and Simmonds (1991), Simmonds et al. (2008)	приземное давление (min), вихрь	>1000 m
M12	Zolina and Gulev (2002), Rudeva and Gulev (2007)	приземное давление (min)	нет
M13	Hanley and Caballero (2012)	приземное давление (min)	>1500 m
M14	Kew et al. (2010)	z850 (min, contour)	нет
M15	Blender et al. (1997), Raible et al. (2008)	приземное давление (min)	>1000 m
M16	Lionello et al. (2002)	приземное давление (min)	нет
M18	Sinclair (1994, 1997)	z850 вихрь	>1000 m
M20	Wernli and Schwierz (2006)	приземное давление (min)	>1500 m
M21	Inatsu (2009)	z850 вихрь	нет
M22	Bardin and Polonsky (2005), Akperov et al. (2007)	приземное давление (min, contour)	нет

В начале проекта исследовательским группам, заинтересованным в участии в проекте (таблица 1.1), были присвоены кодовые номера. Несколько групп (пока) не предоставили набор данных, а другие с тех пор прекратили

деятельность по отслеживанию циклонов. Кроме того, некоторые группы используют почти идентичные алгоритмы, и в этом случае дубликаты были удалены. Первоначальное присвоение кода было сохранено, чтобы гарантировать совместимость публикаций на протяжении всего срока действия проекта. Следовательно, кодовые номера не являются постоянными [11].

В оценке участвуют 15 методик учёных из разных метеорологических организаций. Рассматриваемые в проекте методы основаны на анализе различных метеорологических величин:

- давление, приведённое к уровню моря;
- геопотенциальная высота изобарической поверхности 850 гПа;
- завихренность на уровне 850 гПа;
- градиент давления, приведённого к уровню моря;
- минимальное значение в поле давления.

Методы идентификации циклонов также отличаются отношением к высоте территории, для которой происходит анализ (фильтруются или нет барические образования в районах с высоким уровнем рельефа).

Результатом исследований, выполненных в рамках проекта IMILAST, было констатация того факта, что все рассмотренные методики дают достоверные результаты.

Согласованность методов выше для глубоких циклонов. Для мелких или небольших циклонов различия результатов методов увеличиваются (как для определения факта наличия циклона, так и для других характеристик жизненного цикла циклона, а также его траектории). Очевидно, что не все этапы жизненного цикла циклона определяются с одинаковой степенью согласованности – больше разногласий в характеристиках циклонической деятельности во время зарождения и заполнения (исчезновения) циклона.

Рассогласования также возникает в ситуациях, когда циклон очень интенсивный и очень быстро перемещается.

Одной из самых важных характеристик циклонической активности является суммарное количество циклонов. Для проверки результатов работы

рассматриваемых в проекте IMILAST методик было проведено сравнение с известными климатологиями внетропических циклонов (циклонов средних широт). Получено, что большинство рассматриваемых методик дают согласованные результаты. Но присутствуют и разногласия. Особенно значительные несоответствия в районе Средиземного моря.

Анализ характеристик жизненного цикла циклонов, полученных с использованием различных методик, демонстрирует согласованность методик. Наибольший разброс в распределениях частот был обнаружен для короткоживущих, неглубоких и медленно движущихся циклонов, обнаружение которых более чувствительно к выбору схемы.

Различия в пространственном распределении циклонов, которое демонстрирует сравнение методик, больше в Северном полушарии (меньше в Южном). Также различия наблюдаются в некоторых регионах, где чаще возникают штормовые циклоны (северная Америка, Средиземноморский регион, некоторые регионы Европейского континента).

Важным результатом, имеющим непосредственное отношение к анализу последствий изменения климата, является качественная согласованность все рассмотренных в проекте IMILAST методик. Это демонстрируется согласованность линейных трендов характеристик циклонической активности для различных регионов [12, 13, 14, 15].

Другим ключевым результатом проекта IMILAST является тот факт, что до сих пор было трудно четко связать различия в идентифицированных характеристиках циклона с особенностями различных схем. В некоторых случаях поведение с выбросами может быть объяснено специфическими особенностями определенных методов, такими как предварительная обработка в методе M21 или ограничение количества циклонов в методе M03.

Одним из удивительных результатов проекта IMILAS по мнению авторов является тот факт, что результаты идентификации циклонов не разделяются по тому, какая характеристика атмосферы используется в методе для

определения положения циклона и его свойств (например, завихренность или давление на уровне моря или геопотенциал на изобарической поверхности).

Считается, что пороговые настройки для идентификации циклонов являются одним из ключевых аспектов, также как алгоритмы построения треков и предварительная или постобработка входных и выходных данных.

В работе [16] рассмотрена методика идентификации циклонов и результаты её применения для мезомасштабных образований. По оценкам проекта IMPLAST именно эти циклоны определяются с самыми большими ошибками в рассмотренных методиках.

Сегодня понятием мезомасштабный циклон характеризуют очень широкий спектр барических систем – от незначительных вихрей со слабой циркуляцией и без четких признаков облачности до очень активных полярных возмущений (полярных циклонов), которые определяют наличие ураганной силы ветров и обильные снегопады [17]. При диаметре менее 1000 км и продолжительности жизни часто менее 24 часов активность мезомасштабных циклонов резко возрастает с широтой в обоих полушариях, обычно достигая максимума вблизи полярного фронта [17]. В работе [18] было высказано предположение, что более половины всей циклонической активности во вне-тропических регионах носит мезомасштабный характер.

Нам больше известны мезомасштабные полярные циклоны северного полушария, которые были открыты по спутниковым снимкам в 60е года 20 столетия и сегодня очень подробно изучаются по спутниковым снимкам и с использованием гидродинамического моделирования. Полярные циклоны северного полушария связаны со значительной бароклинностью и взаимодействием холодной зимней атмосферы с более тёплой незамерзшей водной поверхностью. Количество полярных северных циклонов в последнее время увеличивается, в том числе, и за счёт таяния льдов во время глобального потепления. В статье [19] говорится о том, что одной из наиболее важных особенностей мезомасштабной циклонической активности южного полушария является наличие покрытого льдом и приподнятого Антарктического конти-

нента, и окружающего его морского льда. Из-за такого распределения подстилающей поверхности сильные кatabатические ветры и/или крупномасштабные синоптические погодные системы могут движение на север значительных масс холодного полярного воздуха. Оказавшись над относительно теплыми водами Южного океана этот холодный воздух взаимодействует с интенсивными восходящими теплыми потоками. Эти потоки, в дополнение к бароклинности, вызванной сильным температурным контрастом между морским льдом и открытой водой, а также статической неустойчивостью, вызванной холодным воздухом над более тёплой водой, обеспечивают идеальную среду для мезомасштабного циклогенеза [20].

Особенности мезомасштабных циклонов – это сочетание недостаточности данных (особенно в малонаселённых районах, где отсутствуют прямые синоптические наблюдения) с небольшими размерами и относительно коротким сроком жизни.

Значение мезомасштабных циклонов в общей циркуляции атмосферы и в сложной совместной климатической системе атмосфера–океан–лед все еще ясно не до конца. Однако, поскольку мезомасштабные полярные циклоны многочисленны, то, несмотря на их небольшие размеры, они могут вносить существенный вклад в перенос тепла и влаги к полюсу и в поддержание глобального атмосферного импульса. В статье [18] было показано, что климатологический вклад мезомасштабных циклонов в потоки явного и скрытого тепла на границе раздела воздух–море по всему Южному океану сопоставим с вкладом более крупных синоптических систем. Кроме того, было высказано предположение, что эти тепловые потоки вместе с поверхностным ветровым напряжением, связанным с мезомасштабной циклонной активностью, могут способствовать поддержанию высокоширотных ветвей термохалинной циркуляции на временных масштабах десятилетия и более [21, 22].

В статье [22] делается основное заключение о том, что непонимание природы и климатологии полярных циклонов сегодня связано с тем, что для их изучения в основном используются данные реанализа, которые имеют не-

достаточно высокое разрешение. Поэтому рассматриваются для составления сезонной климатологии мезомасштабных циклонических систем южного полушария поля приземного давления, полученные с помощью спутника с относительно высоким разрешением, в сочетании с автоматизированным алгоритмом определения циклонов.

В исследовании используются данные о полях приземного давления полученные от спутника быстрого рассеяния на полярной орбите (QuikSCAT) Национального управления по авиации и исследованию космического пространства (National Aeronautics and Space Administration). Эти спутниковые данные доступны с середины 1999 года и предоставляют оценки приземного ветра над свободными ото льда морскими поверхностями. Департамент атмосферных наук Вашингтонского университета по результатам обработки этих данных предоставляет поля приземного давления, которые называются полями давления QuikSCAT Университета Вашингтона (UWQS) и доступны онлайн по адресу <http://pbl.atmos.washington.edu> или <https://wow.jpl.nasa.gov/index.html> проверить или найти где они есть сейчас. Методика обработки спутниковых данных не меняется и это позволяет говорить о отсутствии в них ложных тенденций, которые иногда присутствуют в данных реанализа. Разрешение данных о давлении $0.5^{\circ} \times 0.5^{\circ}$ и данных о ветре 25 км позволяет анализировать мезомасштабные циклоны.

Данные о поверхностном ветре QuikSCAT получены из векторов поверхностного ветра QuikSCAT с разрешением 25 км. Прибор SeaWinds на борту солнечно-синхронного спутника QuikSCAT на полярной орбите представляет собой сканирующий микроволновый радар, который измеряет электромагнитное обратное рассеяние от шероховатой от ветра поверхности океана. Скорость и направление ветра оцениваются по обратному рассеянию с использованием геофизической модели и сообщаются как ветер, который существовал бы на высоте 10 м, если бы атмосфера была статически нейтральной [23]. Период обращения около 100 минут, и эффективная ширина полосы 1600 км.

Метод определения давления UWQS был широко апробирован и используется при решении как оперативных, так исследовательских задач. Например, поля давления UWQS используются почти в режиме реального времени в Центре прогнозирования океана Национального управления океанических и атмосферных исследований (NOAA) и использовались для изучения развития фронтальных волн над Южным океаном. [24] установили, что среднеквадратичная разница между полями поверхностного давления UWQS и данными ближайшего по времени анализа поверхностного давления ECMWF в средних широтах составляет около 2 гПа, а сравнение с данными буёв показало средний коэффициент корреляции 0,97.

Алгоритм идентификации циклонов Мельбурнского университета [25; 3] характеризует каждую систему, которую он идентифицирует, с точки зрения ее интенсивности, глубины и радиуса.

Алгоритм идентификации и трекинга циклонов в данной ВКР основан на идее работ Мюррея и Симмондса [25], Симмондса и др. [3], Пинто и др. [26]. Сам алгоритм включает в себя четыре блока:

- обнаружение циклона в момент времени t_n ,
- предположение местоположения циклона в будущий момент времени t_{n+1} ,
- определение связи между местоположениями циклонов в моменты времени t_n и t_{n+1} на основе вычисления разницы между прогнозируемыми (первое предположение, FG) и всеми текущими положениями циклонов (точки-кандидаты, CP) из данных на момент t_n ;
- отсеивание ошибочных треков.

Можно по этой методике определять и закрытые (циклоны, области с замкнутыми изобарами) и открытые (ложбины, незамкнутые изобары) системы

FG и CP это вектора. Определяется расстояние между векторами и угол перемещения между этими векторами.

1.1 Идентификация циклонических образований.

Циклон идентифицируются по местным минимальным значениям для геопотенциальной высоты или давления воздуха.

В данной работе рассматриваются закрытые системы – давление или геопотенциальная высота в рассматриваемом узле ниже, чем в четырех окружающих этот узел точках сетки.

Если бы рассматривались и открытые барические системы, то её центром бы считалась точка, значение давления или геопотенциала в которой было меньшим по сравнению давлением в трёх

В данной работе вслед за исследованием [30] для идентификации циклонов используется поле геопотенциальной высоты 700 гПа.

Мера интенсивности барического поля является относительная завихренность на изобарическом уровне 700 гПа:

$$\varepsilon_{SLP} = \left(\frac{1}{\rho f} * \nabla^2 p \right) \text{ или } \varepsilon_{GPH} = \left(\frac{1}{f} * \nabla^2 Z \right) \quad (1.1)$$

где

f - параметр Кориолиса,

ρ - плотность воздуха.

Вводится понятие критического значения изобарической завихренности E_{MIN} все циклонические образования с интенсивностью ниже минимального критерия E_{MIN} не учитываются. Этот критерий в статье [25] определяется равным

$3,8 * 10^{-5} \text{ c}^{-1}$ для открытых циклонических систем при анализе приземного давления;

$2,9 * 10^{-5} \text{ c}^{-1}$ для закрытых циклонических систем при анализе приземного давления

$3,5 \cdot 10^{-5} \text{ с}^{-1}$ для открытых циклонических систем при анализе геопотенциальной высоты поверхности 700 гПа;

$2,6 \cdot 10^{-5} \text{ с}^{-1}$ для закрытых циклонических систем при анализе геопотенциальной высоты поверхности 700 гПа.

Эти критические значения завихренности говорят о том, что в работе исследуются только очень мощные и интенсивные циклоны.

В статьях [26] и [27] критическое значение завихренности меньше и это определяет мощность исследуемых циклонов, а также связано с небольшим радиусом (160 км) идентифицируемых барических образований.

1.2 Прогнозирование вектора перемещения.

Делается предположение о местоположении барического образования в следующий момент времени t_{n+1} (FG) и определяется его следующее положение с помощью вектора распространения U_{pred} , который рассчитывается с использованием двух составляющих:

– одна, U_{pst} , включает в себя постоянство перемещения циклонического образования [25] и характеризует климатологическую скорость перемещения циклона в соответствующей точке сетки, в которую циклон попал с использованием U_{pst} . Климатические скорости перемещения циклонов можно получить из существующего каталога треков за период 1961-2002 годов [30] и по модернизированному архиву [30]

– вторая составляющая использует направление ветра U_{low} от уровня, который нас интересует, т.е. от уровня 700 гПа или уровня приземного давления, а также U_{urr} от соответствующего верхнего уровня 500 или 700 гПа [30]. U_{urr} ; U_{low} рассматривается как определённый осреднённый градиент давления, который рассчитывается в диапазоне 320 км от центра циклона по окружности в случае использования приземного давления или используется геострофическое приближение, если используется геопотенциальная высота изобарической поверхности 700 гПа $U_{grd} = f^{-1}(\hat{e}_3 \times \nabla Z)$ в др.

Два компонента оцениваются для получения прогнозируемого вектора перемещения, который увеличивается в соответствии со следующим уравнением:

$$U_{pred} = (1 - w_1) * U_{pst} + w_1 * \{w_2 * U_{low} + (1 - w_2) * (f_{red} * U_{upp})\} \quad (1.2)$$

Весовой коэффициент определяется равным 0,60, а $w_2 = 0,33$, чтобы обратить больше внимания на ветры верхнего уровня. Коэффициент уменьшения f_{red} позволяет объяснить уменьшение скорости ветра от верхних слоёв атмосферы к нижним [30].

значение f_{red} является равным 0.7 на первом и втором уровне.

1.3 Построение траекторий перемещения.

Для образования траектории положения циклонов в два последовательных момента времени t_n и t_{n+1} . Рассчитывается оценка связи C , которая определяет предельное значение критериев. Этот балл является мерой согласованности между позициями циклона-кандидата ('CP') и предполагаемой в будущем (первое предположение, 'FG') позицией в момент времени t_{n+1} (рисунок 1.1).

Концепция связи циклонических образований с применением балльной системы подобна концепции, описанной в работах [25] и [26], с тем отличием, что для определения трека выбирается не только лучший претендент, но и все кандидаты, которые смогли набрать баллы выше предельного значения. Из этого следует образование циклонических расхождений и/или схождения для некоторых путей. Оценка C это не просто евклидово расстояние между CP и FG, а она состоит из двух частей

$$C = C_{dis} + C_{dir} \quad (1.3)$$

где

C_{dis} относится к расстоянию (dis) между CP и FG и изменяется от 0 до 1.

C_{dir} относится к углу (θ) между векторами перемещения к FG и CP и варьируется от -0,15 до +0,25.

Во избежание неточного определения оценок угла для траектории перемещения циклона, перемещающегося с маленькой скоростью, C_{dir} убывает до нуля, если расстояние между CP и определённым положением циклонического образования в момент времени t_n (рисунок 1.1) стремится к нулю (уравнение 4с).

