



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 условия формирования зимних гроз»

Исполнитель Пронив Евгений Николаевич  
(фамилия, имя, отчество)

Руководитель кандидат географических наук  
(ученая степень, ученое звание)

Волобуева Ольга Васильевна

(фамилия, имя, отчество)

«К защите допускаю»  
заведующий кафедрой

(подпись)

кандидат физико-математических наук, доцент

(ученая степень, ученое звание)

Анискина Ольга Георгиевна

(фамилия, имя, отчество)

« 05 » июня 2023 г.

Санкт-Петербург  
2023

## СОДЕРЖАНИЕ

СОКРАЩЕНИЯ	2
ВВЕДЕНИЕ	3
1. ГРОЗА КАК ОПАСНОЕ МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКОЕ ЯВЛЕНИЕ	5
1.1 Основное понятие грозы как явления	5
1.2 Образование гроз	7
1.3 Сопутствующие явления при грозах	9
1.4 Образование зимних гроз	11
2. МЕТОДЫ РАСЧЕТА ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ГРОЗ	14
2.1 Прогноз гроз методом частицы	14
2.2 Метод Вайтинга	14
2.3 Индексы неустойчивости Total Totals (ТТ), Vertical Totals (VT) и Cross Totals (СТ).	15
2.4 Индекс неустойчивости SWEAT	18
3. ОБРАЗОВАНИЕ ЗИМНИХ ГРОЗ НА ТЕРРИТОРИИ РОССИИ	20
3.1 Примеры случаев образования зимних гроз	20
3.2 Анализ рассмотренных случаев образования зимних гроз	30
3.3 Прогноз зимних гроз по индексам неустойчивости	34
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	39
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ	41

## СОКРАЩЕНИЯ

МРЛ	–	метеорологический радиолокатор
СТ	–	Cross Totals
VT	–	Vertical Totals
TT	–	Total Totals
SWEAT	–	Severe Weather Threat Index

## ВВЕДЕНИЕ

Современную деятельность человека невозможно представить без фактических сведений о состоянии атмосферы. Точность метеорологических наблюдений позволяет качественно и своевременно контролировать изменения в окружающей среде, а также обеспечивает метеорологической информацией различные отрасли хозяйственной деятельности.

При этом, существуют метеорологические явления, которые и в настоящее время достаточно сложно прогнозировать. К таким явлениям относится грозовая активность. Гроза – это комплексное атмосферное явление, представляющее собой разновидность осадков, при которых в облаках, над или под ними формируются электрические разряды – молнии, влекущие за собой гром. Грозы зачастую сопровождаются сильными ветром (шквалом), осадками (например, в виде дождя или града).

В настоящий момент времени специалисты метеорологических служб достаточно хорошо научились прогнозировать грозы. Однако, существует такое явления, как «зимняя гроза» (ее могут называть еще «снежной»), которое может возникать поздней осенью, зимой или ранней весной. Зимние грозы достаточно малоизученное явление, которое в последнее время все чаще встречается как над территорией России, так и в мире.

Изучение зимних гроз является *актуальной* темой вследствие того, что данное малоизученное явление может наносить ущерб различным отраслям экономики, возникает не в типовых ситуациях, не в типичный период года. Поэтому так важно исследовать условия формирования зимних гроз и совершенствовать методы их прогнозирования.

*Целью* данной выпускной квалификационной работы является исследование причин формирования зимних гроз на территории Российской Федерации.

Эта цель реализуется путем выделения следующих *задач*:

1. Выявить причину образования зимних гроз, исследовать практические случаи их образования;
2. Собрать и обработать данные о зафиксированных явлениях зимней грозы за период 2012-2023 гг.;
3. Проанализировать случаи образования зимних гроз;
4. Оценить успешность прогнозирования зимних гроз по индексам неустойчивости.

Работа состоит из введения, трех глав, заключения, библиографического списка, приложения.

В первой главе представлена основная информация о грозах и сопутствующих ей явлениях.

Во второй главе представлены методы прогнозирования гроз.

В третьей главе рассматриваются синоптические ситуации образования зимних гроз, их анализ. Рассчитываются и анализируются индексы конвективной неустойчивости.

# ГЛАВА 1. ГРОЗА КАК ОПАСНОЕ МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКОЕ ЯВЛЕНИЕ

## 1.1. Основное понятие грозы как явления

Гроза – это атмосферное явление, которое представляет собой разновидность осадков, при которых в облаках, над ними и под ними (до поверхности земли) формируются электрические разряды, т. е. молнии, влекущие за собой звуковой эффект в виде грома. Наиболее благоприятный период для развития грозовой активности – теплое время года. Также наблюдаются зимой при прохождении фронтов.

Из-за грозы возникают другие суровые погодные явления, формируя опасный комплекс погодных условий. Грозы зачастую сопровождаются выпадением осадков (например, града, ливневого дождя при развитии кучево-дождевых облаков, сильным ветром (шквалом) [5].

Грозы представляют опасность различным сферам экономики, например – транспортной. Самолету ни в коем случае нельзя влетать в грозовую облачность. Турбулентность в облаках, обледенение, интенсивные осадки, поражение воздушного судна током вызывает повреждения и перегрузки, на которые оно не рассчитано.

Выделяют следующие характеристики для такого атмосферного явления, как гроза:

- скорость движения фронта – от 20 до 80 км/ч;
- проходимое расстояние – от 2 км;
- частота возникновения – около 40 тысяч раз в год;
- длительность – до часа [6].

Грозы различают по следующим признакам:

1) Сильная гроза - гроза с дождём  $\geq 15$  мм/ч и/или градом диаметром от 0.6 до 2 см, сильным шквалом  $\geq 15$  м/с.

2) Очень сильная гроза - гроза с ливневым дождём  $\geq 30$  мм/ч и/или крупным градом диаметром  $\geq 2$  см и/или очень сильным шквалом  $\geq 25$  м/с или смерчем [6].

По статистике, в средних широтах зачастую грозы фиксируются во второй половине дня. Их предвестниками являются кучево-дождевые облака, слабый ветер. Эти облака вертикального развития достаточно легко отличить – по цвету они насыщенно серые, темно-серые, а по форме: вытянутые по вертикали. Верхняя часть облака может быть в форме наковальни [5].

## 1.2. Образование гроз

Основными факторами, определяющими условия развития грозовой деятельности, являются:

- неустойчивая стратификация атмосферы и прогрев нижних слоев воздуха;
- количество влаги в приземном слое и на высотах, необходимое для формирования грозового облака;
- характер адвекции температуры и влажности на различных высотах;
- региональные особенности;
- интенсивность и характер вертикальных движений [6].

Грозовые облака образуются из кучевых облаков. Сперва они проходят стадию зрелости (развитие кучевого облака), затем, после чего наступает стадия распада (выпадают осадки, сопровождаемые электрическими разрядами). Далее, на последней стадии, происходит разрушение кучево- дождевой облачности [8]. Длительность каждой стадии зависит от конкретной синоптической ситуации, однако примерно можно выделить длительность каждой из них: начальная и максимальная фаза развития длятся по 15 минут, а заключительная – около 30 минут [1].

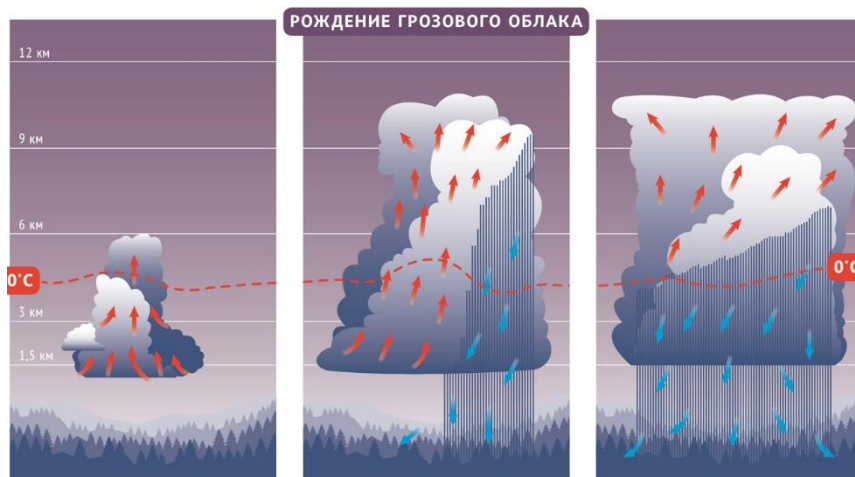


Рисунок 1.2.1 – Стадии развития грозовой облачности.

Для образования грозовых облаков необходимо наличие восходящих потоков влаги, причём достаточно большого количества. Это возможно рядом с крупными водоёмами или в горах, за счёт восходящих горных потоков воздуха. Стремясь обогнуть природное препятствие, воздух устремляется вверх, и этого достаточно для формирования облаков. Также образование облаков возможно благодаря процессам, происходящим на атмосферных фронтах (вытеснении холодным воздухом тёплого или подъёме последнего) [7].