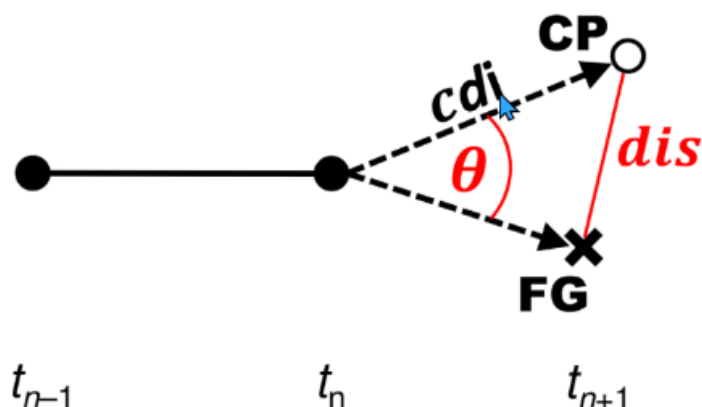


Рисунок 1.1 – Схема, показывающая концепцию связи положений циклонических образований, в моменты времени t_n и t_{n+1}

Также, в [30] C_{dir} появляется для придания большего значения самому правдивому прогнозированию направления перемещения, во избежание случаев, когда рассчитанное расстояние приводит к одному и тому же исходу, хотя направление перемещения могло бы быть существенно различно.

Предельное значение C , выше уровня которого допустимо подключение CPs для определения трека, принято равным 0,5. Баллы вычисляются по уравнению 4:

$$C_{dis} = \begin{cases} \left[1 - \left(\frac{dis}{d_{max}} \right)^2 \right]^{2.5} & (0 \leq dis \leq d_{max}) \\ 0 & (\text{в противном случае}) \end{cases} \quad (1.4a)$$

$$\text{вместе с } d_{max} = 450km + \left[255km \times \tanh \left(\pi \times \frac{\varphi}{360} \right) \right] (0^\circ \leq \varphi \leq 90^\circ) \quad (1.4b)$$

$$C_{dir} = \left[0.25 - \left(\frac{\theta}{450} \right) \right] \times \tanh \left(\pi \times \frac{cdi}{450} \right) \quad (0^\circ \leq \varphi \leq 180^\circ) \quad (1.4c)$$

где единицы измерения d_{max} , dis и cdi – километры.

В аналогичных работах применялось неизменное значение максимального радиуса связи d_{max} , например, 420 км [31]. Но в уравнении (1.4b) максимальное расстояние зависит от широты ϕ и изменяется от 515 км при 30° с.ш. до 604 км 80° ю. ш..

Хоть уравнение (1.4a) приспособлено к данным ERA40, его также допустимо без трудностей применять к аналогичным данным с отличающимся разрешением по пространству, заменяя критерий перехвата в уравнении ((1.4a) b) с 450 до 550 км для данных NCAR-NCEP1 [Kalnay et al., 1996] и до 350 км для промежуточных данных ECMWF-ERA [Dee et al., 2011], как было опробовано в этом исследовании (не показано).

1.4 Определение ложных траекторий перемещения.

В заключительном шаге все треки циклонов проверяются, для точного их определения и отсеивания маловероятных. Ложные треки в мало градиентных полях, когда центр циклона выражен слабо. Второй тип ошибочных треков может появляться на уровне приземного давления рядом с основными орографическими объектами в том случае, когда мощный поток поверх этих объектов создает квазистационарные впадины.

В научных работах [например, 32, 33] были отсеяны все не перемещающиеся циклонические образования. Однако, так как местность над территорией северной Италии представляет собой один из самых значимых регионов циклонообразования в Европе [34], то в [34] аналогичные пути идентифицируются и отсеиваются следующим методом:

трек не рассматривается, если он попадает под следующие условия:

1. Малая продолжительность жизни циклона (≤ 48 ч);
2. Слабая интенсивность (E меньше 33-го перцентиля всех циклонических образований на выбранном уровне);
3. Длина трека меньше 1000 км;
4. Скорость перемещения циклонического образования достаточно мала (< 38 км/час);
5. Когда встречаются частые значительные перемены направления перемещения (в среднем $> 60^\circ$ на трек),
6. Окончание пути располагается достаточно близко к начальной точке (< 500 км).

Данный способ позволил отсеять 17% всех треков при использовании приземного давления и 11% при использовании геопотенциальной высоты 700 ГПа.

2 ИСПОЛЬЗУЕМЫЕ ДАННЫЕ

Для исследования циклонических ситуаций были использованы данные о приземном давлении и геопотенциальной высоте изобарических поверхностей 500 и 700 гПа реанализа JRA-55.

JRA-55 (the Japanese 55-year Reanalysis) – один из самых продолжительных повторных анализов (реанализ) третьего поколения, который использует полную систему наблюдений в улучшенной схеме ассимиляции данных и увеличенным разрешением модели по сравнению с предыдущим японским реанализом JRA-25. Улучшения включают уменьшение отклонений в стратосферной температуре и количестве осадков в Амазонии, а также большую временную согласованность температурного анализа. Однако, все еще есть заметные ошибки, влияние изменений в системе наблюдений на ошибку прогноза более очевидно в Южном полушарии. Есть два дополнительных набора данных - JRA-55C, использующий только обычные наблюдения, и JRA55-AMIP, не использующий ассимиляцию данных.

Кроме полей стандартных метеорологических величин (давление, температура, геопотенциальная высота, количество осадков и т.п.) реанализ JRA-55 предоставляет улучшенную информацию о тропических циклонах и других экстремальных погодных явлениях. Это может быть полезно для прогнозирования погоды и климата, а также для исследований в области климатических изменений.

Одним из главных достоинств реанализа JRA-55 является его доступность для широкой общественности. Это позволяет множеству исследователей использовать эти данные, что может привести к новым открытиям не только в науке о климате.

В целом, реанализ JRA-55 представляет собой значительный шаг вперед в области климатического моделирования и прогнозирования. Однако, как и любая модель, а предоставленные данные есть результат моделирования с использованием Global Circulation Model (GCM) Японского метеорологического агентства, эти данные не являются идеальной и содержат ошибки. Поэтому Японское метеорологическое агентство продолжает работу над совершенствованием гидродинамической модели и методов ассимиляции данных, анонсируется представление метеорологической общественности данных нового реанализа JRA-3Q.

Данные реанализа JRA-55 могут быть использованы для анализа прошлых климатических условий и их изменений, что может помочь в понимании того, как климат меняется с течением времени. Это может быть полезно для принятия решений о том, как адаптироваться к изменяющимся климатическим условиям.

Реанализ JRA охватывает временной период с 1958 г. по настоящее время. В данном исследовании использовались поля с разрешением по горизонтали 1° .

3 ИССЛЕДОВАНИЕ ЦИКЛОНИЧЕСКИХ СИТУАЦИЙ НА СЕВЕРО-ЗАПАДЕ РОССИИ

Было проведено три цикла численных экспериментов с рассмотрением полей геопотенциальной высоты на разных изобарических поверхностях и приземного давления.

В каждом цикле численных экспериментов рассматривался временной интервал с 1960-го по 2022-ой и анализ производился за каждый год отдельно.

При анализе геопотенциальной высоты для определения типа барического образования использовалась следующая формула (3.1)

$$\varepsilon_{SLP} = \left(\frac{1}{\rho f} * \nabla^2 p \right) \quad (3.1)$$

где

$$f = 2\omega \sin \varphi - \text{параметр Кареолиса} \quad (3.2)$$

Для вычисления использовались следующие уравнение, которые аппроксимировались конечно разностными аналогами (центральные разности):

$$\nabla^2 p = \frac{\partial^2 p}{\partial \lambda^2} \frac{1}{a^2 \cos^2 \varphi} + \frac{1}{a^2} \frac{\partial^2 p}{\partial \varphi^2} \quad (3.3)$$

$$\frac{1}{a \cos \varphi} \frac{\partial^2 p}{\partial \lambda^2} = \frac{1}{a^2 \cos \varphi^2} \left(\frac{p_{i+1,j} + p_{i-1,j} - 2p_{i,j}}{\Delta \lambda^2} \right) \quad (3.4)$$

$$\frac{1}{a} \frac{\partial^2 p}{\partial \varphi^2} = \frac{1}{a^2} \left(\frac{p_{i,j+1} + p_{i,j-1} - 2p_{i,j}}{\Delta \varphi^2} \right) \quad (3.5)$$

где:

$\Delta \lambda, \Delta \varphi$ – в радианах,

$$a(\varphi = 60^\circ) = 637636 \text{ м}$$

А при использовании поля приземного давления приведённого к уровню моря для идентификации циклонической ситуации использовалась формула:

$$\varepsilon_{GPH} = \left(\frac{1}{f} * \nabla^2 Z \right) \quad (3.6)$$

В каждом цикле рассматривались циклонические образования разной интенсивности для этого задавались разные предельные значения E_{MIN}

Минимальным критическим значением завихренности при анализе было принято $E_{\text{MIN}} = 2,9 * 10^{-5} \text{ с}^{-1}$ для приземного давления и $E_{\text{MIN}} = 2,6 * 10^{-5} \text{ с}^{-1}$ для геопотенциальной высоты изобарической поверхности 700 гПа, что позволяет нам отсеивать небольшие циклонические образования со слабой интенсивностью.

По данным реанализа JRA были построены карты случаев циклонических образований на уровне приземного давления и изобарических поверхностях 500 гПа и 700 гПа. Карты с учётом E_{MIN} для уровня 700 гПа и 500 гПа,

а также аномалии средне-климатических за период с 1960-го по 2022-ой для каждого месяца год для высоты 700 гПа. Были построены карты для количества циклонических образований для всех лет за все месяца.

Программный код расчёта количества циклонических образований за год на языке программирования Fortran выглядит следующим образом:

```
integer,parameter :: NX=30,NY=30,NT=23011,NX1=NX-1,NY1=Ny-
1,Year0=1960,YearN=2022,ngod=YearN-Year0+1
real,parameter :: dx=1.,dy=1.,a=6362132.,fi00=50.
real,dimension (NX,NY,NT) :: Z,omega
real,dimension (NY)      :: Lame,Coriolis
integer,dimension (NX,NY,Year0:YearN) :: KOLI
integer,dimension (12) :: MonDay=(/31,28,31,30,31,30,31,31,30,31,30,31/)

dx=dx*3.141592/180. ; dy=dy*3.141592/180. ; fi0=fi00*3.141592/180.
dxL=dx*a*dx*a
fi=fi00
do j=1,NY
  Lame(j)=dy*a*cos(fi)*dy*a*cos(fi)
  Coriolis(j)=2*7.29e-5*sin(fi)
  fi=fi+dy
enddo

open(1,file='./output/jra_hgt_1960m01-12_2022m01-
12_x30y30z1t23011_500hPa.bin',form='unformatted',access='direct',recl=NX*NY)
do it=1,NT
read(1,rec=it) z(:,:,it)
enddo
close(1)

open(2,file='zz.dat',form='unformatted',access='direct',recl=NX*NY)
do it=1,NT
write(2,rec=it) z(:,:,it)
enddo
close(2)

it=1 ; KOLI=0
do iY=Year0,YearN
do mon=1,12
  mmon=MonDay(mon)
  if(iY==4*(iY/4).and.mon==2) mmon=29
  do iday=1,mmon
    do i=2,NX1 ;
      do j=2,NY1
        omega(i,j,it)=(z(i+1,j,it)+z(i-1,j,it)-2*z(i,j,it))/dxL+(z(i,j+1,it)+z(i,j-1,it)-
2*z(i,j,it))/Lame(j)
        omega(i,j,it)=omega(i,j,it)/Coriolis(j)
        if(omega(i,j,it)>2.6e-5) KOLI(i,j,iY)=KOLI(i,j,iY)+1
      enddo
    enddo
  enddo
enddo
```

```

        enddo
    enddo
    it=it+1
enddo !day
enddo !month
enddo !year
NX2=NX1-1 ; NY2=NY1-1
open(2,file='omega.dat',form='unformatted',access='direct',recl=NX2*NY2)
do it=1,NT
write(2,rec=it) omega(2:NX1,2:NY1,it)
enddo
close(2)
open(2,file='koliY.dat',form='unformatted',access='direct',recl=NX2*NY2)
it=1
do iY=Year0,YearN
write(2,rec=it) float(KOLI(2:NX1,2:NY1,iY))
it=it+1
enddo
close(2)
stop
end

```

Программный код для расчёта циклонической активности для каждого месяца:

```

integer,parameter :: NX=30,NY=30,NT=23011,NX1=NX-1,NY1=Ny-
1,Year0=1960,YearN=2022,ngod=YearN-Year0+1
real,parameter :: dxx=1.,dyy=1.,a=6362132.,fi00=50.
real,dimension (NX,NY,NT) :: Z,omega
real,dimension (NY) :: Lame,Coriolis
integer,dimension (NX,NY,Year0:YearN) :: KOLI
integer,dimension (12) :: MonDay=(/31,28,31,30,31,30,31,31,30,31,30,31/)
character*3,dimension (12) :: Char-
mon=(/jan',feb',mar',apr',may',jun',jul',aug',sep',oct',nov',dec'/)
dx=dxx*3.141592/180. ; dy=dyy*3.141592/180. ; fi0=fi00*3.141592/180.
dxL=dx*a*dx*a
fi=fi00
do j=1,NY
    Lame(j)=dy*a*cos(fi)*dy*a*cos(fi)
    Coriolis(j)=2*7.29e-5*sin(fi)
    fi=fi+dy
enddo
open(1,file='./output/jra_hgt_1960m01-12_2022m01-
12_x30y30z1t23011_700.bin',form='unformatted',access='direct',recl=NX*NY)
do it=1,NT
read(1,rec=it) z(:,:,it)
enddo
close(1)
!open(2,file='zz.dat',form='unformatted',access='direct',recl=NX*NY)
!do it=1,NT
!write(2,rec=it) z(:,:,it)
!enddo

```



```

!close(2)
NX2=NX1-1 ; NY2=NY1-1
do mo=1,12
it=1 ; KOLI=0
do iY=Year0,YearN
do mon=mo,mo
  mmon=Monday(mon)
  if(iY==4*(iY/4).and.mon==2) mmon=29
  do iday=1,mmon
    do i=2,NX1 ;
      do j=2,NY1
        omega(i,j,it)=(z(i+1,j,it)+z(i-1,j,it)-2*z(i,j,it))/dxL+(z(i,j+1,it)+z(i,j-1,it)-
2*z(i,j,it))/Lame(j)
        omega(i,j,it)=omega(i,j,it)/Coriolis(j)
        if(omega(i,j,it)>0.1e-5) KOLI(i,j,iY)=KOLI(i,j,iY)+1
      enddo
    enddo
    it=it+1
  enddo !day
enddo !month
enddo !year
open(2,file='koli//Charmon(mon)'a.dat',form='unformatted',access='direct',recl=NX2*NY2)
it=1
do iY=Year0,YearN
write(2,rec=it) float(KOLI(2:NX1,2:NY1,iY))
it=it+1
enddo
close(2)
enddo !mo
stop
end

```

Скрипт, используемый для построения графиков за год в OpenGrads:

```

'open koliY.ctl'
'set grads off'
'set mpdset hires'
tt=1
while(tt<64)
'set t ' tt
'color -var ko -gxout shaded -kind rainbow'
'd ko'
'cbarn'
'q w2xy 30.0 60.0'
x2=subwrd(result,3)
y2=subwrd(result,6)

```

```
'set line 1'
'draw mark 9 ' x2 ' ' y2 ' 0.2'
'q time'
time=subwrd(result,3)
timeGOD=substr(time,9,4)
'draw title 'timeGOD
'printim risB500/'timeGOD'.png white'
tt=tt+1
c
endwhile
```

За месяц:

```
'open koliY.ctl'
'set grads off'
'set mpdset hires'
tt=1
while(tt<64)
'set t ' tt
'color -var ko -gxout shaded -kind rainbow'
'd ko'
'cbarn'
'q w2xy 30.0 60.0'
x2=subwrd(result,3)
y2=subwrd(result,6)
'set line 1'
'draw mark 9 ' x2 ' ' y2 ' 0.2'
'q time'
time=subwrd(result,3)
timeGOD=substr(time,9,4)
'draw title 'timeGOD
'printim risB500/'timeGOD'.png white'
tt=tt+1
c
endwhile
```

3.1 Анализ частоты случаев циклонических ситуаций на Северо-Западе России по полю приземного давления

На рисунке 3.1 представлена территория северо-запада России, а также прилегающие территории, которые также могут оказывать влияние на циклонические образования над территорией России, а именно: Скандинавский полуостров, Германия, Польша и Прибалтика.

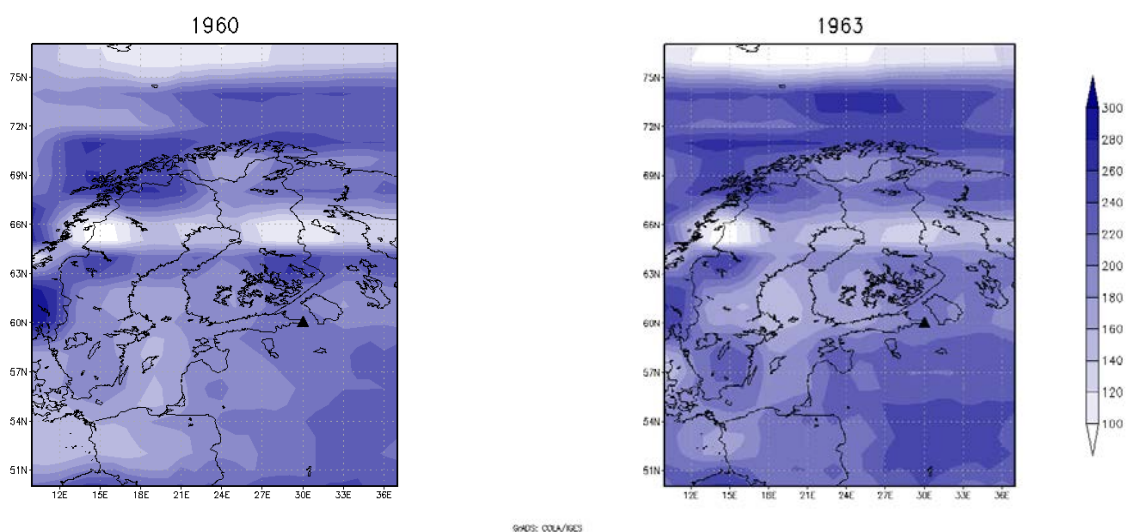


Рисунок 3.1 – Количество циклонических образований на уровне приземного давления за 1960 (левая панель) и 1963 год (правая панель).

Для начала рассмотрим частоту случаев циклонической активности по данным о приземном давлении (рисунок 3.1). В 1960-м году мы можем наблюдать увеличение циклонической активности в районе Петрозаводска, Норвегии. Более слабые очаги, это Мурманская область и, в целом, юго-запад выбранной территории. Важно отметить, что приземная карта схожа с уровнем 700 гПа (рисунок.3.6), но с некоторыми отличиями: Появляются новые очаги максимума циклонической активности – южное и северное побережье Норвегии.

Анализируя поля, представленные на рисунке 3.1, справа, можно заметить, что уровень приземного давления более стабилен во времени по циклонической активности. Об этом нам говорит идентичность наблюдаемой структуры за 1963 год. Из этого можно сделать вывод о том, что менее меняется количество мелких невысоких циклонов, а вот количество высоких циклонов, чья верхняя граница превышает уровень 700 гПа от 1960 к 1963 году изменилась более значительно. Также заметно, что увеличилась тенденция в Баренцевом и Норвежском море.

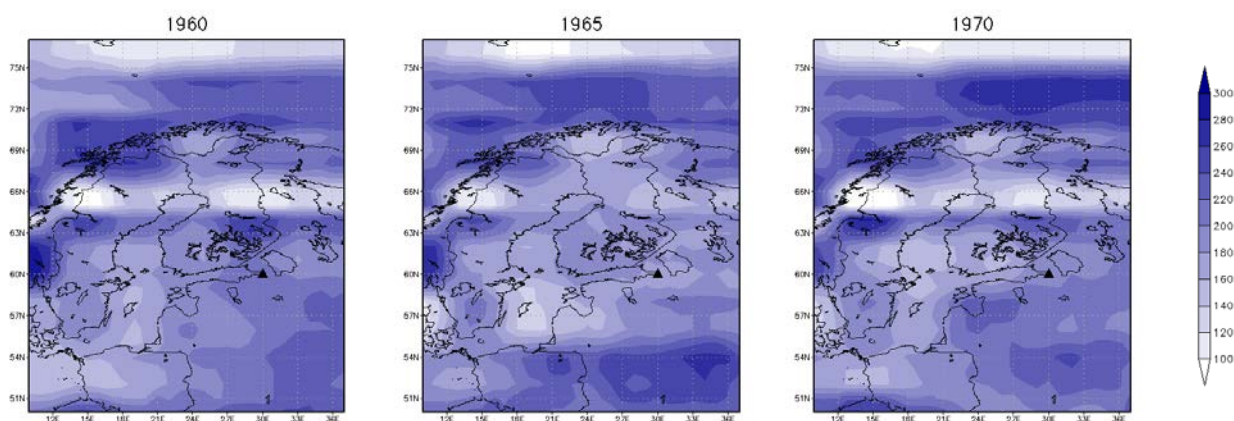


Рисунок 3.2 - карта количества циклонических образований на уровне приземного давления за 1960 (левая панель), 1965 (центральная панель) и 1970 год (правая панель).

На уровне приземного давления (рисунок 3.2), на протяжении десятилетия картина менее изменчива от 1960-го до 1970-го года. На всех трёх полях, представленных на рисунке 3.2, прослеживается полоса минимумов от 63-ей до 69-ой северной широты, а также выше 75-ой северной широты. Также можно увидеть постоянный максимум на юге Норвегии, и на юго-западе, выбранной территории во всех 3-х годах. На севере на водной поверхности также постоянно присутствует максимум циклонической активности, но оно изменчиво территориально (более восточнее или западнее, иногда центрально).

Например, в 1965 году максимум расположен более центрально, а в 1970-м году появляется некий максимум, расположенный в Баренцевом море, выше северного побережья Норвегии, и уходящий на восток между 72-ой и 75-ой северными широтами.

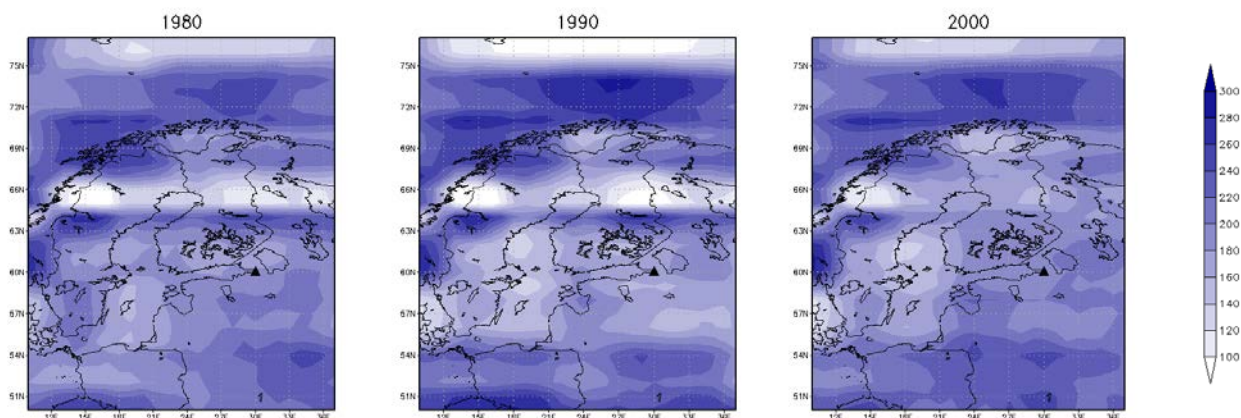


Рисунок 3.3 - карта количества циклонических образований на уровне приземного давления за 1980 (правая панель), 1990 (центральная панель) и 2000 год (правая панель).

На уровне приземного давления, в такие же года мы наблюдаем мало изменяющуюся картину во времени. Однако полоса минимумов в 2000 г не так выражена, как в предыдущие годы. Минимум фиксируется только на западе Норвегии. В 1980-ом, 1990-ом и 2000-м году максимум циклонической активности над водной поверхностью более централен, относительно анализируемой территории.

В 1980-ом году поле приземного давления повторяет структуру на уровне 700 гПа (рисунок 3.3). В 1990-ом и 2000-ом годах такой картины не наблюдается.

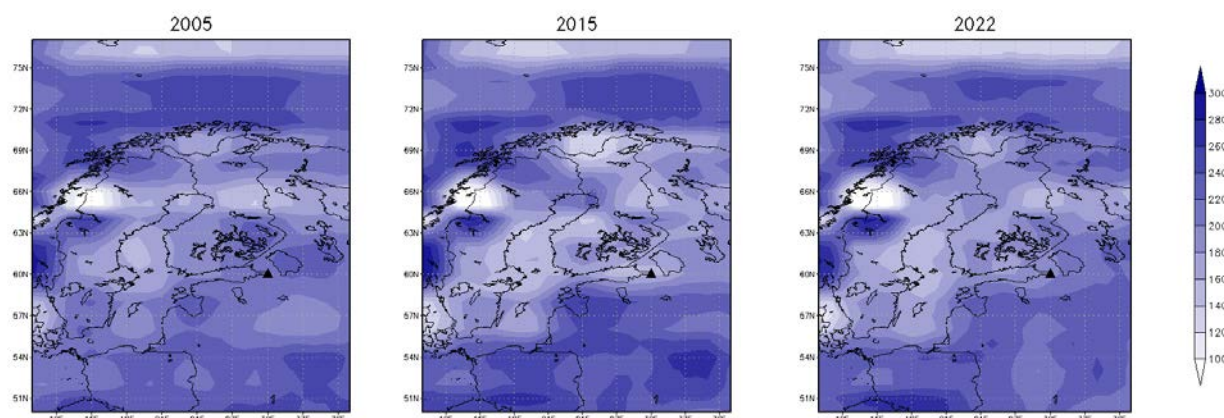


Рисунок 3.4 - карта количества циклонических образований на уровне приземного давления за 2005 (левая панель), 2015 (центральная панель) и 2022 год (правая панель).

На уровне приземного давления особо картина не менялась. Но есть некоторые отличия, которые также позволяют сказать о том, что количество циклонических образований увеличилось к 2005-ому году (рисунок 3.4), по сравнению с 1960-ым (рисунок 3.1). Минимумы стали менее выражены и локализованы, зоны максимумов углубились, и, в целом, по всей территории стало больше наблюдаться событий циклонической активности, централизованный, относительно наблюдаемой территории. Полосы минимумов уже не наблюдается, так как зона между 12 и 27 в.д. заполнилась небольшой циклонической активностью. Однако сохранились небольшие минимумы на побережье Норвегии и в районе Кандалакшского залива. Также стоит отметить минимум Ботнического залива во всех трех анализируемых годах (рисунок 3.4). Стоит отметить, что в Норвежском море и Баренцевом море фиксируется два максимума. В Баренцевом море активность центральна, относительно исследуемой территории, как и в предыдущих исследуемых годах.

Проанализировав данные у поверхности земли, можно заметить, что поля, в большинстве годов, идентичны и имеют похожую структуру, с определёнными зонами максимумов и минимумов циклонических образований.

Данные очаги незначительно перемещаются, относительно поверхности и изменяют свои значения на небольшие величины. Но в общем и целом, структура очень похожа. Рассмотрим её пример на рисунке количества циклонических образований на уровне давления на поверхности Земли, как наиболее выраженный год для циклонических образований.

Проанализируем отдельные года для уровня приземного давления, которые показали наиболее интересными, с наибольшими отличиям от общей картины распределения событий циклонических образований на исследуемой территории. Таким оказался 1975-ый год (рисунок 3.5), с наиболее выраженными минимумами и максимумами циклонических образований.

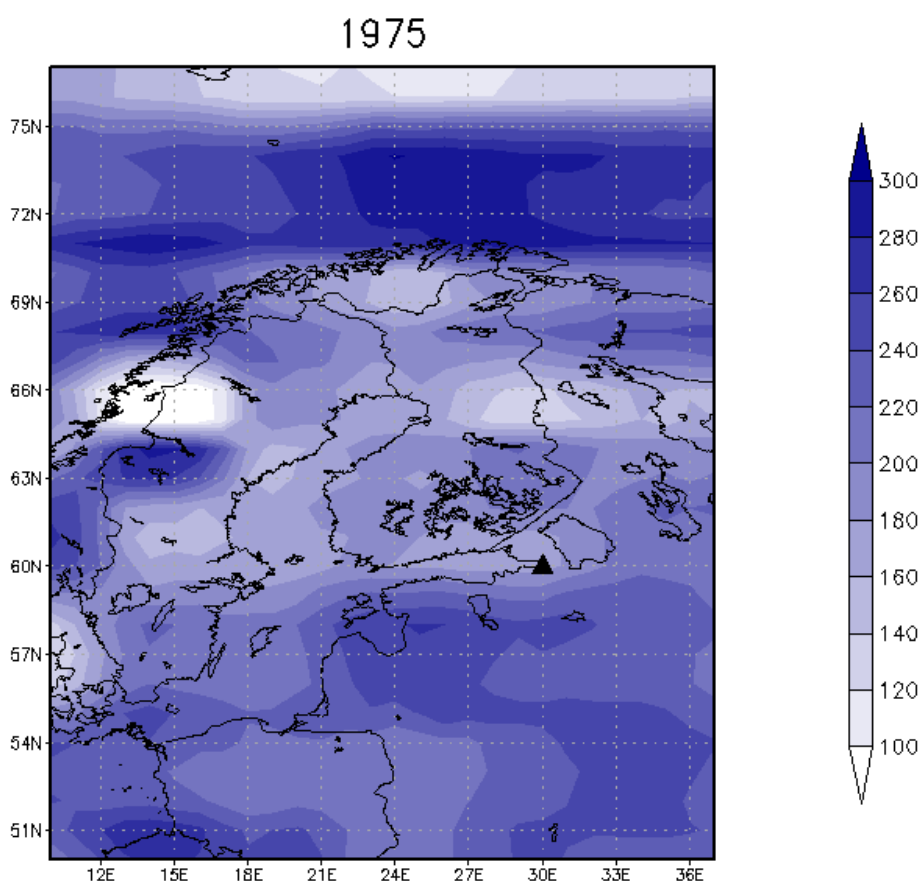


Рисунок 3.5 – карта количества циклонических образований на уровне приземного давления за 1975 год.

На рисунке 3.5 изображено поле, построенное для 1975-го года, как наиболее показательное. На нём можно увидеть некие зоны минимумов, которые почти сохраняются из года в год: в середине Норвегии и Швеции по 66-ой параллели, в середине Финляндии и Мурманской области, на той же параллели, и над Данией по 57-ой северной широте, аналогично в районе города Апатиты.

Также наблюдаются зоны максимумов: Чехия, Прибалтика, северное побережье Норвегии и середина Норвегии и Швеции по 63-ей, 64-ой широте, в Баренцевом и Норвежском море, на юго-востоке исследуемой территории (часть Европейской территории, Беларуси, Пскова и т.д).

Эти экстремумы сохраняются в большинстве лет, с некоторыми видоизменениями, и из-за того, что при построении карты на уровне приземного давления были учтены все циклоны, даже чей критерий завихренности меньше E_{MIN} , поэтому случаев достаточно много на протяжении года, и экстремумы выражены в одних и тех же местах, что может быть объяснимо топографическими особенностями, а также влиянием изобарической поверхности 700 гПа.

Дальше будут рассматриваться значения количества случаев циклонической активности для поверхности 700 гПа, 700 гПа и 500 гПа с учётом E_{MIN} , а также аномалии – отклонение от средне-климатических значений за весь период в месяцы январь и июль, потому что именно в эти месяцы ярко выражены режимные особенности циклонического образования.

3.2 Поверхность 700 гПа

На данных изображениях мы можем отслеживать, насколько часто встречается циклоническая активность в данном регионе на уровне 700 гПа. Красный цвет обозначает наиболее частое появление, тёмно-синий – наоборот, в этих местах циклоническая активность наблюдалась менее часто.

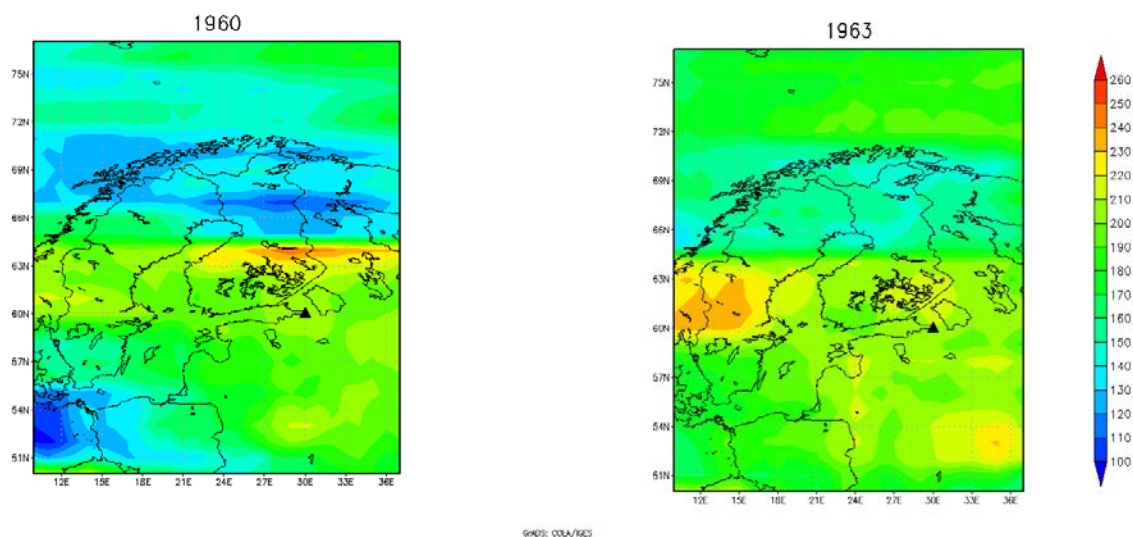


Рисунок 3.6 – карта количества циклонических образований на уровне 700 гПа за 1960 (левая панель) и 1963 год (правая панель).