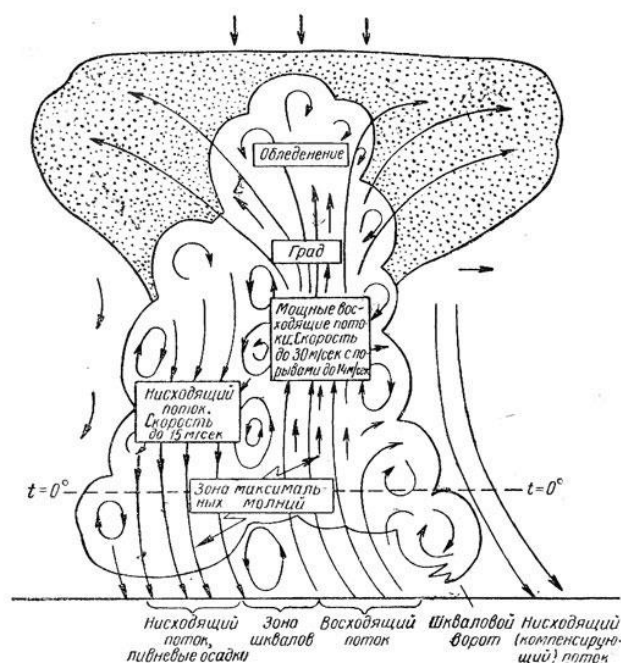


Рисунок 1.2.2. – Грозовое облако в максимальной стадии развития.



В центральной части облака накапливается заряд, который стремительно поднимается с восходящим воздушным потоком. На высоте в облаке из-за низкой температуры образуются капли воды, частицы льда, градины. Водяные и ледяные формирования восходят с воздухом, а градины из-за большей тяжести устремляются вниз. Градины сталкиваются с частицами льда, отбирают у них электроны, в итоге верхняя половина облака, накапливающая лед, становится положительно заряженной, а нижняя, через которую проходят градины, – отрицательно [7].

Таким образом, причиной возникновения грозы является напряжение, сформированное между положительным и отрицательным «полюсами» облака. Заряженные частицы двигаются, образуя электрический ток. Движение тока наблюдается как между частями облака с разными зарядами, так и между облаком и земными объектами [7].

По характеристикам грозовых облаков, их можно разделить на 4 типа:

- Одноячейковое. Явление носит слабо выраженный характер, едва заметно.

- Многаячейковые кластерные. Грозы, возникающие при таком типе облаков, самые частые. Имеют они не очень большую силу.

- Многаячейковые линейные. Данный тип облаков может похвастаться наличием мощных порывов ветра, сопровождающих явление. Хотя само оно не особенно и сильное.

- Суперъячейковые. Самые сильные, редкие и опасные. Основным их отличием является вращение воздушных масс, что приводит к возникновению разрушительных смерчей [2].

### 1.3. Сопутствующие явления при грозах

Грозы зачастую сопровождаются следующими явлениями:

1. Смерч и шквал.

Смерч – очень опасное явление погоды. По горизонтали они могут растягиваться аж 20 км, а вертикали – 20-50 км. Скорость движения при этом достигает значений аж до 300 м/с, что может с легкостью разрушать всё на своем пути. Смерчи зачастую возникают при похожей синоптической ситуации, как и грозы, однако их практически невозможно прогнозировать.

Перед прохождением грозы в большинстве случаев наблюдается шквал. Шквал – это непродолжительное по времени усилением ветра на 15 м/с или более. Он может образовываться перед прохождением грозовой деятельности. Максимально зафиксированный ветер при шквале был равен приблизительно 65 м/с.

## 2. Ливневые дожди и град.

Ливневые осадки достаточно интенсивные, но не продолжительные, могут быть как в капельно-жидком, так и в твердом виде (например, в виде града) [8].

Град выпадает в теплое время года из кучево-дождевых облаков. Образование града как осадков зависит от слияние переохлажденных капель воды с зернами крупы, сопровождающееся их замерзанием. Ширина зоны выпадения града может составлять от нескольких до 13-15 км, а само выпадение града непродолжительное – от 10 до 30 минут [3].

## 3. Турбулентность и обледенение.

Быстро восходящие и нисходящие потоки воздуха могут вызывать турбулентность. Возникает как правило при наличии кучево-дождевых облаков.

Обледенение – это отложение льда на поверхности летательного аппарата в следствие замерзания на его поверхности переохлажденных капель, которые превращаются в лед. Как правило, обледенение возможно при отрицательной температуре поверхности летательного аппарата. Представляют опасность тем, что могут ухудшать аэродинамические характеристики самолета.

#### 1.4. Образование зимних гроз

Прогноз зимних гроз в зимнее и около зимнее время является одной из внезапных проблем, с которой синоптики могут столкнуться. Еще буквально 20-30 лет назад количество зимних гроз над нетипичными регионами Российской Федерации можно посчитать по пальцам. Однако, в настоящее время, зимние грозы можно встретить ежегодно по несколько раз. Увеличение количества зафиксированного явления связывают с климатическими изменениями на нашей планете, в частности, с ростом среднегодовых (зимних) температур [9].

Зимняя (снежная) гроза также является опасным метеорологическим явлением, при котором могут наблюдаться осадки в виде ледяного снега, ледяного дождя или ледяной крупы. Сейчас зачастую можно заметить, когда зимних грозы сопровождаются выпадением жидких осадков.

Над планетой зимние грозы чаще всего фиксируют над территориями Японии, Центральных и южных регионов Европы, Восточного побережья Северной Америки (рисунок 1.4.1) [13].

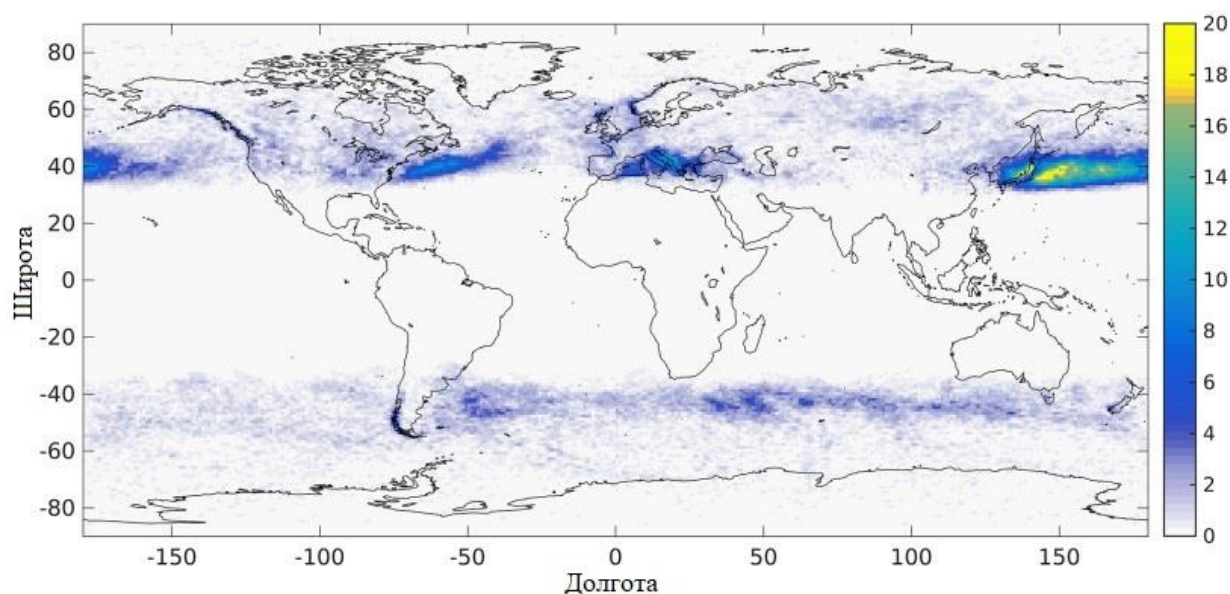


Рис. 1.4.1 – Среднее количество грозовых дней в году за период 2009-2013 гг.

Над территорией нашей же страны зимние грозы можно привычно наблюдать над южными территориями нашей страны (Кавказ, Краснодарский край), где зимы достаточно теплые. Но в последнее время фиксируются случаи наблюдения гроз в нетипичных для них регионах – север европейской части России, Сибирь, Центральная Россия, Арктическая зона РФ (рисунок 1.4.2).

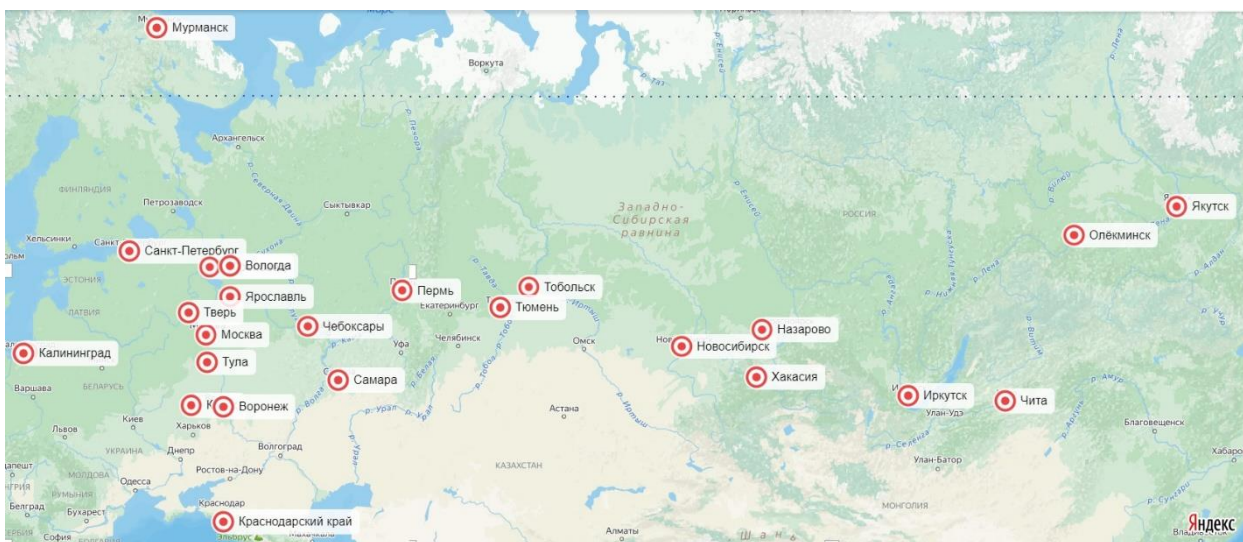


Рисунок 1.4.2 – География рассмотренных случаев образования зимних гроз за период 2012-2023 гг.