Слева на рисунке 3.6 мы можем увидеть, что в 1960-м году наиболее часто циклонические образования встречались в середине территории Финляндии. С меньшей повторяемостью они наблюдались на территории северной Германии, со значением менее 100 случаев в год, и северной части Скандинавии и Карелии с Мурманской областью, где наблюдается ярко выраженный очаг минимума в северной части Финляндии, со значением от 100 до 110. Данное явление обусловлено тем, что на уровне 700 находится высотная фронтальная зона, вдоль которой перемещаются циклоны – наиболее частые случаи циклонических образований.

Когда циклонические образования выходят из границ из этой зоны, они начинают заполняться, а в последствии исчезать с нашего поля. Мы можем заметить это на рисунке – области минимума, которые сопровождают южнее и севернее зону максимумов.

Сравнивая поля рисунка 3.6, можно увидеть тенденцию к изменению уже в 1963-м году. На изображении нет явно выраженных минимумов циклонической активности на протяжении года. Зато можем увидеть новый максимум, расположенный в средней части Швеции и южной части Норвегии, со

значением от 230 до 240 случаев в данной местности. Это говорит о то, что инициативу в циклоническом образовании берёт на себя также высотная фронтальная зона.

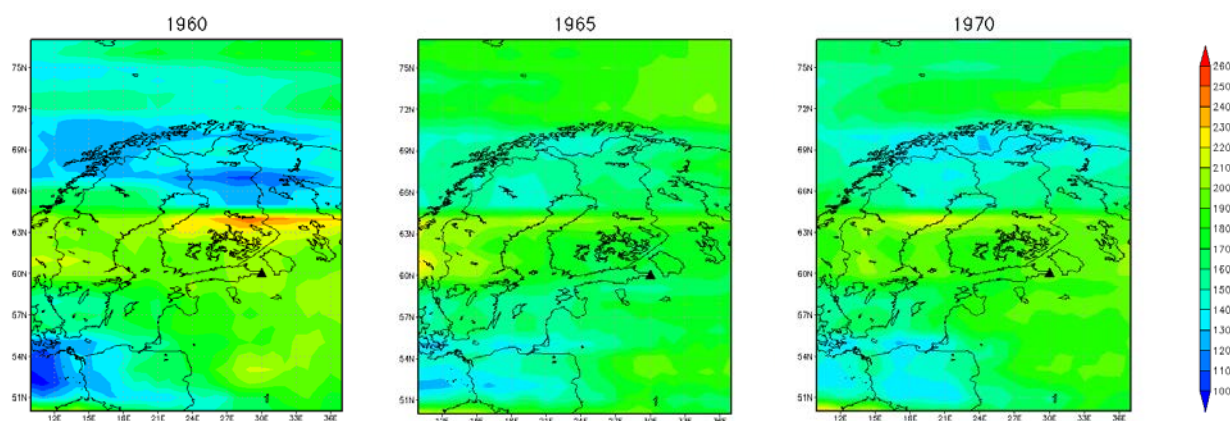


Рисунок 3.7 - карта количества циклонических образований на уровне 700 гПа за 1960 (левая панель), 1965 (центральная панель) и 1970 год (правая панель).

Рассматривая десятилетие с 1960 по 1970 (рисунок 3.7) можно наблюдать тенденцию к увеличению случаев циклонической активности на выбранной территории. Но пока прослеживается остаточная картина с 1960-го года: наблюдаются минимумы над территориями северной Германии и Польши, а также аналогичная полоса на севере Скандинавского полуострова, с небольшим очагом минимума в северной части Норвегии, варьирующимся от 120 до 130 случаев. Важно отметить, что к 1965 году циклоническая активность увеличилась над Мурманской областью на 100 случаев в год, но к 1970 году опустилась до 140-190 случаев в год.

В целом, поле стало более однородно. Значения повторяемости циклонической активности варьируются от 120 до 210 случаев в год на всей выбранной территории.

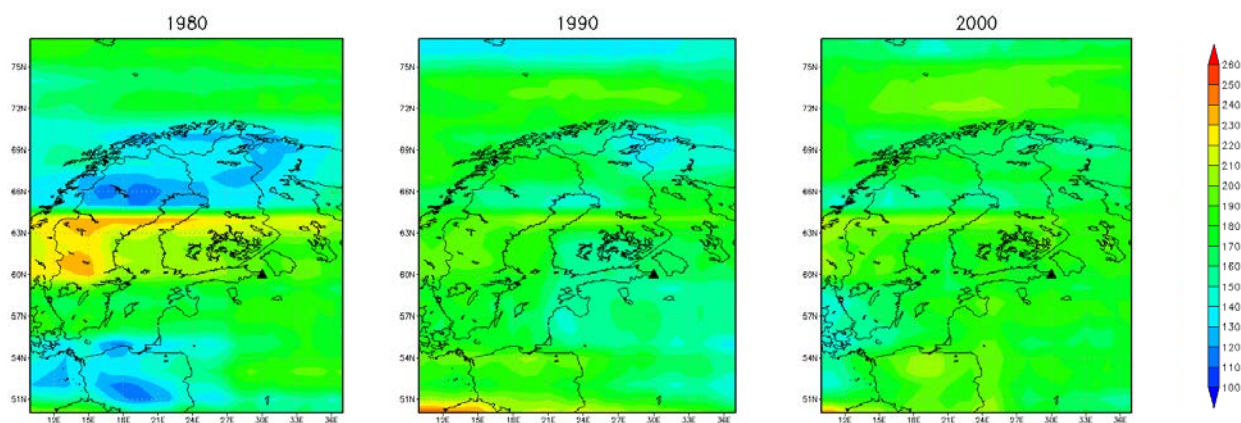


Рисунок 3.8 - карта количества циклонических образований на уровне 700 гПа за 1980 (левая панель), 1990 (центральная панель) и 2000 год (правая панель).

В 1980-м году (рисунок 3.8) мы наблюдаем снова несколько минимумов циклонической активности между 64-ой и 71-ой параллелью, а также над территорией Польши в диапазоне 110-120 случаев. Также, появилась зона максимума в центральной Швеции, значение которой от 110 до 120 событий. По остальной же территории прослеживается стабильная ситуация, варьирующая от 170 до 190 случаев в год.

К 1990-му году поле снова становится однородным с небольшим минимумом на территории Кольского полуострова со значением от 130 до 140 случаев циклонической активности.

В 2000-м году поле однородно, со значениями от 140 до 210.

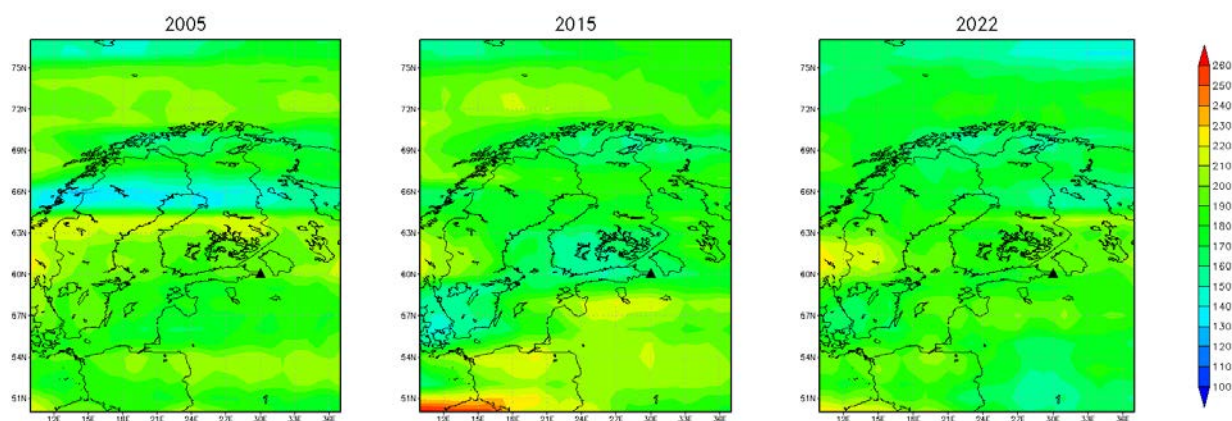


Рисунок 3.9 - карта количества циклонических образований на уровне 700 гПа за 2005 (левая панель), 2015 (центральная панель) и 2022 год (правая панель).

В 2005-ом году (рисунок 3.9) снова наблюдаем ту же самую полосу минимума по 66-ой параллели со значениями от 130 до 140 событий. Но в 2015-ом и 2022-ом такой полосы не наблюдается. Исходя из этого, можно сказать, что с 1960-ого по 2015-ый увеличилось количество циклонической активности на данной территории.

Поле стало стационарным без ярко выраженных максимумов и минимумов. Однако, можно заметить максимум на юго-западе, но данная территория уже выходит за рамки исследуемой.

Рассмотрим отдельные случаи, где наиболее выражены минимумы и максимумы. Это 1960-ый, 1970-ый, 1975-ый, 1976-ой и 1980-ый.

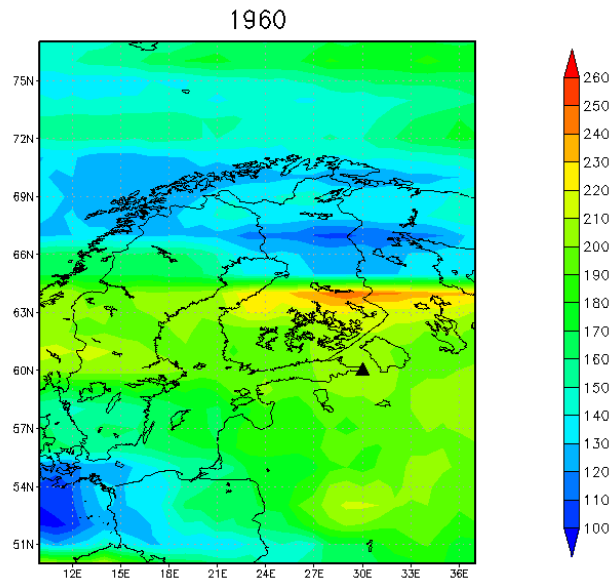


Рисунок 3.10 - карта количества циклонических образований на уровне 700 гПа за 1960 год.

На рисунке 3.10 мы можем чётко выделить области, где наблюдаются явные минимумы и максимумы. В середине территории Финляндии со значениями от 250 до 280 случаев. На территории северной Германии менее 100 случаев в год, и северной части Скандинавии и Карелии с Мурманской областью наблюдается ярко выраженный очаг минимума в северной части Финляндии, со значением от 100 до 110. Максимум же со значением 260 случаев в год наблюдается между 63-65 с. ш. и 24-36 в. д.

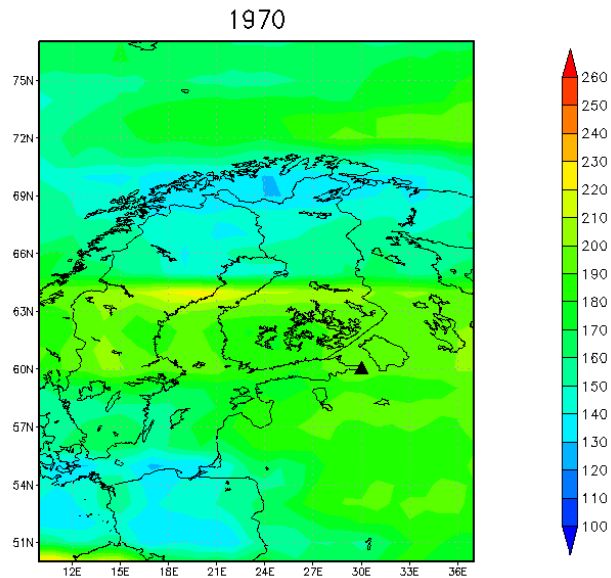


Рисунок 3.11 - карта количества циклонических образований на уровне 700 гПа за 1970 год.

На этом рисунке 3.11 обнаружены 2 минимума на севере Норвегии, со значениями от 120 до 130. И на территории Польши со значениями от 120 до 130. Остальная же территория однородна со значениями 170-200 случаев в год. Фиксируется также небольшой максимум (220-230 случаев в год) по 64 с. ш. над Ботаническим заливом.

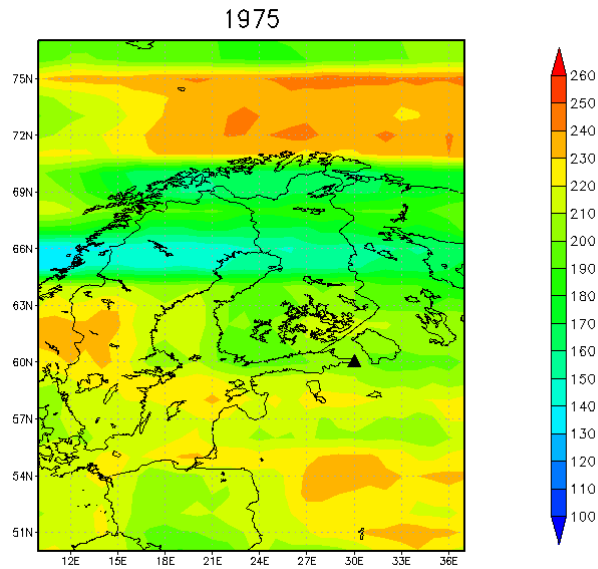


Рисунок 3.12 - карта количества циклонических образований на уровне 700 гПа за 1975 год.

По сравнению с предыдущими анализируемыми годами 1975 год является более выраженным по максимальной частоте циклонов. На рисунке 3.12 фиксируются следующие очаги максимума: Баренцево и Норвежское моря, со значениями от 240 до 250, южная часть Норвегии со значениями от 230 до 240, и на территории Смоленской области со значениями от 230 до 240 случаев. Максимум в Баренцевом море является достаточно протяженным, охватывая территорию с 72-75 с. ш. по 15-36 в. д.

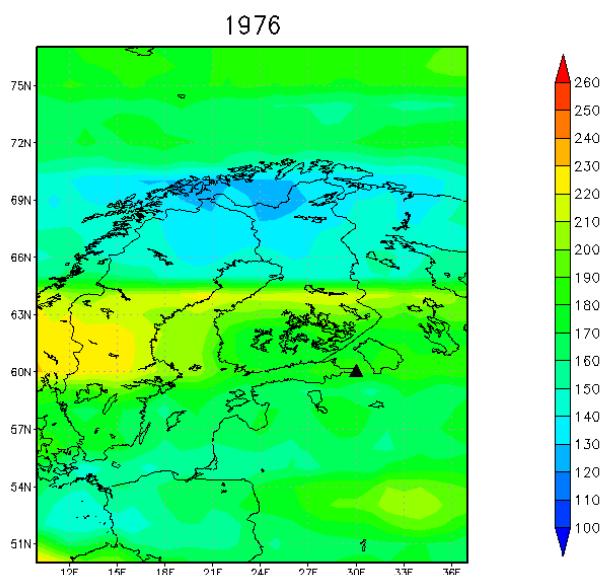


Рисунок 3.13 - карта количества циклонических образований на уровне 700 гПа за 1976 год.

На данном рисунке 3.13 ярко выражен минимум на территории северного побережья Норвегии со значениями от 120 до 130. Максимум со значением 220-230 случаев в год, как и в 1970 году фиксируется по 64 с. ш.. Аналогичная частотой циклонов наблюдается еще на юге Норвегии и Швеции. По остальной же территории поле однородно от 170 до 200 случаев в год.

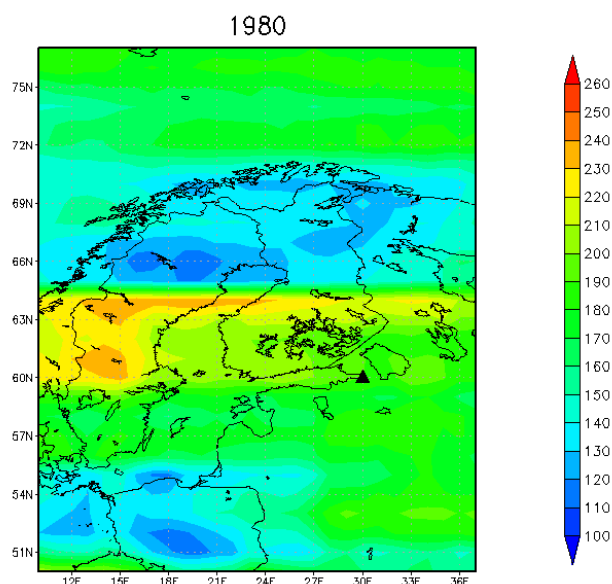


Рисунок 3.14 - карта количества циклонических образований на уровне 700 гПа за 1980 год.