Исходя из выводов Гидрометцентра России, чаще всего зимние грозы можно наблюдать в феврале и в марте. Синоптики связывают такое явление с особенностями рельефа, климата в районе прогнозирования грозы, которые отличаются своими параметрами, например, неустойчивостью из-за орографических особенностей территории или близкого расположения к водоемам, резким перепадам давления или влиянием циклона и др [3].

К сожалению, такое конвективное явление практически невозможно прогнозировать. Зачастую грозы фиксируют уже по факту наблюдаемого явления. Редкая сеть метеорологических станций дополняет дополнительные сложности. Да, обнаружить грозовые очаги можно, например с помощью метеорологических радиолокаторов (МРЛ) и спутникового зондирования, но

наблюдательная сеть в России недостаточно плотная. Например, на востоке России недостаточное распределение МРЛ, что мешает прогнозированию опасного явления погоды.

Зимние грозы очень опасны для различных отраслей экономики нашей страны. Например, в энергетической отрасли грозы и сопутствующие явления могут привести к выводу из строя трансформаторных подстанций или обрыву линий электропередач. В авиационной отрасли при прохождении грозы аэропорты временно закрывают, а самолетам запрещено влетать в конвективные облака. Поэтому важно принимать меры предосторожности и создать условия, которые помогут уменьшить экономические потери.

С учетом особенностей развития конвективной атмосферной неустойчивости разработано достаточно много методов для прогнозирования гроз. Рассмотрим некоторые из них в следующей главе.

## ГЛАВА 2. МЕТОДЫ РАСЧЕТА ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ГРОЗ

### 2.1. Прогноз гроз методом частицы

Прогноз гроз методом частицы считается одним из самых доступных и простых методов. Его суть заключается в том, что синоптик производит обработку диаграммы температурно-ветрового зондирования за утренний срок, на которой проводит кривую состояния. Кривая состояния – это линия, которая показывает изменение температуры с высотой изолированного объема воздуха - частицы. Именно она показывает, будет ли у нас устойчивая или неустойчивая стратификация атмосферы, по которой определяется вероятность возникновения гроз.

### 2.2. Метод Вайтинга

Метод Вайтинга. Считается одним из наиболее хорошим методом для прогноза гроз по определенной территории. Основан на расчете параметра К по данным утреннего температурно-ветрового зондирования. Вероятность образования гроз рассчитывается по следующей формуле:

$$K = 2T_{850} - T_{500} - D_{850} - D_{700}; \quad (2.1)$$

Где К – коэффициент метода Вайтинга;  
Т – температура на изобарической поверхности;  
D – дефицит температуры точки росы на изобарической поверхности

После расчета параметра определяется вероятность возникновения гроз по прогнозируемой территории по следующей таблице:

Таблица 2.2.1 – Оценка вероятности возникновения гроз по прогнозируемой территории методом Вайтинга

Значение параметра К	Оценка
<u>&lt; 20</u>	Гроз не ожидается
20-25	Следует ожидать изолированные грозы
25-30	Следует указывать отдельные грозы
> 30	Грозы повсеместно

Иногда в уже рассчитанные значения параметра К могут вноситься поправка на кривизну приземных изобар [5 с Башкирии]. Таблица поправок выглядит следующим образом:

Таблица 2.2.2 – Поправка на кривизну изобар рассчитанного параметра К для метода Вайтинга

R, км	> 1000	1000-500	500-250	<u>&lt; 250</u>
Циклон	0	1.0	1.4	2.0
Антициклон	0	-1.0	-1.4	-2.0

### 2.3 Индексы неустойчивости Total Totals (TT), Vertical Totals (VT) и Cross Totals (CT).

Cross Totals (CT). Метод основан на соотношении точки росы на изобарической поверхности 850 гПа и температуры воздуха на изобарической поверхности 500 гПа. Рассчитывается по следующей формуле:

$$CT = Td_{850} - T_{500}; \quad (2.2)$$

Где  $CT$  – рассчитываемый индекс Cross Totals;  
 $Td_{850}$  – температура точки росы на изобарической поверхности  $Td_{850}$ ;  
 $T_{500}$  – температура воздуха на изобарической поверхности  $T_{500}$

Оценка вероятности развития грозовой деятельности приводится в следующей таблице:

Таблица 2.3.1 – Оценка вероятности развития грозовой деятельности индексом атмосферной неустойчивости Cross Totals

Индекс СТ	Потенциал неустойчивости	Грозовая деятельность
$CT \leq 18$	Тропосфера обладает низким потенциалом конвективной неустойчивости, который недостаточен для грозовой деятельности.	Отсутствует
СТ 18 - 19	Умеренная неустойчивость.	Слабая грозовая деятельность.
СТ 20 - 21	Сильная неустойчивость.	Умеренные грозы
СТ 22 - 23	Энергия неустойчивости очень сильная	Возможны сильные грозы
СТ 24 – 25	Высокая энергия неустойчивости. Сильные грозы.	Сильные грозы
$CT > 25$	Очень высокая энергия неустойчивости. Очень сильные грозы.	Очень сильные грозы



Vertical Totals (VT). Метод показывает статическую устойчивость между изобарическими поверхностями 850 гПа и 700 гПа. Рассчитывается по следующей формуле:

$$VT = T_{850} - T_{500}; \quad (2.3)$$

Где VT – рассчитываемый индекс Vertical Totals;  
 $T_{850}$  – температура на изобарической поверхности  $T_{850}$ ;  
 $T_{500}$  – температура на изобарической поверхности  $T_{500}$

Если значение  $VT \geq 26$ , то грозы вероятны.

Total Totals (TT). Метод включает в себя рассмотренные выше для показателя: Vertical Totals (VT) и Cross Totals (CT). Используется для прогноза очагов грозовой активности и рассчитывается по следующей формуле:

$$TT = VT + CT; \quad (2.4)$$

По табличным значениям можно определить вероятность грозовой деятельности.

Таблица 2.3.3 Оценка вероятности грозовой деятельности по индексу Total Totals (TT):

Индекс ТТ	Оценка вероятности грозовой деятельности
<u>&lt; 44</u>	Грозовая деятельность не возможна.
44 - 45	Отдельная гроза или несколько гроз.
46 - 47	Рассеянные грозовые очаги.
48 - 49	Значительные количество гроз, отдельные из которых сильные.
50 - 51	Рассеянные сильные грозовые очаги, отдельные очаги со смерчем.
52 - 55	Значительное количество очагов сильных гроз, отдельные очаги со смерчем.
> 55	Многочисленные сильные грозы с сильными смерчами

## 2.4 Индекс неустойчивости SWEAT

Severe Weather Threat Index (SWEAT) является комплексным критерием для прогноза гроз, а также таких параметров, как скорость и сдвиг ветра. Рассчитывается по следующей формуле:

$$SWEAT = 12 \cdot Td_{850} + 20 \cdot (TT - 49) + 3,888 \cdot v_{850} + 1,944 \cdot v_{500} + (125 \cdot [\sin(D_{500} - D_{850}) + 0,2]); \quad (2.5)$$

Где  $v_{850}$  – скорость ветра на уровне 850 гПа в м/с;  
 $v_{500}$  – скорость ветра на уровне 500 гПа в м/с;  
 $D_{850}$  – направление ветра на уровне 850 гПа, в градусах;  
 $D_{500}$  – направление ветра на уровне 500 гПа, в градусах;

Количественная оценка вероятности возникновения гроз производится по специальной таблице:

Таблица 2.3.4 – Количественная оценка индекса

SWEAT	Оценка индекса
<u>&lt; 250</u>	Нет условий для возникновения сильных гроз.
250 - 350	Есть условия для сильных гроз, града и шквалов.
350 - 500	Есть условия для очень сильных гроз, крупного града, сильных шквалов, смерчей.
$\geq 500$	Условия для очень сильных гроз, крупного града, сильных шквалов, сильных смерчей.

## ГЛАВА 3. ОБРАЗОВАНИЕ ЗИМНИХ ГРОЗ НА ТЕРРИТОРИИ РОССИИ

### 3.1 Примеры случаев образования зимних гроз

В настоящей работе рассмотрены случаи образования зимних гроз над территорией России за период 2012-2023 гг. За последнее время число случаев образования зимних гроз заметно увеличилось. Рассмотрим несколько случаев:

1. 19 февраля 2022 года, около 4 часов утра, в течение 1,5-2 часов над Калининградской областью можно было наблюдать грозы со шквалом. Причиной этого явления стало прохождение холодного фронта циклона «Юнис» (рисунок 3.1.1, 3.1.2). Гроза сопровождалась шквалистым усилением ветра до 28 м/с и выпадением ледяной крупы (рисунок 3.1.3) [10]. На метеостанции «Калининград-Низовье» с 23:00 предыдущего дня по 02:00 местного времени отмечалось повышение температуры (с 2,8 °С до 6,8 °С), падение атмосферного давления (с 987 гПа до 981 гПа).

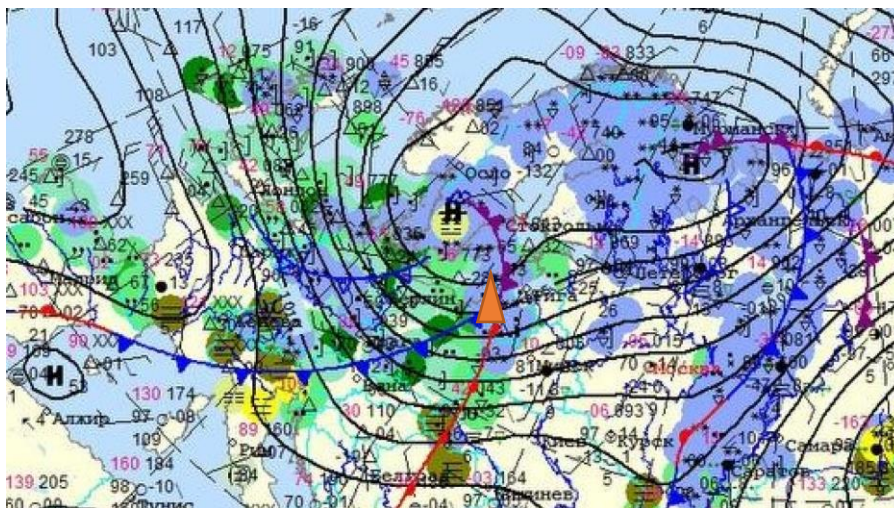


Рисунок 3.1.1 – Карта приземного анализа за 19.02.2022 00:00 UTC.

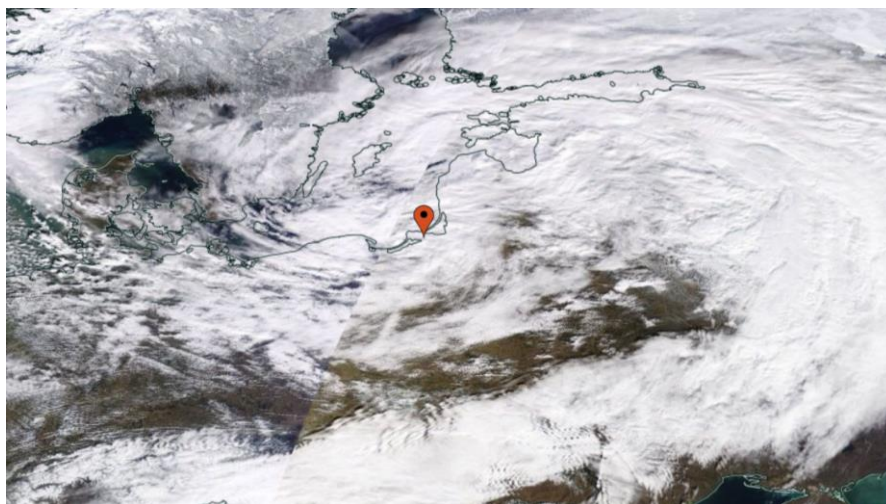


Рисунок 3.1.2 – Снимок с ИЗС за 19.02.2022.

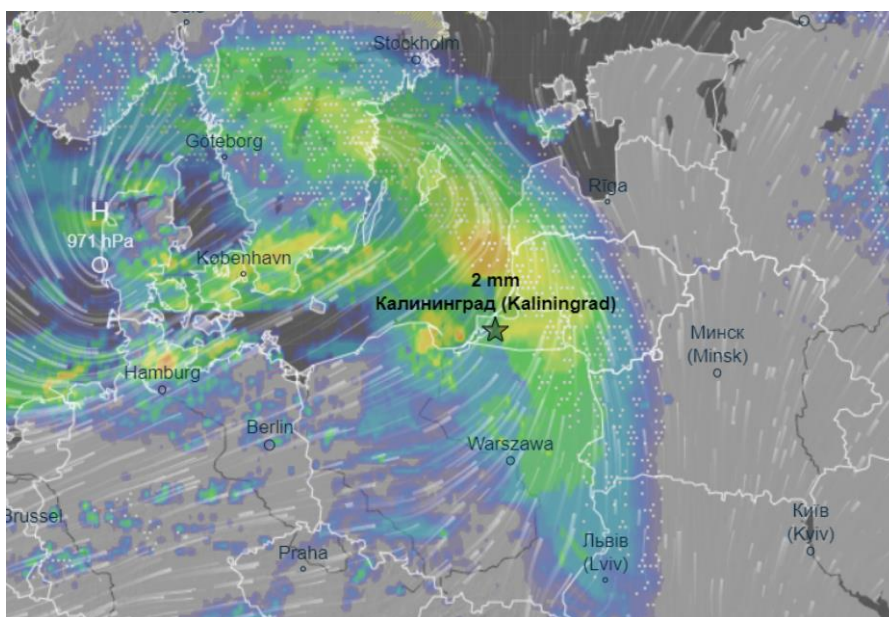


Рисунок 3.1.3 – Зона осадков 19.02.2022 по модели GFS.

Расчитав индексы неустойчивости для прогнозирования гроз, по данным зондирования пункта «Leva» (Польша) (рисунок 3.1.4), можно отметить, что по методу Вайтинга, Vertical Totals, Cross Totals, Total Totals, Severe Weather Threat Index (SWEAT) грозы прогнозировались.

- Коэффициент неустойчивости по методу Вайтинга равен 25,60 – гроза прогнозируется, следует указывать отдельные грозы;

- Индекс неустойчивости Vertical Totals равен 29,80 – грозы вероятны;  
- Индекс неустойчивости Cross Totals равен 28,30 – очень высокая энергия неустойчивости, прогнозируются очень сильные грозы.

- Индекс Total Totals, вмещающий в себя два показателя: Vertical Totals и Cross Totals, равен 58,10 – прогнозируются сильные грозы с сильными смерчами.

Индекс SWEAT равен 352,9 – вероятность сильных гроз.

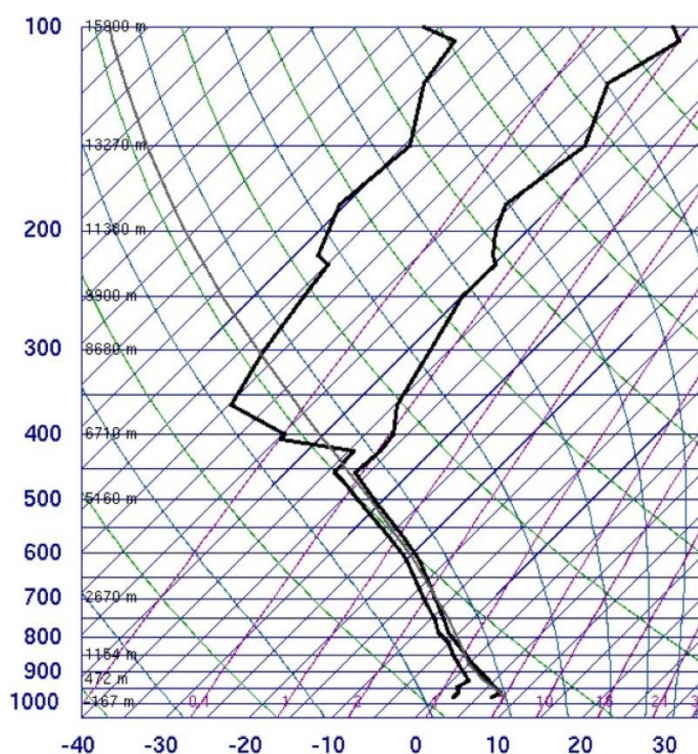


Рисунок 3.1.4 – Данные зондирования за 19.02.2022 00:00 UTC.

2. 9 января 2023 года в городе Назарово Красноярского края в дневное время суток была зафиксирована грозовая активность [11]. Связано явление с прохождением фронта окклюзии, а затем холодного фронта (рисунок 3.1.5) (резкое падение атмосферного давления с 978 гПа). в 04:00 часа местного времени до 956 гПа в 13:00 часов, а затем повышение до 979 гПа в 04 часа следующего дня. Изменение температуры от  $-7,9^{\circ}\text{C}$  за 04:00 местного времени до  $+2,2^{\circ}\text{C}$  в 16:00, а затем понижение до  $-3,8^{\circ}\text{C}$  к 04:00 следующего дня.

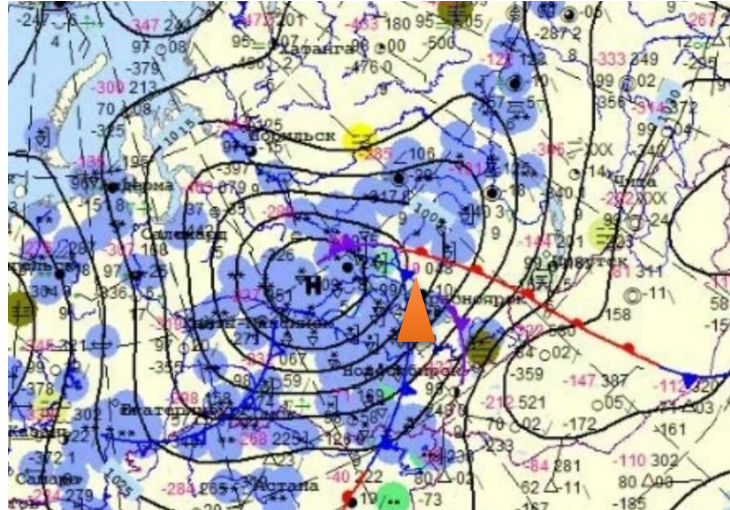


Рисунок 3.1.5 – Карта приземного анализа за 09.01.2023 00:00 UTC

По данным зондирования аэропорта Емельяново (130 км западнее г. Назарово) за 09.01.2023 срок 00:00Z (рисунок 3.1.6) по методу Вайтинга (K=15) и SWEAT грозы не ожидалось. По индексам Cross Totals, Total Totals – грозы прогнозировались. По индексу Vertical Totals (25,80), что является граничным значением (при  $VT \geq 26,0$  – грозы прогнозируются).