На этом рисунке 3.14 мы наблюдаем несколько минимумов: полоса между 64-ой и 72-ой параллелью, с центром на территории северной Швеции, со значениями от 110 до 120; а также на территории Польши и Германии, также с минимальным значением от 110 до 120.

Также наблюдается небольшая зона максимума по 64-ой параллели, как в 1976-ом году, но с большей частотой от 230 до 240 случаев в год.

Исходя из этого, можно заметить, что области минимумов случаев циклонического образования часто наблюдаются в северной части Скандинавии, Кольского полуострова и на территории Польши и Германии. А зоны максимумов чаще всего вдоль 64-ой параллели, а также в западной части России.

3.3 Поверхность 700 гПа с учётом минимального критерия завихренности E_{MIN} .

На следующих рисунках изображена изобарическая поверхность 700 гПа с учётом минимального критерия завихренности E_{MIN} для замкнутых

изобарических систем, что позволяет отсеять и не учитывать в исследовании неинтенсивные и слабо выраженные циклонические образования.

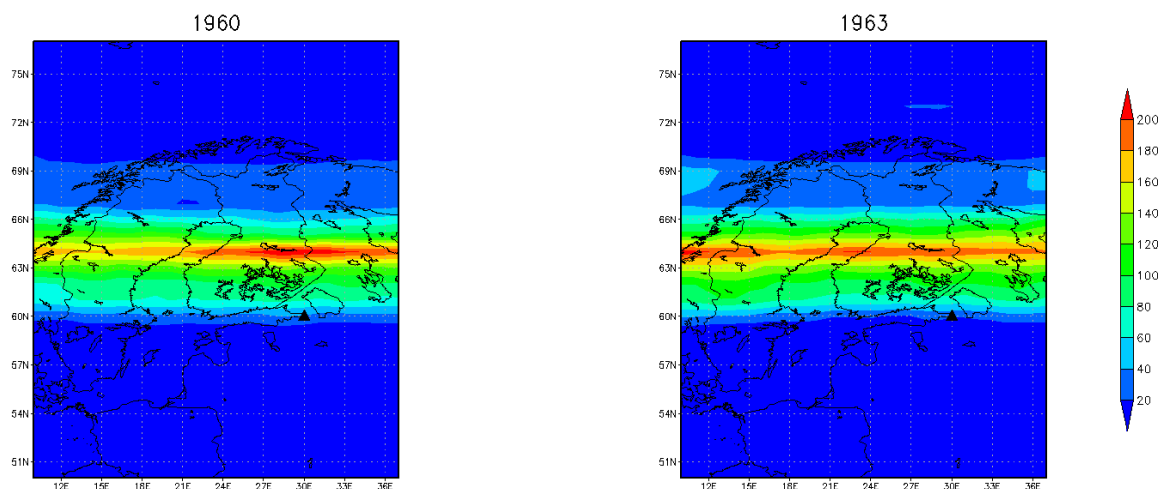


Рисунок 3.15 – карта количества циклонических образований на уровне 700 гПа с учётом минимального критерия завихренности за 1960 (левая панель) и 1963 год (правая панель).

Отсеяв малозначащие циклонические образования, которые не превосходят минимальное значение критерия завихренности, мы получаем совершенно иную картину, по которой видно, из рисунка 3.15, что наибольшее количество случаев мощной и интенсивной циклонической активности наблюдается в полосе от 60° северной широты, до 66° северной широты. Данное расположение совпадает с расположением высотной фронтальной зоны, где на середину полосы приходится максимум значений - более 200 случаев в год, далее в сторону севера и юга идет на спад до 20 случаев в год и ниже.

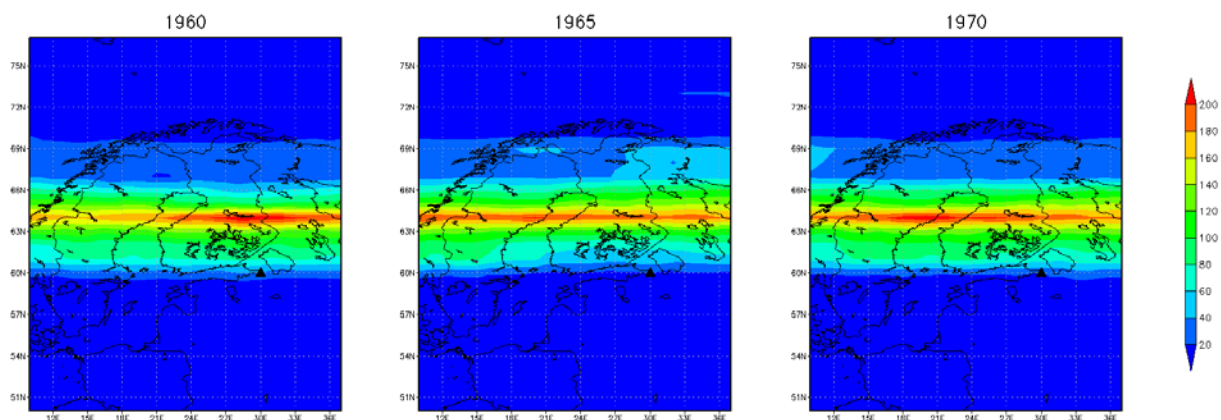


Рисунок 3.16 – карта количества циклонических образований на уровне 700 гПа с учётом минимального критерия завихренности за 1960 (левая панель), 1965 (центральная панель) и 1970 год (правая панель).

Очень похожая картина наблюдается в 1965-м году и 1970-ом (рисунок 3.16). Только меняются значения полосы максимумов на картах, которое варьируется от от 160 и более 200. Сравнивая 1960 год с 1965 г. и 1970 г. заметно, что в 1960 году полоса максимумов слабо выражена над территорией Норвегии и Швеции.

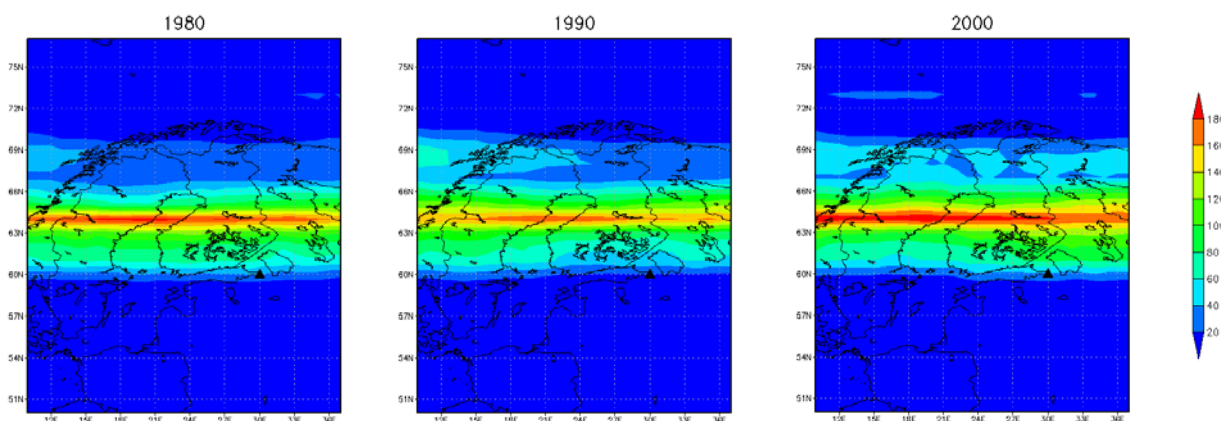


Рисунок 3.17 – карта количества циклонических образований на уровне 700 гПа с учётом минимального критерия завихренности за 1980 (левая панель), 1990 (центральная панель) и 2000 год (правая панель).

На данных изображениях (рисунок 3.17) аналогичная картина, но в 200-ом году полоса максимума выражена более ярко, и значения переваливают за 200 случаев. А в 1990 году полоса менее выражена по сравнению с другими анализируемыми годами

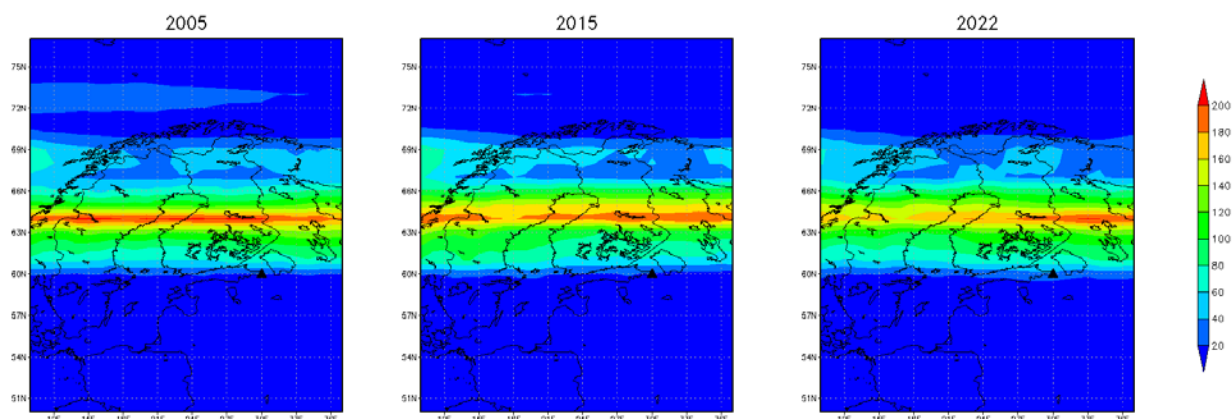


Рисунок 3.18 – карта количества циклонических образований на уровне 700 гПа с учётом минимального критерия завихренности за 2005 (левая панель), 2015 (центральная панель) и 2022 год (правая панель).

На рисунке 3.18 нам представлены 3 года. В 2005-ом прослеживается аналогичная структура, а вот в 2015-м году случаев уже немного меньше, что сказывается на выделении зоны максимума. В 2022-ом году полоса с учащённым появлением циклонических образований практически однородна, и значения на большей территории не превосходят 160 случаев. Важно отметить, что частота уменьшается в большей степени на территории Норвегии и Швеции, а вот на территории России она остается прежней, как территориально, так и по количеству.

Рассмотрим некоторые года с наиболее отличающимися структурами на поверхности 700 гПа. Данные года представлены ниже.

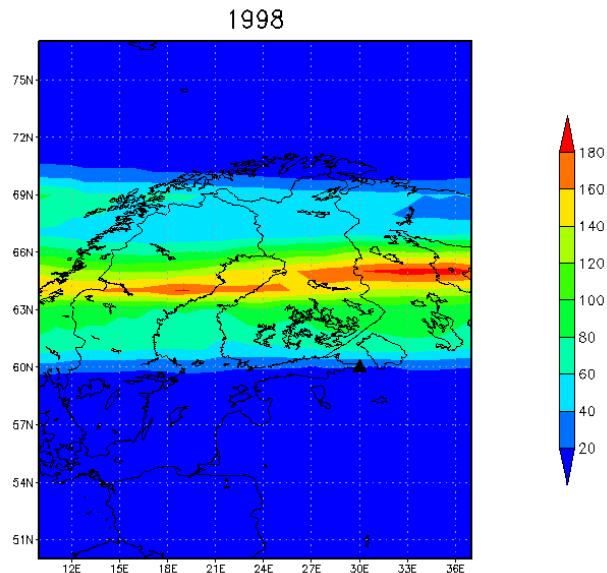


Рисунок 3.19 - карта количества циклонических образований на уровне 700 гПа с учётом минимального критерия завихренности за 1998 год.

В этот год (рисунок 3.19) наблюдается повышенная циклоническая активность, о чём нам говорит широкая полоса значений, которые больше 180, но, при этом, появилась широкая область, севернее полосы максимума, значения которой варьируются от 40 до 60 событий между 63 и 66 с. ш.

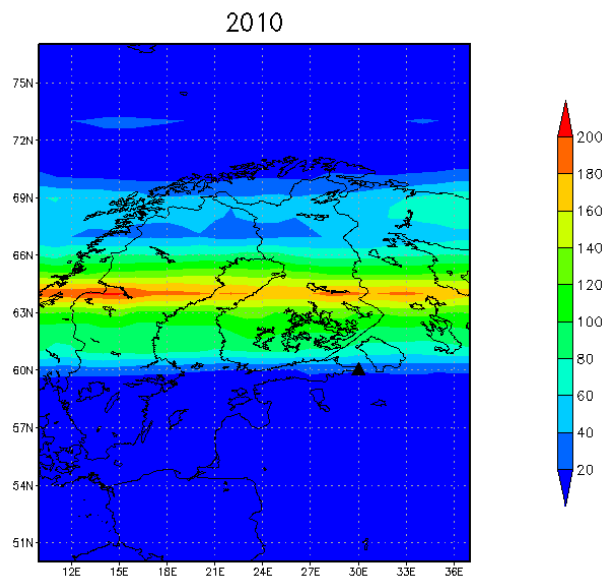


Рисунок 3.20 - карта количества циклонических образований на уровне 700 гПа с учётом минимального критерия завихренности за 2010 год.

В 2010-ом году (рисунок 3.20) наблюдалась одна из меньших циклонических активностей, о чём нам говорит слабо выраженная полоса с высокими значениями. В данном случае она более выражена над территорией Норвегии и Швеции, а менее над Россией, т. е. противоположный случай 2022 г. (рисунок 3.18).

3.4 Поверхность 500 гПа с учётом критерия минимальной завихренности E_{MIN} .

Далее рассмотрим, как изменялось поле на высоте 500 гПа за те же самые года, для полноты картины оценки циклонической активности на выбранной территории.

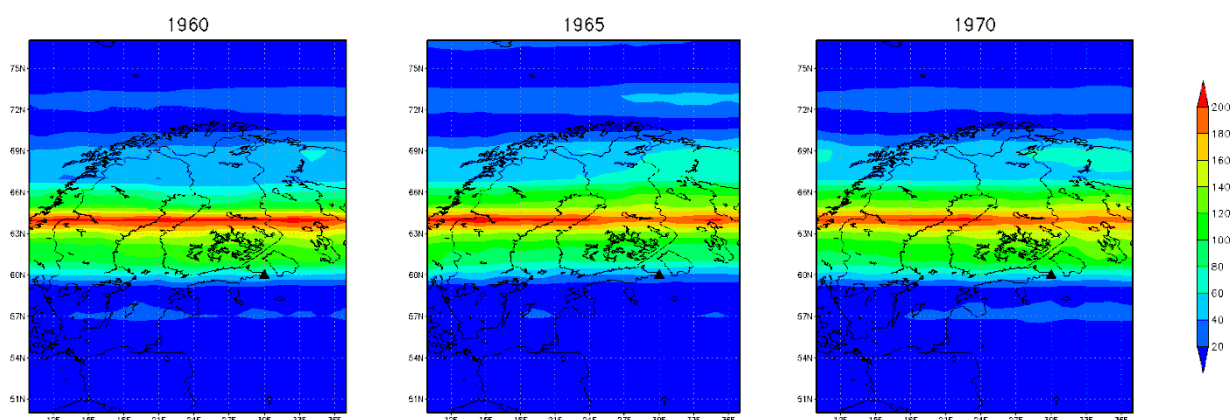


Рисунок 3.21 - карта количества циклонических образований на уровне 500 гПа с учётом минимального критерия завихренности за 1960, 1965 и 1970 год.

На рисунке 3.21 наблюдается стационарность на протяжении всего рассматриваемого промежутка времени с 1960-го по 2022-ой год. Ярко выраженная полоса максимума событий на высоте 500 гПа между 60-ой и 66-ой параллелью, а именно пик приходится на 64-ую широту. Именно в этом ме-

сте находится высотная фронтальная зона, вдоль которой и перемещаются циклонические образования.

Где отмечено красным – там проходит наибольшее количество мощных и интенсивных циклонических образований. И эта ситуация незначительно отличается от года к году.

Ниже 60-ой широты случаев с циклоническими образованиями не составляло менее 20. Также и выше 70-ой широты их количество не превышало данное значение.

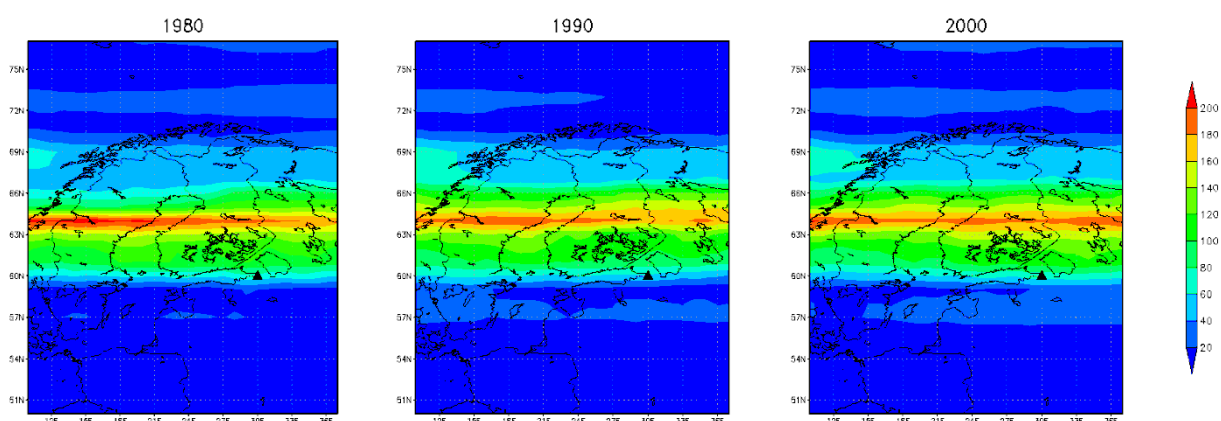


Рисунок 3.22 - карта количества циклонических образований на уровне 500 гПа с учётом минимального критерия завихренности за 1980, 1990 и 2000 год.

На рисунке 3.22 видно, что по краям от зоны максимума, располагается однородное поле синего цвета – зона, где происходит наименьшее количество циклонических образований. В этой зоне они либо заполняются, либо уже слабо выражены из-за критерия E_{MIN} , благодаря которому неинтенсивные и маленькие циклоны на данные рисунки не попадают и не анализируются.

В 1980-ом году наибольшее количество наблюдалось в середине Швеции и Норвегии, со значением более 200. В остальной зоне данное зна-

чение не превышало. В 1990 году максимум над Российской территорией достигает 190 случаев в год, а над Норвегией и Швецией уже более 200 случаев в год.

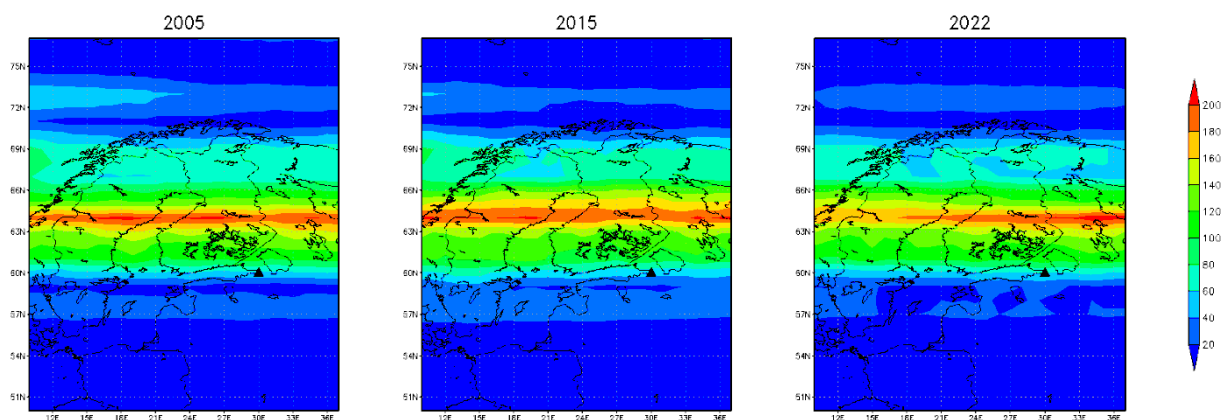


Рисунок 3.23 - карта количества циклонических образований на уровне 500 гПа с учётом минимального критерия завихренности за 2005, 2015 и 2022 год.

К 2005-ому году (рисунок 3.23) мы наблюдаем тот же самый сценарий, что и годами ранее. Можно сделать вывод, что на высоте 500 гПа значительных изменений во времени по количеству идентификации циклонических образований, которые превышают критерий завихренности E_{MIN} , в данном регионе не происходит и варьируется в одном и том же диапазоне, что и в прошлые годы.

Можно заметить, что в 2005-ом году появилась некая полоса, где значения превысили 200, что означает, что в данный год встречалось наибольшее количество случаев.

А также в 2022-ом году, в районе Архангельска наблюдался максимум событий с циклоническим образованием, который превышает значение 200. Это означает, что эти года были более интенсивные для циклонического образования.

Анализ поля на высоте 500 гПа показал, что существенного отличия на протяжении всего рассматриваемого периода времени не наблюдается, поэтому результаты на этой высоте можно не учитывать.

Некоторые отличия: полоса максимума случаев циклонического образования от года к году незначительно перемещается от севера к югу и наоборот, изменяется её ширина на несущественные и малозаметные значения, очаги максимумов, которые превышают значение 200 меняют своё местоположение, но всегда остаются в районе 64-ой широты.

Единственный год, интересный для данного исследования, это 2017-ый, который представлен на рисунке 3.24.

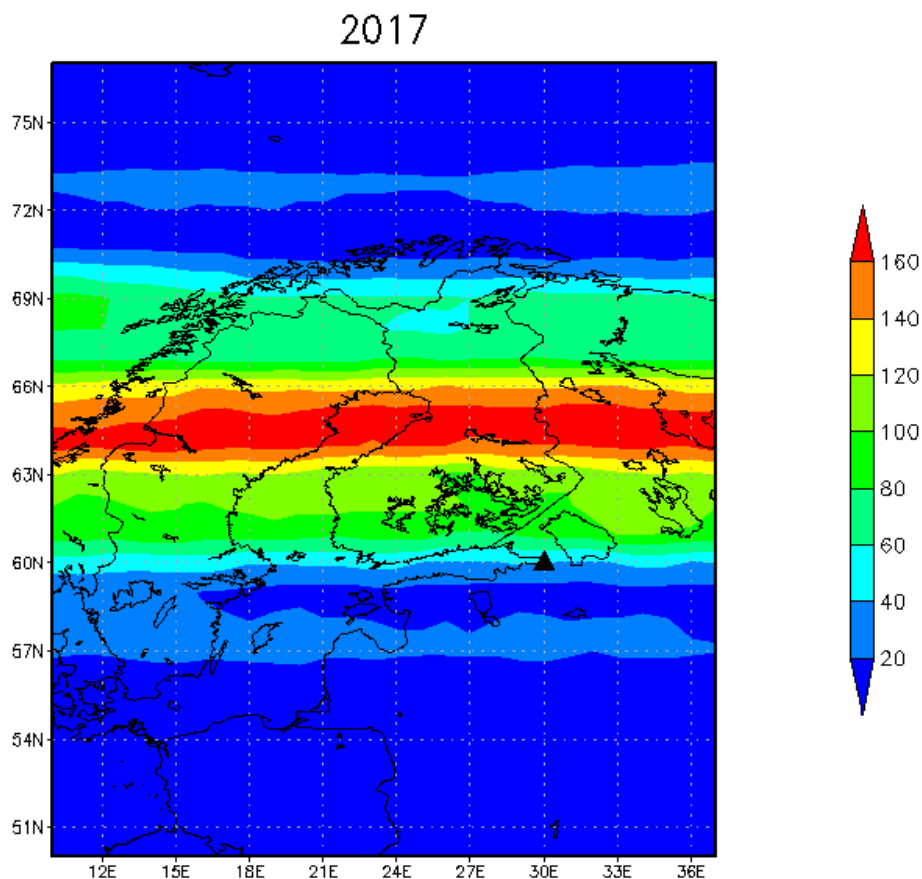


Рисунок 3.24 - карта количества циклонических образований на уровне 500 гПа с учётом минимального критерия завихренности за 2017 год.

На рисунке 3.24 представлена полоса максимумов, которая не встречалась ни в одном году рассматриваемого периода. Она имеет достаточно большую ширину от 63-ей, до 66-ой параллели (порядка 3° широты) и имеет значение, превышающее 200, на всём протяжении с запада на восток. Этот рисунок показывает нам, что в 2017-ом году наблюдалась наибольшая активность циклонических образований, которые были достаточно мощные и с долгой продолжительностью жизни, что как раз и формирует такую структуру поля.

3.5 Аномалии количества циклонических образований на высоте 700 гПа для января и июля за период с 1960-го по 2022-ой год

Рассмотрим тенденцию аномалий в январе с 1960-го по 2022-ой год.

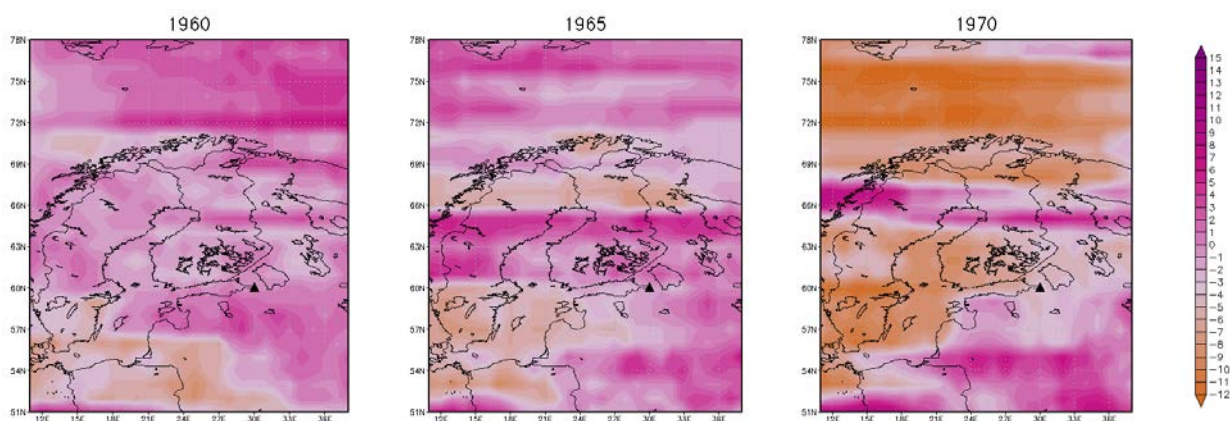


Рисунок 3.25 - карта аномалий количества циклонических образований на уровне 700 гПа с учётом минимального критерия завихренности за январь 1960, 1965 и 1970 года.

На данном рисунке 3.25 прослеживается увеличение циклонической активности больших и интенсивных циклонов со временем (с 1960-го по 1970-ый г.) в некоторых регионах, например, вдоль 66-ой широты. Но южнее и севернее наблюдаются минимумы.

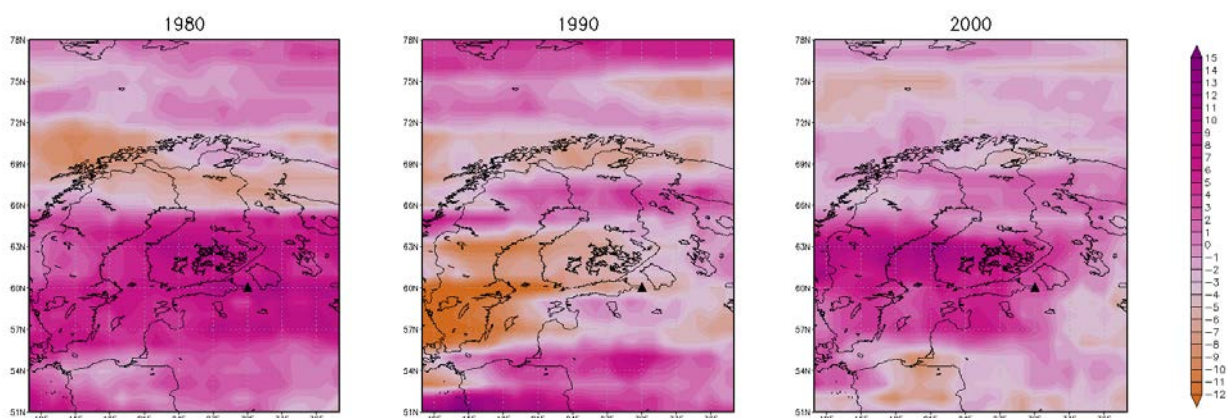


Рисунок 3.26 - карта аномалий количества циклонических образований на уровне 700 гПа с учётом минимального критерия завихренности за январь 1980, 1990 и 2000 года.

На рисунке 3.26 в 1980-м году южная часть, ниже 66-ой параллели показывает завышенные значения аномалии, что говорит нам о том, что в этот год в январе наблюдалось больше циклонических ситуаций, чем обычно. А выше 66-ой широты, наоборот меньше обычного.

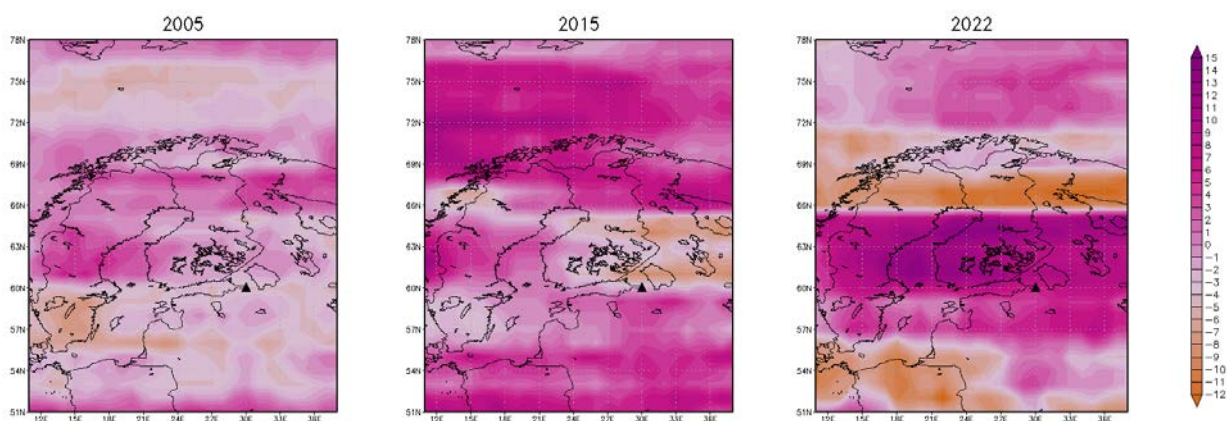


Рисунок 3.26 – карта аномалий количества циклонических образований на уровне 700 гПа с учётом минимального критерия завихренности за январь 2005, 2015 и 2022 года.

К 2005 (рисунок 3.26) году поле существенно меняется, и мы можем наблюдать, как отрицательные отклонения появляются уже на большинстве территорий северо-запада России и Скандинавии, с небольшими проявлениями положительных отклонений. Это нам говорит о том, что в этот год циклоническая активность достаточно слабо себя проявляла в январе данного года.

Но в 2015 году в январе наблюдалось настолько много циклонических образований, что на рисунке преобладают розовый и фиолетовые цвета. Наблюдается небольшой очаг отрицательного отклонения на территории Ленинградской, Мурманской областей и республики Карелии.

В январе 2022 года мы можем наблюдать, что наше рассматриваемое поле поделилось на несколько чётких линий вдоль широт: зона с завышенными аномалиями, заниженными, завышенными, заниженными. Наибольшее отклонение в положительную сторону наблюдалось между 66 и 67 параллелями.

Также посмотрим тенденцию аномалий в июле с 1960 по 2022 год.

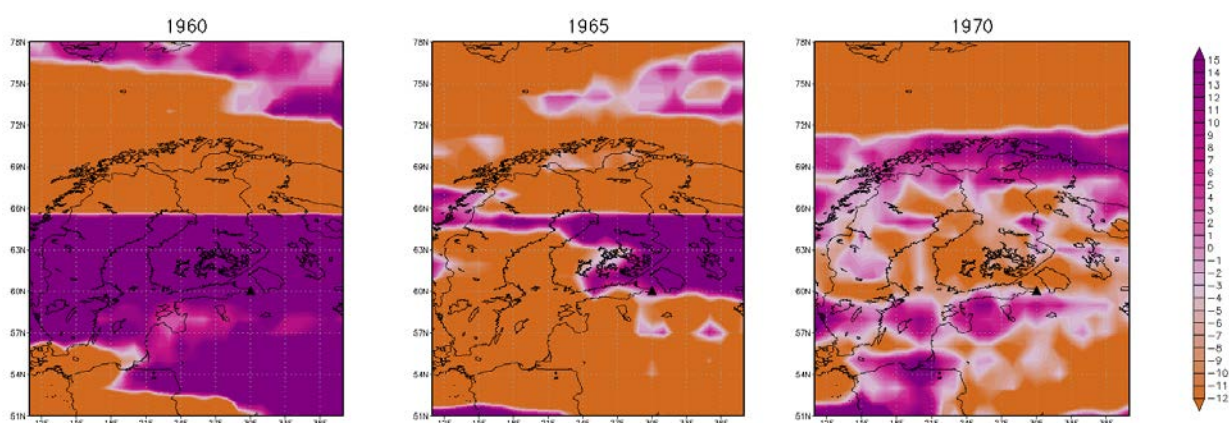


Рисунок 3.28 – карта аномалий количества циклонических образований на уровне 700 гПа с учётом минимального критерия завихренности за июль 1960, 1965 и 1970 года.

На данном рисунке 3.28 можно заметить, что картина июльского месяца от января 1960 года значительно отличается.

В 1960 году всё, что выше 66-ой широты уходит в отрицательные отклонения, а всё, что ниже – в положительные, кроме территории Польши и Германии, где наблюдаются отрицательные.