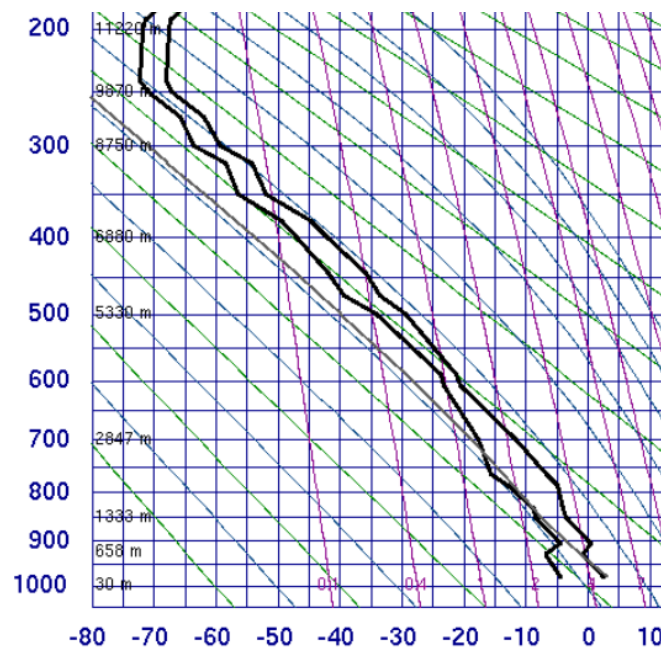


Рисунок 3.1.6 – Данные зондирования за 09.03.2023 00:00 UTC

3. Ночью 9 ноября 2012 года в городе Пермь была зафиксирована зимняя гроза с продолжительностью около 30 минут. Явление сопровождалось ливнем, слабым шквалом (рисунок 3.1.7). Синоптическая ситуация описывается нахождением города в тылу циклона, центр которого расположен около острова Новая Земля, и влажной холодной воздушной массой с большим вертикальным градиентом температуры воздуха [12]. Стоит отметить, что перед прохождением фронта температура воздуха повысилась до  $+7,4^{\circ}\text{C}$ , холодный фронт прошел с небольшим понижением температуры.

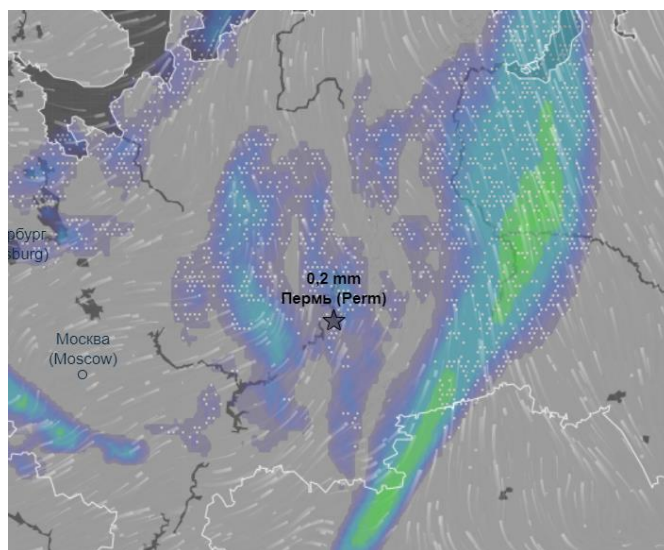


Рисунок 3.1.7 – Зона осадков 09.11.2012 по модели ECMWF

При высокой влажности развилась конвекция, которую усилили активный ХФ и сходимости потоков. В результате чего сформировались кучево-дождевые облака, которые способствовали развитию гроз с ливнями.

Модель GFS давала небольшой процент формирования явления - 20-40%, а максимальное значение Вайтинга ожидалось северо-западнее Перми и достигало значения  $K=24-26$ , что показывает возможность возникновения отдельных гроз (рисунок 3.1.8).



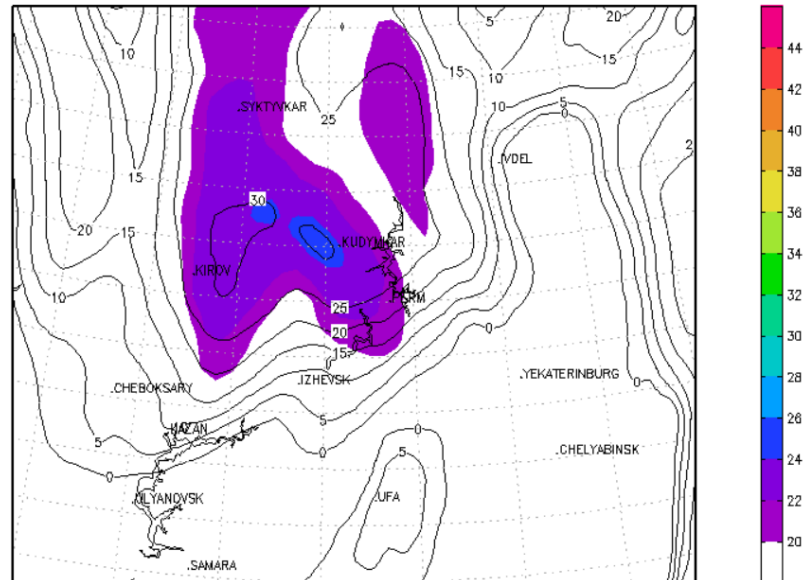


Рисунок 3.1.8 – Карта прогноза гроз по модели GFC. Индексы Фатеева и Вайтинга

4. Ночью 3 декабря 2013 года в Иркутске была зафиксирована гроза. Явление сопровождалось выпадением жидких осадков, позже непродолжительными зарядами снежной крупы. Нетипичное явление возникло из-за мощного выноса теплых воздушных масс с Атлантики, в результате чего был побит абсолютный месячный максимум температуры воздуха  $+5.3^{\circ}\text{C}$ , что намного выше климатической нормы (на  $11.5^{\circ}\text{C}$ ). Отмечались сильные порывы ветра до 30 м/с [13]

Появления грозы в данной ситуации объясняется тем, что на волне полярного фронта сформировался частный циклон, центр которого располагался над севером Сибири [рисунок 3.1.9, 3.1.10]. Он начал углубляться и перемещаться на юг Западной Сибири.

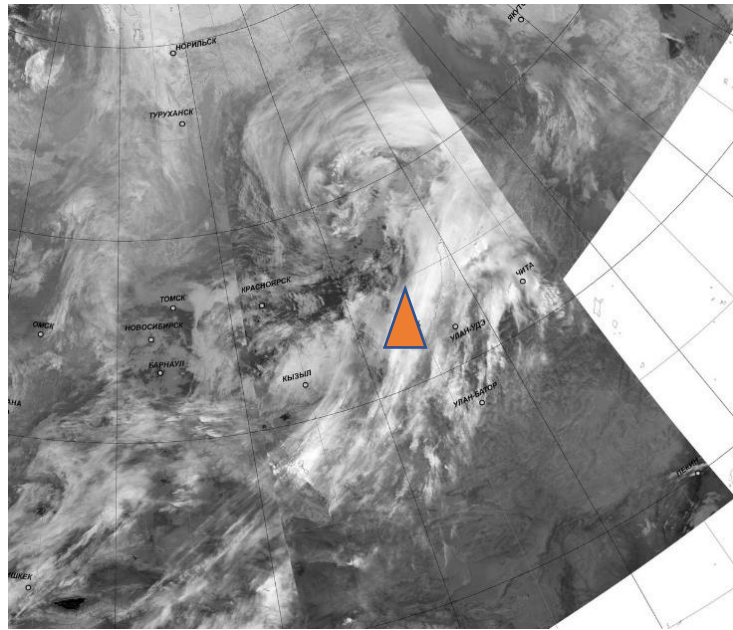


Рисунок 3.1.9 – Данные с ИЗС за 02.12.2013 15:49 UTC

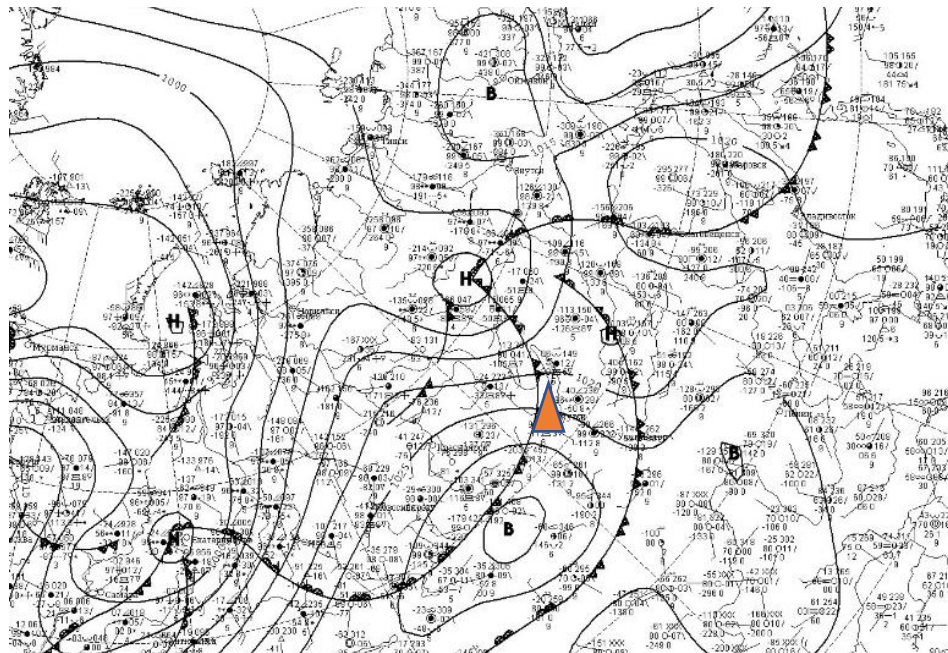


Рисунок 3.1.10 – Приземный анализ 03.12.2013 за 00:00 UTC

5. 14 января 2022 года над Курской областью вечером была зафиксирована гроза, которая сопровождалась мокрым снегом, шквалистым ветром до 21 м/с (рисунок 3.1.11, 3.1.12). Причиной возникновения грозы стал атлантический (двухцентровый) циклон «Эльза». Явление наблюдалось при

прохождении холодного фронта. За сутки температура воздуха выросла более, чем на  $10^{\circ}\text{C}$  (с  $-10,0^{\circ}\text{C}$  до  $+1,7^{\circ}\text{C}$ ), атмосферное давление понизилось с 980 гПа до 950 гПа.

По рассчитанным индексам неустойчивости (используя данные зондирования пункта «Курск») грозы прогнозировались по методу Cross Totals ( $K=22.20$ ) и Total Totals ( $K=45.40$ ).

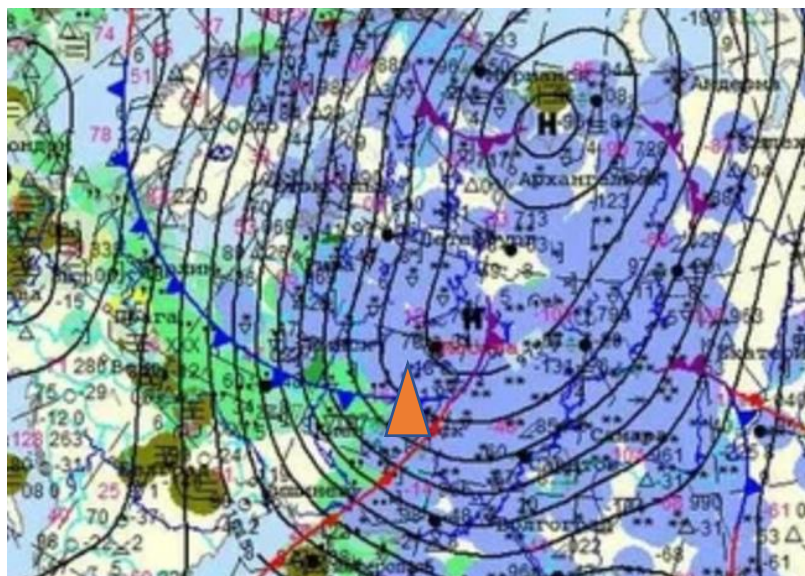


Рисунок 3.1.11 – Карта приземного анализа за 14.02.2022 12:00 UTC

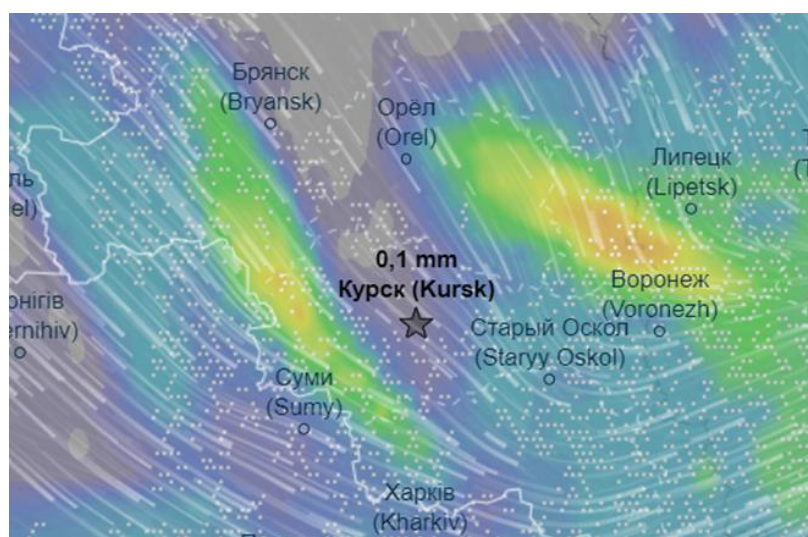


Рисунок 3.1.12 – Зона осадков 14.02.2022 по подели GFS

6. 9 декабря 2015 года в Новосибирске впервые метеорологическими службами региона (наблюдательными пунктами «Учебная», МРЛ «Толмачево») была зафиксирована гроза, которая наблюдалась около 18:00 по местному времени, продолжалось около 13 минут. Явление возникло в результате прохождения фронта окклюзии циклона «Десмонд», который изначально возник над Атлантикой (рисунок 3.1.13). Температура воздуха превышала климатическую норму на 12-16°C и была около +1 +3°C. Явление сопровождалось выпадением сильного снега.

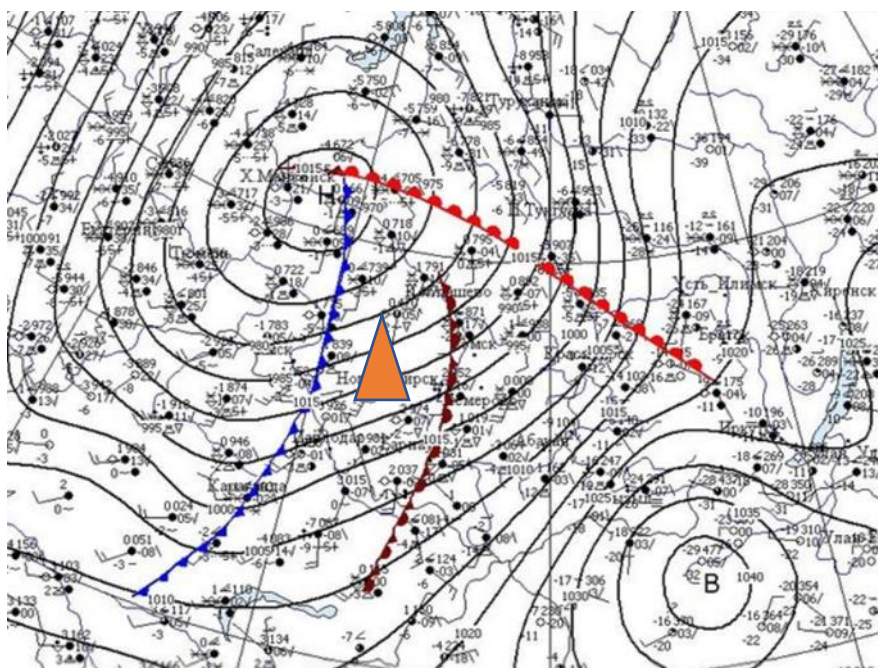


Рисунок 3.1.13 – Карта приземного анализа за 09.12.2015 00:00 UTC

7. Утром 27 января 2021 года в г. Углич Ярославской области гроза объясняется прохождением фронта окклюзии пришедшего атлантического циклона, центр которого располагался приблизительно над Смоленском.

8. 1 февраля 2015 года в Москве утром, в районе 07:30 местного времени, наблюдалась гроза (прохождение холодного фронта). Явление сопровождалось ливневым дождем и продолжалось приблизительно 20 минут.

В этот же день был установлен температурный рекорд для данного дня -  $+3,1^{\circ}\text{C}$  (в 07:00 по местному времени). Порывы ветра достигали 17 м/с.

9. В 2016 году вечером 17 марта в г. Заозерске (Мурманская область) и ночью 18 марта в г. Мурманске наблюдалась гроза. Следствием явления можно назвать прохождение холодного фронта над Кольским полуостровом, который находился в тылу циклона (рисунок 3.1.14). Температура Баренцево моря была  $+3$   $+4^{\circ}\text{C}$ , а воздуха на высоте 1,5 км -  $-13,5^{\circ}\text{C}$  (разница температур  $17^{\circ}\text{C}$ ), что способствовало развитию конвективной неустойчивости.