В 1970 году картина неоднозначная, которая показывает неоднородное распределение аномалий, поэтому мы видим разбросанные очаги отрицательных и положительных отклонений, из чего может следовать, что ситуация в июле данного года показывает разнохарактерность летнего периода, т.е. в северной части выше 72-ой широты наблюдаются отрицательные отклонения, а на всей остальной территории значения скачут от положительных к отрицательным.

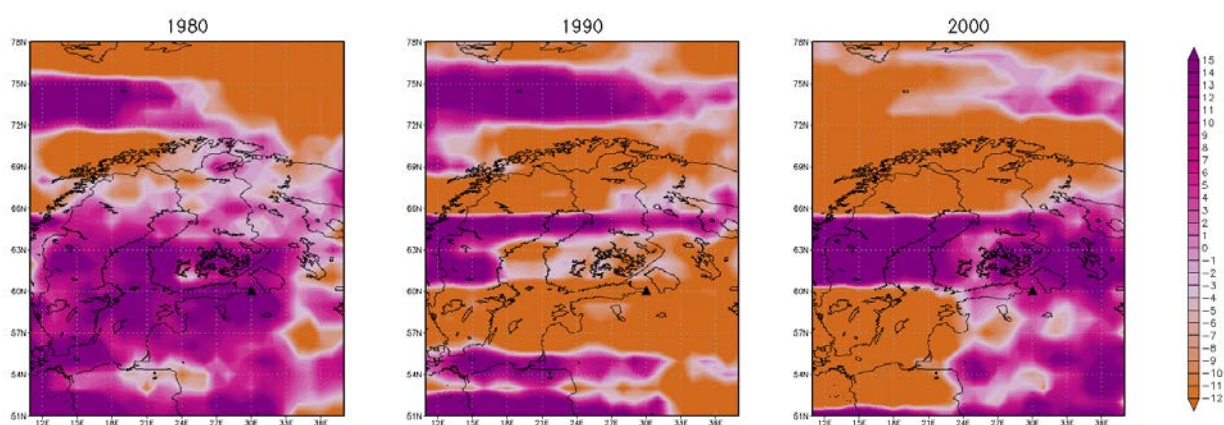


Рисунок 3.29 - карта аномалий количества циклонических образований на уровне 700 гПа с учётом минимального критерия завихренности за июль 1980, 1990 и 2000 года.

На рисунке 3.29 изображены аномалии 1980, 1990 и 2000 годов, которые показывают нам, что в эти года была повышенная циклоническая активность по 64-ой параллель, но при этом наблюдались отрицательные значения южнее и севернее этой широты.

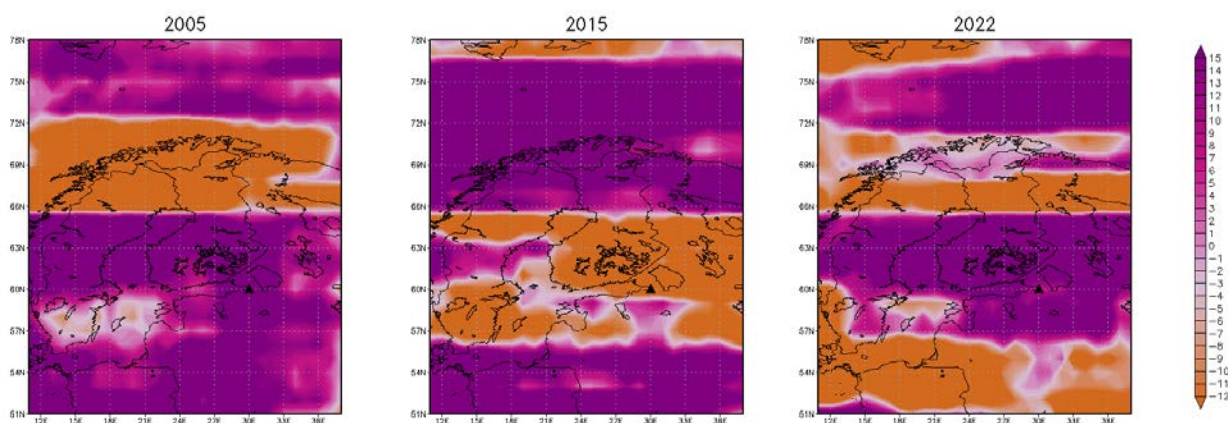


Рисунок 3.30 - карта аномалий количества циклонических образований на уровне 700 гПа с учётом минимального критерия завихренности за июль 2005, 2015 и 2022 года.

На данном рисунке 3.30 можно увидеть, что в 2005 году была повышенная циклоническая активность южнее 66-ой широты, о чём нам говорит фиолетовый цвет. А севернее этой широты наоборот была пониженной, в сравнении со средним-климатическим.

Но в 2015 году мы наблюдаем противоположную картину, когда у нас в северной части стало больше циклонических образований, а в южной – меньше.

Исследуя июль 2022 года, можно также заметить, что преобладали циклонические образования в центральной части поля.

3.6 Анализ данных

Рассмотрим данные ситуации на поверхности 700, и 500 гПа.

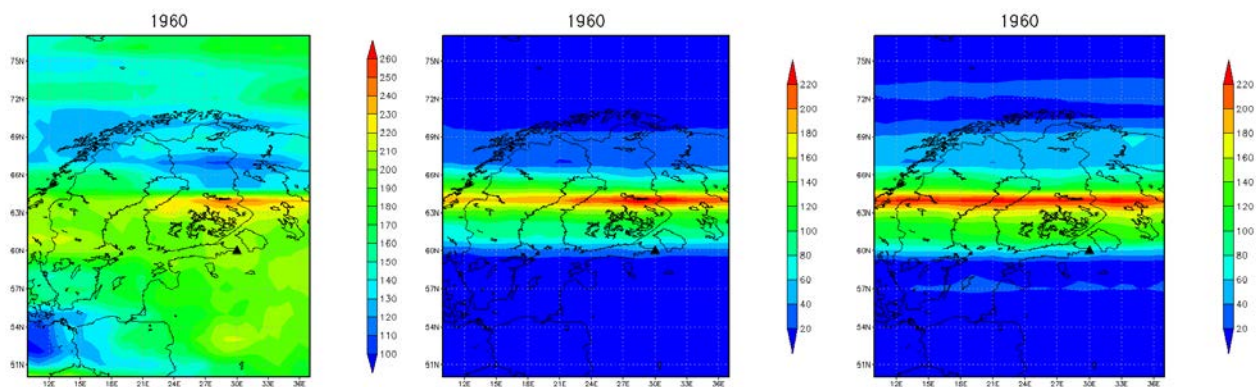


Рисунок 3.31 - карта количества циклонических образований на уровне 700 гПа, 700 гПа и 500 гПа с учётом минимального критерия завихренности за 1960 год.

На данном рисунке 3.31 изображена поверхность 700 гПа со всеми циклоническими ситуациями, поверхность 700 гПа и 500 гПа с $E_{\text{MIN}} = 2,6 \cdot 10^{-5} \text{ c}^{-1}$, что позволяет отсеивать небольшие циклонические образования с маленькой интенсивностью за 1960 год.

Можно заметить, что на уровне 700 гПа прослеживается область с наибольшим количеством ситуаций с циклоническими образованиями в середине Финляндии между 64-ой и 66-ой широтой. С критерием больше E_{MIN} для 700 гПа можем заметить чёткую линию максимума между 60-ой и 69-ой широтой, о чём говорит, что в той области встречается наибольшее количество больших и интенсивных циклонов. Также прослеживается, что наибольшая доля на все циклонические события на уровне 700 гПа без учёта критерия E_{MIN} приходится как раз на циклоны с большой интенсивностью и глубиной.

Также это подтверждает поверхность 500 гПа, где также учитывается критерий E_{MIN} . На этой поверхности также отчётливо прослеживается линия с наиболее частыми случаями.

Такая картина обусловлена высотной фронтальной зоной.

Рассмотрим также уровень приземного давления вместе с высотой 500 гПа и получим связи циклонических образований без учёта E_{MIN} у поверхности земли и интенсивных циклонических образований на уровне 500 гПа за 1960 год.

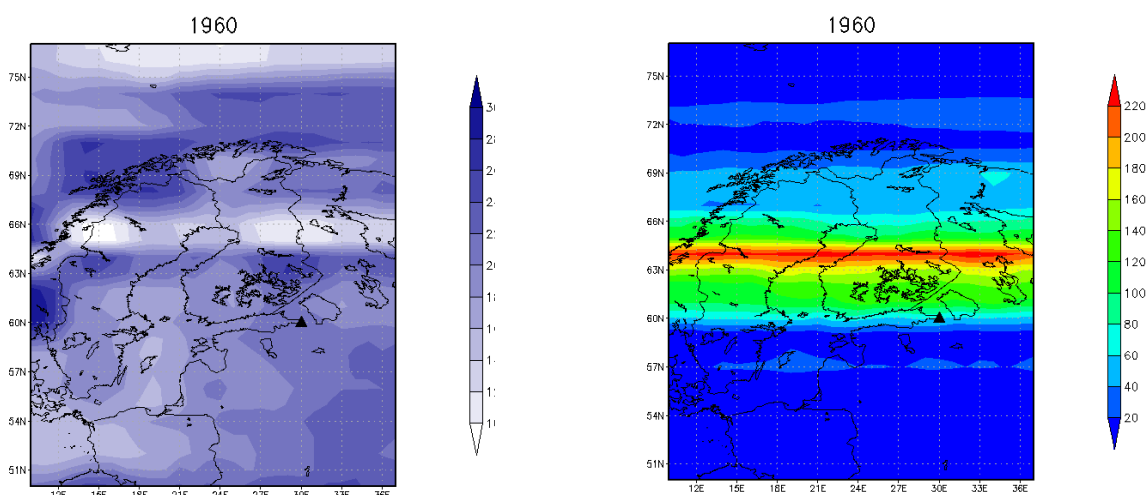


Рисунок 3.32 - карта количества циклонических образований на уровне приземного давления и 500 гПа с учётом минимального критерия завихренности за 1960 год.

На рисунке 3.32 мы получаем отклики высотной фронтальной зоны с уровнем приземного давления. Аналогичная структура: выраженная зона максимумов сопровождается соседствующими зонами минимумов.

Также, для данного периода были рассчитаны аномалии по месяцам. Аномалии рассчитывались, как разница между средне-климатическим за месяц и данными за этот месяц в текущий год. Построены изображения с аномалиями, где оранжевый – это отрицательное отклонение, а фиолетовый – положительное отклонение случаев циклонических образований на данной территории.

На следующем рисунке представлены аномалии с критерием завихренности больше $E_{\text{MIN}} = 2,6 \cdot 10^{-5} \text{ c}^{-1}$ за январь 1960 года и количество циклонических образований на поверхности 700 гПа.

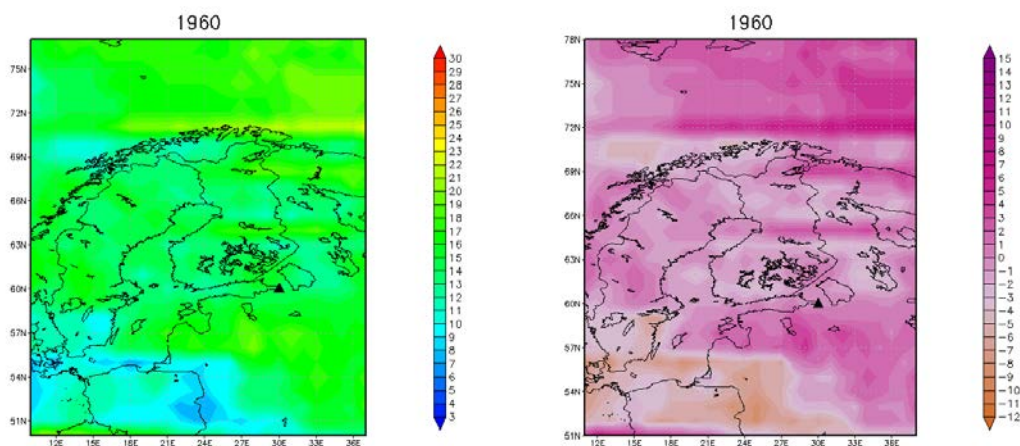


Рисунок 3.33 - карта количества циклонических образований на уровне 700 гПа и аномалий за январь 1960 года с учётом минимального критерия завихренности.

На данном рисунке 3.33 можем наблюдать, как очертания контуров с отрицательной аномалией повторяют контуры минимумов на поле общего количества за этот год. Из этого следует, что в данном году значения занижены, относительно средне-климатического значения. Значит, в этот год наблюдалось не так много больших и интенсивных циклонических образований.

Рассмотрим ситуацию в январе 1962 и 1963 года, а также аномалии для этих же лет.

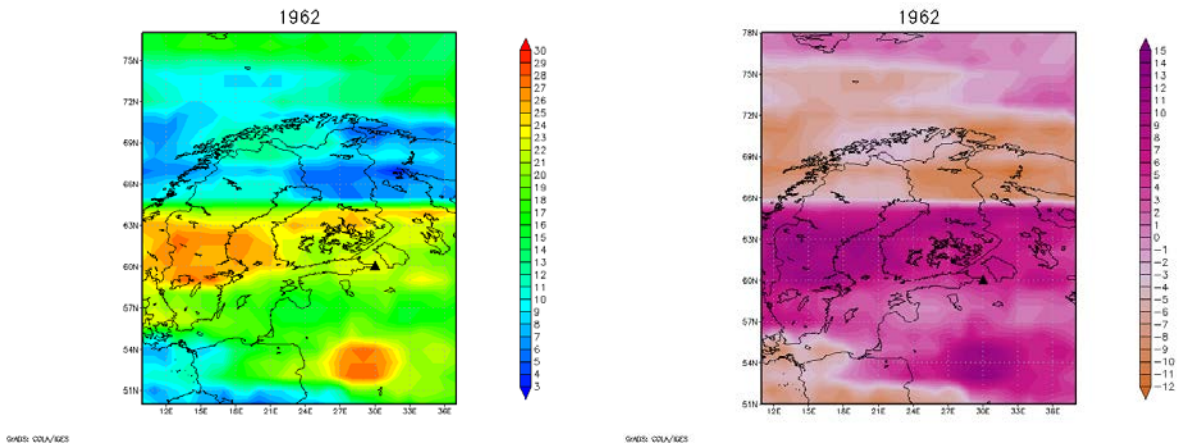


Рисунок 3.34 - карта количества циклонических образований на уровне 700 гПа и аномалий за январь 1962 года с учётом минимального критерия завихренности.

На рисунке 3.34 справа мы наблюдаем несколько чётко выделенных максимумов и минимумов, но на поле аномалий справа мы наблюдаем явные отклонения в отрицательную сторону в верхней половине, и положительные в нижней, что нам говорит о том, что данное распределение циклонических образований на выбранной территории явное отклонение от среднеклиматического и не является обычной ситуацией для данного региона.

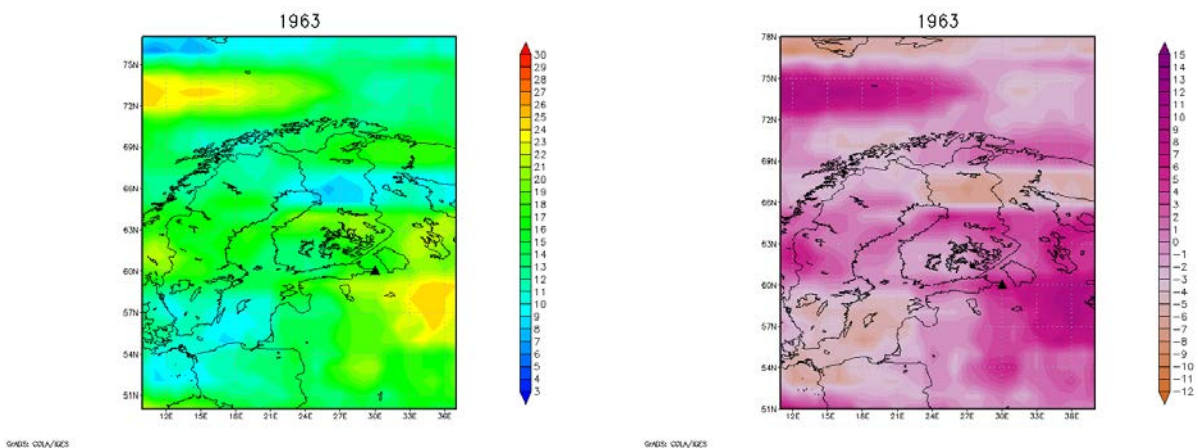


Рисунок 3.35 - карта количества циклонических образований на уровне 700 гПа и аномалий за январь 1963 года с учётом минимального критерия завихренности.

В 1963 году мы наблюдаем, что на рисунке 3.35 аномалий справа прослеживаются контуры минимумов, как на карте слева. Это также показывает нам, что на территории Финляндии значение также ниже средне-климатического по январю.