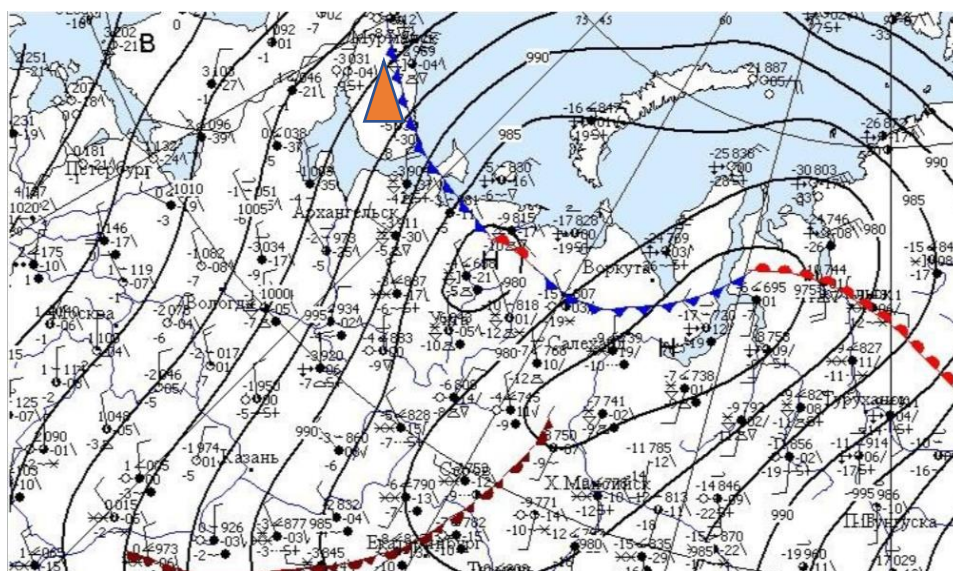


Рисунок 3.1.14 – Карта приземного анализа за 17.03.2016 00:00 UTC

10. В Тобольске 13 февраля 2015 года около 22:15 (+2 МСК) при прохождении холодного фронта наблюдали грозу, которая сопровождалась выпадением ливневого снега и шквалистым ветром (рисунок 3.1.15). По времени продолжение опасного явления составило около 5 минут. Перед прохождением холодного фронта наблюдался рост температуры (от  $-9,4^{\circ}\text{C}$  12.02 в 21:00 UTC до  $0,2^{\circ}\text{C}$  13.02 того же времени), падение давления (с 1002 гПа до 990 гПа).

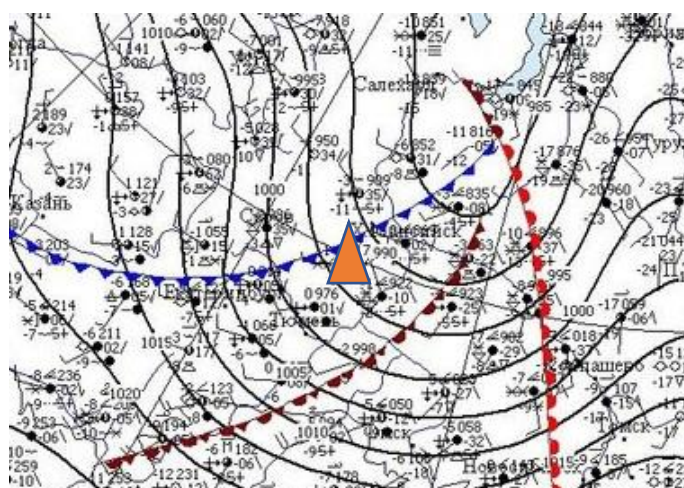


Рисунок 3.1.15 Карта приземного анализа за 13.02.2015 12:00 UTC

### 3.2 Анализ рассмотренных случаев образования зимних гроз

Для дальнейшего исследования условий образования зимних гроз был создан архив случаев зимних гроз на территории РФ. А также синоптический материал, который включает приземные карты, данные метеорологических радиолокаторов и температурно-ветрового зондирования по данным сайта университета Вайоминга [weather.uwyo.edu], архив погоды [gp5.ru]. Были рассчитаны индексы конвективной неустойчивости по м. Вайтинга, Cross Totals, Total Totals, Total Totals, SWEAT. В работе приведены 30 случаев зимних гроз за период 2012-2023 гг. (октябрь-март).

В рассмотренных выше случаях перед возникновением грозы наблюдался контраст в поле температуры и в поле влажности. Порой изменение температуры за сутки достигало  $+9^{\circ}\text{C}$   $+12^{\circ}\text{C}$ , что является отклонением от климатической нормы. Большинство случаев грозы было зафиксировано при температурах около  $0^{\circ}\text{C}$   $+3^{\circ}\text{C}$  (макс.  $+7^{\circ}\text{C}$  в Воронеже, 27.02.2020). В некоторых рассмотренных случаях наблюдалась температурная инверсия в приземном слое. Атмосферное давление в рассмотренных случаях также понижается. В некоторых пунктах разница может достигать 25-30 гПа,

что может говорить о больших скоростях смещения воздушных масс. Во всех случаях фиксировалось выпадение жидких и твердых осадков, шквалов.

Формирование зимних гроз связано с прохождением холодного фронта, вторичного холодного фронта или фронта окклюзии. При этом воздушная масса перед этими фронтами должна быть аномально теплой.

Продолжительность грозовой деятельности над исследуемыми пунктами в большинстве случаев была около 15-20 минут. Минимальное время – около 3 минут (Новосибирск, 09.12.2015), максимальное – около 2 часов (Калининград, 19.02.2022). В Мурманске 26.01.2020 был зафиксирован всего лишь одиночный раскат.

В таблице 3.2.1 и на рисунке 3.2.2 приводится анализ распределения случаев гроз в наблюдательных пунктах.

Таблица 3.2.1 – Распределение случаев гроз в наблюдательных пунктах за октябрь-март 2012-2023 гг.

Месяц	Количество случаев	Всего
Октябрь	1	30
Ноябрь	1	
Декабрь	3	
Январь	9	
Февраль	9	
Март	7	

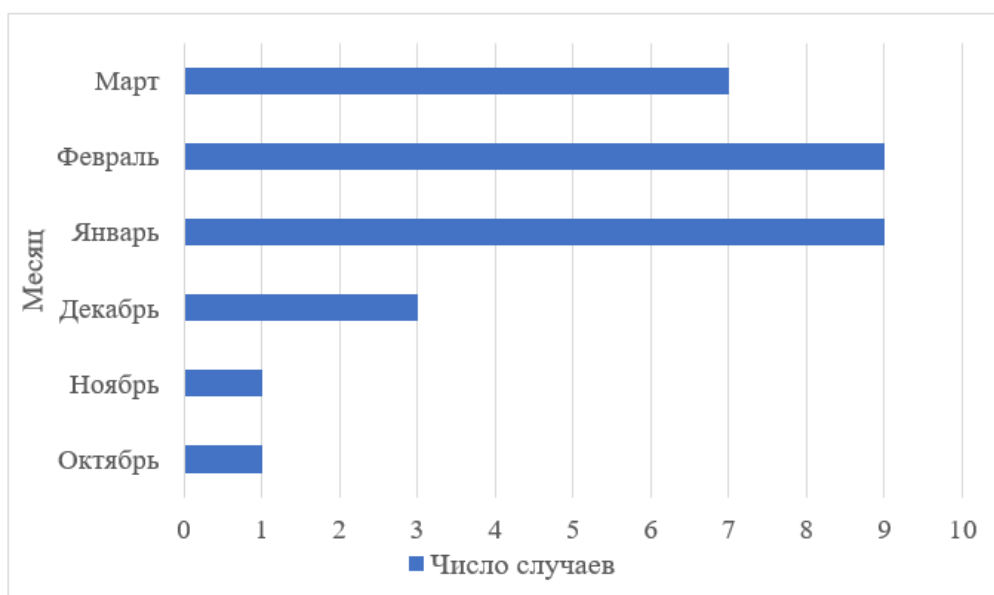


Рисунок 3.2.2 – Распределение случаев гроз в наблюдательных пунктах за октябрь- март 2012-2023 гг.

На рисунке показано, что большинство случаев зимних гроз наблюдаются в январе (9 случаев), феврале (9 случаев) и марте (7 случаев). В большинстве случаев это связано с теплыми воздушными массами, которых могут прийти с Атлантики или Средиземноморья. Как правило, это циклоны в стадии молодого циклона.

Из таблицы 3.2.3 и рисунка 3.2.4 можно сделать вывод, что грозовая активность чаще всего наблюдалась в вечернее время, реже всего – в дневное.

Таблица 3.2.3 – Суточное распределение зимних гроз (местное время).

Время суток	Количество случаев
Ночь (00:00-04:00)	8
Утро (04:00-12:00)	7
День (12:00-16:00)	5
Вечер (16:00-24:00)	10





Рисунок 3.2.4 – Суточное распределение зимних гроз (местное время)

Изучив архив синоптических ситуаций за выбранный период времени, были рассмотрены типовые синоптические ситуации образования зимних гроз (таблица 3.2.5, рисунок 3.2.6).

Таблица 3.2.5 – Повторяемость синоптических ситуаций при образовании гроз.

Синоптическая ситуация	Число случаев	Повторяемость, %
Фронт окклюзии	2	6,7
Холодный фронт	5	16,6
Теплый сектор циклона	16	53,3
Центр циклона	3	10,0
<u>Малогradientное поле пониженного давления</u>	2	6,7
Тыловая часть циклона	2	6,7
Итого	30	100

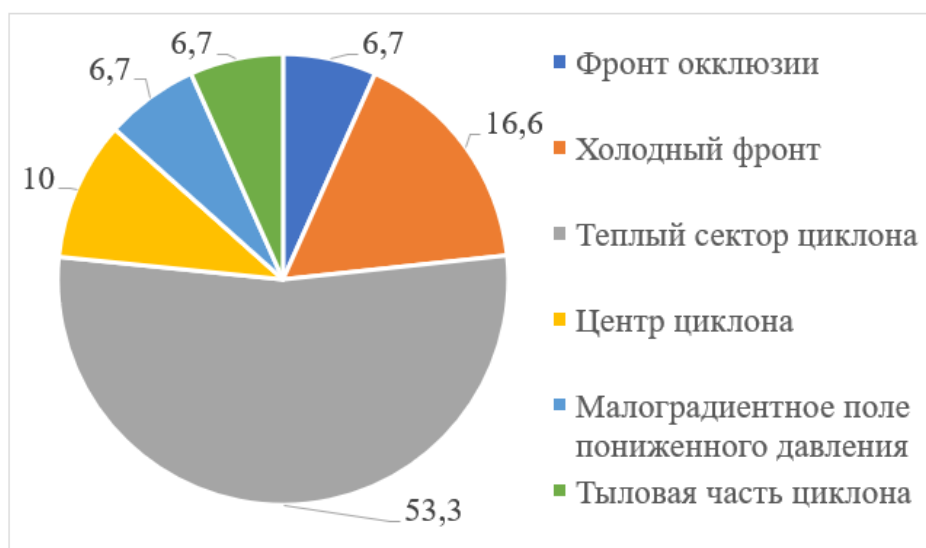


Рисунок 3.2.6 – Повторяемость синоптических ситуаций при образовании зимних гроз.