Проанализируем также месяц июль за те же года.

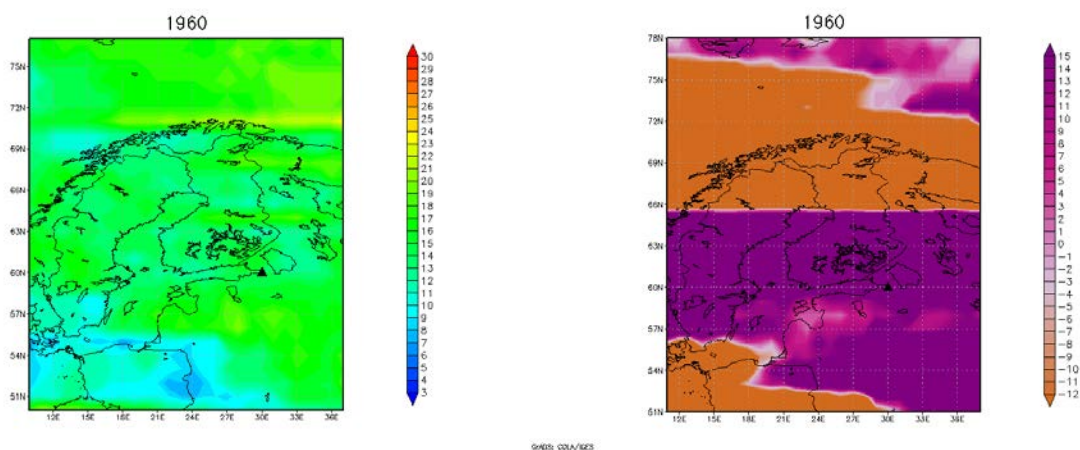


Рисунок 3.36 - карта количества циклонических образований на уровне 700 гПа и аномалий за июль 1960 года с учётом минимального критерия завихренности.

Мы можем наблюдать следующую структуру: контуры на рисунке 3.36 с аномалиями не повторяют очертания контуров минимумов также, как и в январе. Мы наблюдаем чёткое разделение рисунка, где на северной части, выше 66-ой широты, отрицательные отклонения аномалии, а южнее – положительные. И это означает, что в 1960 июль достаточно сильно отличался от средне-климатического.

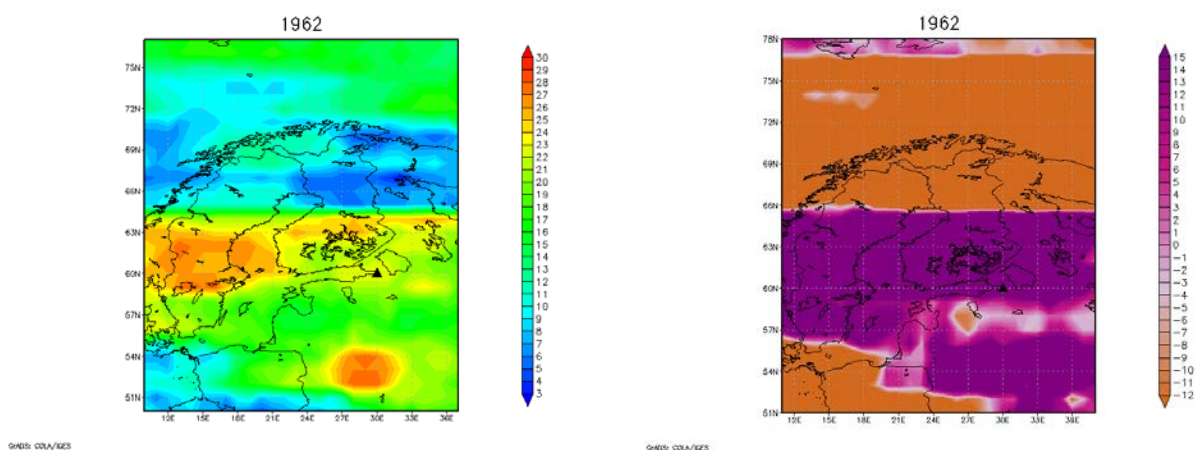


Рисунок 3.37 - карта количества циклонических образований на уровне 700 гПа и аномалий за июль 1962 года с учётом минимального критерия завихренности.

В 1962 году (рисунок 3.37) картина существенно меняется: у нас появляется ярко выраженная полоса минимума на севере Скандинавского полуострова и на Кольском полуострове между 64 и 72 северными широтами.

Также наблюдаются очаги максимума над территорией Беларуси и средней части Швеции.

На карте аномалий справа отчётливо видно, что в верхней части преобладает отрицательное отклонение от средне-климатического, а в нижней части, наоборот, более завышено, с небольшим очагом минимума на южном побережье Финского залива.

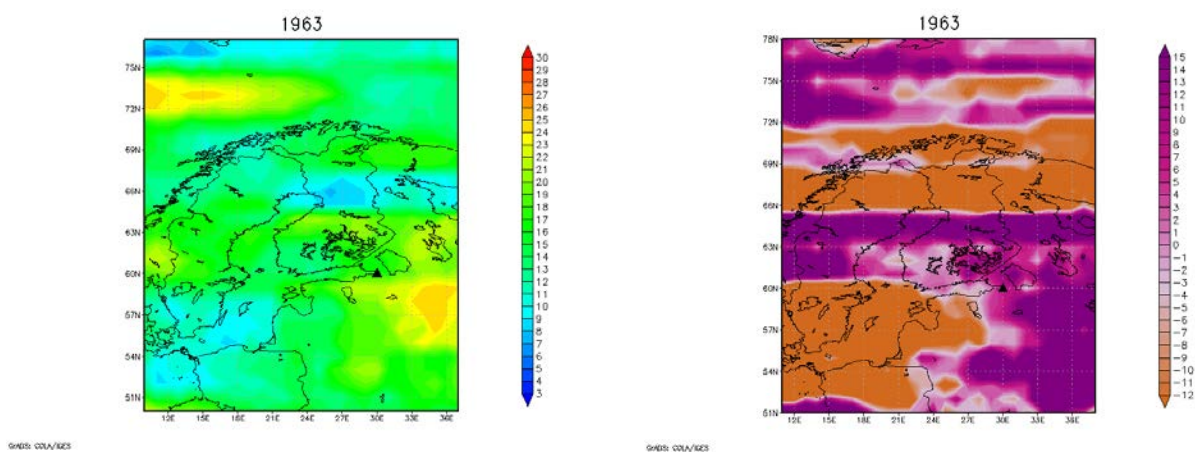


Рисунок 3.38 - карта количества циклонических образований на уровне 700 гПа и аномалий за июль 1963 года с учётом минимального критерия завихренности.

В 1963 году (рисунок 3.38) выделяется, в основном, только фрагмент над Финляндией. Над ней находится очаг минимума со значением от 7 до 8.

Анализируя карту аномалий, представляется отрицательное значение выше 66-ой широты и по побережью балтийского моря до 60 широты.

На карте аномалий также прослеживается положительное отклонение между 60 и 66 параллелью, а также на северо-западе России.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате проведённых исследований мы получили следующее:

- На уровне приземного давления из года в год значительных изменений в количестве случаев циклонических образований не наблюдается. На протяжении всего исследуемого периода стабильно встречаются очаги максимумов и минимумов. Прослеживается полоса минимумов от 63-ей до 69-ой северной широты, а также выше 75-ой северной широты. Также можно увидеть постоянный максимум на юге Норвегии, и на юго-западе, выбранной территории почти во всех годах. На севере на водной поверхности также постоянно присутствует максимум циклонической активности, но оно изменчиво территориально (более восточнее или западнее, иногда центрально).

- На уровне 700 гПа структура уже существенно меняется, по сравнению с уровнем приземного давления. Можно наблюдать некоторые согласования с уровнем приземного давления, но в большинстве случаев на 700 гПа общая картина имеет значительные изменчивости. Это может быть обусловлено орографическими особенностями, которые оказывают значительное влияние на приземное циклонообразование. Например, это могут быть горные образования, вблизи которых циклонические образования могут распасться; равнинные местности, на которых циклоны могут сохраняться достаточно долго, не теряя своей интенсивности, о чём нам и говорят часто встречающиеся зоны максимумов и минимумов. На высоте 700 гПа существенных препятствий и катализаторов нет, поэтому на данной высоте можно отследить некоторые зоны:

- Зона максимума, которая расположена вдоль 64-ой с. ш., встречается чаще всего. Это обусловлено высотной фронтальной зоной, где чаще всего и встречается циклоническая активность.

- Зона минимума количества циклонических образований над северным побережьем Норвегии и над центральной частью Финляндии также достаточно часто встречается на протяжении всего исследуемого периода. А также зона минимума на северной Польшей и Германией. Это может быть связано с тем, что когда циклонические образования выходят из фронтальной зоны, они начинают распадаться и заполняться. Поэтому на этих территориях они встречаются значительно реже.

При введении минимального критерия завихренности E_{MIN} , у нас отсеиваются небольшие и неинтенсивные циклонические образования. И на изображениях появляется следующая структура: зона максимума находится приблизительно на 64-ой с. ш. и может перемещаться от года к году чуть севернее и южнее, но незначительно. Также, севернее и южнее зоны максимума расположены зоны минимумов. Это также связано с высотной фронтальной зоной.

На протяжении всего наблюдаемого периода наблюдаются незначительные изменения в количестве случаев циклонических образований. Но существенно не меняется. Количественная характеристика сохраняется практически в одном и том же диапазоне. Это говорит о том, что климатические изменения с 1960 по 2022 не внесли значительного вклада в циклонообразование на выбранной территории.

- На уровне 500 гПа с минимальным критерием завихренности E_{MIN} наблюдается аналогичная структура, как на 700 гПа. Только на этой высоте может менять свою ширину зона максимума вдоль 64-ой с. ш. Это связано с тем, что на данной высоте прослеживаются только высокие циклонические образования с достаточно чётко выраженной и сформировавшейся структурой.

● При анализе отклонений от средне-климатических значений случаев циклонических образований исследуемого периода в январе и июле каждого года на высоте 700 гПа были выявлены некоторые особенности:

- В январе, из года в год, отклонения достаточно стабильны и не сильно отличаются количественно, т.е. в январе по количеству циклонообразований значения оставались примерно в одном и том же диапазоне.

- В июле аномалии показывали большую изменчивость, чем в январе, что может обусловиться разными режимами погоды – летним и зимнем. Летний режим циклонообразования сильно подвержен изменениям, так как на него может влиять неравномерность прогрева подстилающей поверхности, квази-двухлетние колебания, полярный вихрь и внезапные стратосферные потепления. Все эти факторы играют важную роль и оказывают значительные влияния на высотную фронтальную зону, где, в основном, и происходит наибольшая доля циклонообразования.

СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Petterssen S. 1950. Some aspects of the general circulation. Centen. Proc. Roy. Met. Soc., Roy. Meteor. Soc
2. Klein Wh. 1958. The Frequency of Cyclones And Anticyclones In Relation To The Mean Circulation. J. of Meteo.
3. Simmonds, I., R. J. Murray, and R. M. Leighton, 1999: A refinement of cyclone tracking methods with data from FROST. Aust. Meteor. Mag., Special Issue
4. Serreze Mc, Box Rg & Walsh je. 1993. Characteristics of Arctic Synoptic Activity, 1952-1989. Meteorol. Atmos. Phys
5. Blender R, Fraedrich K & Lunkeit F. 1997. Identification of cyclone track regimes in the North Atlantic. Q J R Met Soc
6. Jones Da & Simmonds I. 1993. A climatology of Southern Hemisphere extratropical cyclones. Clim.Dynam
7. Sinclair Mr. 1994. An objective cyclone climatology for the Southern Hemisphere. Mon. Wea. Rev.
8. Sinclair Mr. 1996. A climatology of anticyclones and blocking for the Southern Hemisphere. Mon. Wea. Rev
9. Loomis E. 1885. Areas of low pressure, their form, magnitude, direction and velocity of movement, In: Contributions to Meteorology, Tuttle Moorehouse & Taylor, New Haven CT, 67 pp.
10. Trigo If, Davies Td & Bigg Gr. 1999. Objective climatology of cyclones in the Mediterranean region. J Climate, 12
11. IMILAST A Community Effort to Intercompare Extratropical Cyclone Detection and Tracking Algorithmsby Urs Neu, Mirseid G. Akperov et.
12. Hodges, K. I. , 2008: Confidence intervals and significance tests for spherical data derived from feature tracking. Mon

13. Löptien, U., O. Zolina, S. K. Gulev, M. Latif, and V. Soloviov, 2008: Cyclone life cycle characteristics over the Northern Hemisphere in coupled GCMs. *Climate Dyn*
14. Della-Marta, P. M., and J. G. Pinto, 2009: Statistical uncertainty of changes in winter storms over the North Atlantic and Europe in an ensemble of transient climate simulations. *Geophys. Res. Lett*
15. Sienz, F., A. Schneidereit, R. Blender, K. Fraedrich, and F. Lunkeit, 2010: Extreme value statistics for North Atlantic cyclones. *Tellus*,
16. Damien Irving, Ian Simmonds, and Kevin Keay Mesoscale Cyclone Activity over the Ice-Free Southern Ocean: 1999–2008
17. Rasmussen, E. A., and J. Turner, 2003: Polar Lows: Mesoscale Weather Systems in the Polar Regions. Cambridge University Press
18. Yuan, X. J., J. Patoux, and C. H. Li, 2009: Satellite-based midlatitude cyclone statistics over the Southern Ocean: 2. Tracks and surface fluxes. *J. Geophys. Res.*
19. Parish, T. R., and D. H. Bromwich, 2007: Reexamination of the near-surface airflow over the Antarctic continent and implications on atmospheric circulations at high southern latitudes. *Mon. Wea. Rev.*
20. Yanase, W., and H. Niino, 2007: Dependence of polar low development on baroclinicity and physical processes: An idealized high-resolution numerical experiment. *J. Atmos. Sci.*
21. Rasmussen, E. A., and J. Turner and P. F. Twitchell, 1993: Report of a workshop on applications of new forms of satellite data in polar low research. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*
22. Condrón, A., G. R. Bigg, and I. A. Renfrew 2008: Modeling the impact of polar mesoscale cyclones on ocean circulation. *J. Geophys. Res*
23. Chelton, D. B., and M. H. Freilich, 2005: Scatterometer-based assessment of 10-m wind analyses from the operational ECMWF and NCEP numerical weather prediction models. *Mon. Wea. Rev*

24. Patoux, J. R. C. Foster, and R. A. Brown, 2008: An evaluation of scatterometer-derived oceanic surface pressure fields. *J. Appl. Meteor. Climatol.*
25. Murray, R. J., and I. Simmonds, 1991: A numerical scheme for tracking cyclone centres from digital data. Part I: Development and operation of the scheme. *Aust. Meteor. Mag*
26. Pinto, J. G., T. Spanghel, U. Ulbrich, and P. Speth, 2005: Sensitivities of a cyclone detection and tracking algorithm: Individual tracks and climatology. *Meteor. Z*
27. Lim, E. and Simmonds, I. 2002. Explosive cyclone development in the Southern Hemisphere and a comparison with Northern Hemisphere events. *Mon. Wea. Rev.* 130
28. Hofstatter, M., B. Chimani, A. Lexer, and G. Blöschl (2016), A new classification scheme of European cyclone tracks with relevance to precipitation, *Water Resour. Res.*, 52, 7086–7104, doi:10.1002/2016WR019146. Received 3 MAY 2016 Accepted 20 AUG 2016 Accepted article online 25 AUG 2016 Published online 21 SEP 2016 VC2016. American Geophysical Union. All Rights Reserved. Hofstatter et al. european cyclone track types and precipitation 7086 Water Resources Research Publications
29. Simmonds, I. , R. J. Murray, and R. M. Leighton, 1999: A refinement of cyclone tracking methods with data from FROST. *Aust. Meteor. Mag.*, (special edition)
30. M. Hofstatter, B. Chimani, A. Lexer, and G. Blöschl A new classification scheme of European cyclone tracks with relevance to precipitation
31. Zahn, M., and H. von Storch (2008), Tracking polar lows in CLM, *Meteorol. Z.*
32. Sinclair, M. R. (1994), An objective cyclone climatology for the southern Hemisphere, *Mon. Weather Rev.*, 122, 2239–2256, doi:10.1175/1520-0493(1994)122<2049:CO;2>

33. Sinclair, M. R. (1997), Objective identification of cyclones and their circulation intensity, and climatology, *Weather Forecasting*, 12, 595–612, doi:10.1175/1520-0434(1997)0122.0.CO;2.

34. Trigo, I. F., G. R. Bigg, and T. D. Davies (2002), Climatology of cyclogenesis mechanisms in the Mediterranean, *Mon. Weather Rev.*, 130, 549–569, doi:10.1175/1520-0493(2002)130<0549:COCMIT>2.0.CO;2.