На рисунке 3.2.6 можно наблюдать процентное соотношение повторяемости синоптических ситуаций при образовании зимних гроз. Чуть больше половины всех случаев (53,3%) имеет такая синоптическая ситуация, как теплый сектор циклона. Далее по повторяемости идёт холодный фронт (16,6%) и центр циклона (10%).

### 3.3 Прогноз зимних гроз по индексам неустойчивости

Как известно, зимние грозы достаточно непросто прогнозировать, поэтому на данном этапе работы, для каждого рассмотренного случая, было принято решение проверить индексы конвективной неустойчивости на оправдываемость. Используя данные зондирования атмосферы были рассчитаны и проанализированы критерии неустойчивости: Cross Totals, Total Totals, Vertical Totals, SWEAT, а также метод Вайтинга по формулам 2.1-2.5.

В таблице 3.3.1 рассчитана общая оправдываемость коэффициентов образования гроз. Для этого сначала была посчитана оправдываемость

каждого отдельного метода, после чего полученные значения были проанализированы и сведены в единую таблицу.

Таблица 3.3.1 – Общая оправдываемость коэффициентов образования гроз.

Метод	Прогнозировалась	Не прогнозировалась	Процент оправдываемости
Вайтинга (К-индекс)	7	23	23,3
Cross Totals	28	2	93,3
Vertical Totals	16	14	53,3
Total Totals	23	7	76,7
SWEAT	6	24	20,0

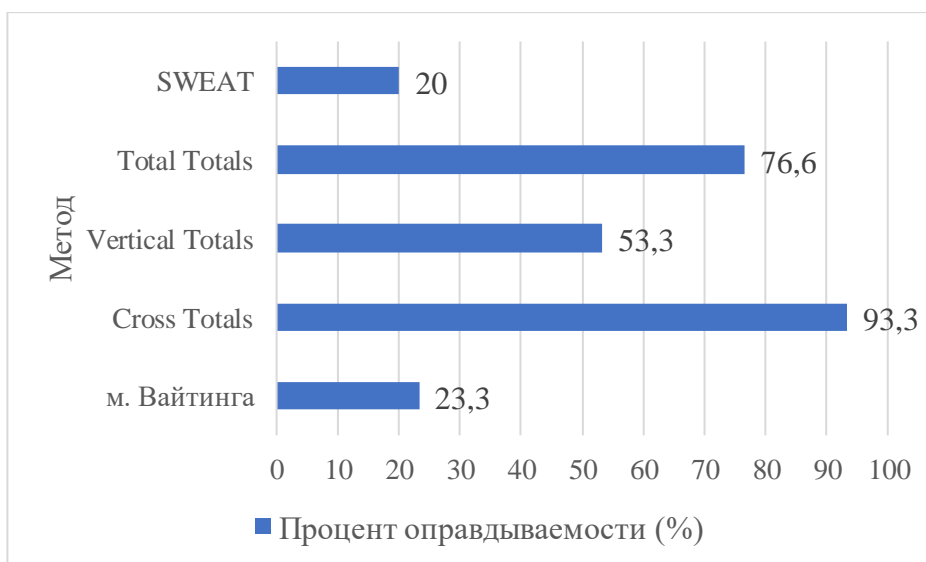


Рисунок 3.3.2 - Общая оправдываемость коэффициентов образования гроз.

На рисунке 3.3.2 наглядно видно, что наибольший процент оправдываемости у метода прогноза гроз Cross Totals (93%), наименьшее – у метода Вайтинга (23%) и SWEAT (20%).

Для дальнейшего анализа рассчитана таблица успешности прогноза гроз с учетом индексов неустойчивости (таблица 3.3.3).

Таблица 3.3.3 – Повторяемость успешности расчета индексов неустойчивости по типам синоптических ситуация

Синоптическая ситуация	м. Вайтинга	СТ	VT	TT	SWEAT
Фронт окклюзии	0	50	0	50	0
Холодный фронт	20	100	100	100	80
Теплый сектор циклона	19	100	31	88	13
Центр циклона	33	100	100	100	33
Малогradientное поле пониженного давления	0	100	100	100	0
Тыловая часть циклона	50	50	50	50	0

Стоит обратить внимание на повторяемость рассматриваемых синоптических ситуаций (таблица 3.2.5). Нельзя полностью утверждать о точности прогноза гроз в ситуациях, где повторяемость явлений небольшая (все случаи, кроме теплого сектора циклона).

Исходя из полученных данных таблицы 3.3.3, можно сделать выводы о том, в случае ситуации, связанной с фронтом окклюзии и тыловой частью циклона оправдываемость составила 50%, что может объясняться небольшим количеством случаев.

Что касается Cross Totals, то он показывает показывает наилучший результат прогнозирования – 100%. Однако, рассмотрев подобные синоптические ситуации с хорошим показателем Cross Totals (СТ=26,60) – например, 11 января 2023 года в Санкт-Петербурге грозы не было, что говорит о том, что Cross Totals выдает ошибку перестраховки (рисунок 3.3.4).

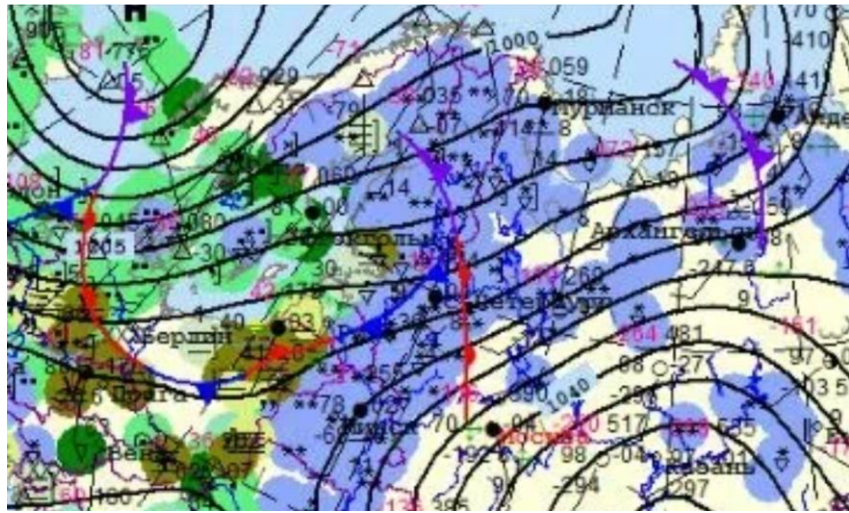


Рисунок 3.3.4 – Карта приземного анализа за 11.01.2023 00:00 UTC

Результаты по индексу Total Totals аналогичны Cross Totals, с отличием оправдываемости в случае с теплым сектором циклона - 88%.

Vertical Totals показал хорошую оправдываемость в случаях гроз под влиянием холодного фронта, малоградиентного поля пониженного давления, центра циклона.

У индекса SWEAT неплохая оправдываемость в случае, когда гроза наблюдалась при прохождении холодного фронта (80%).

Метод Вайтинга показал наихудшие результаты прогноза гроз. Самый большой процент оправдываемости в ситуации с тыловой частью циклона (50%). Метод не спрогнозировал грозы в случае с фронтом окклюзии и малоградиентным полем пониженного давления (0%).

По результатам можно делать вывод о том, что метод Cross Totals показывает наилучшие результаты среди всех методов. Total Totals также показывает неплохие результаты прогноза гроз. В большинстве случаев оправдываемость прогноза индекса Total Totals характеризуется высокими рассчитанными значениями индекса Cross Totals. Данные индексы возможно использовать для прогноза зимних гроз.

Vertical Totals процент оправдываемости лишь 53% (чуть больше половины рассматриваемых случаев). Хоть он и показывал с хорошей

вероятностью грозы для синоптических случаев, где она описывалась малоградиентным полем пониженного давления, центром циклона, холодным фронтом, для случая с теплым сектором циклона процент оправдываемости всего 31% (в 16 случаях из 30 синоптическая ситуация – теплый сектор циклона). Также не стоит забывать, что Vertical Totals является частью индекса Total Totals. Индекс может повышать риски неверного прогноза методом ТТ для наблюдателя. Vertical Totals не рекомендуется использовать для прогноза гроз в зимний период.

SWEAT индекс показал наихудшую оправдываемость – 20%. Но при прохождении холодного фронта оправдываемость достигала 80%.

Метод Вайтинга показал также плохие результаты оправдываемости зимних гроз – 23%. Данный результат достаточно интересный, ведь в летнее время данный метод обычно показывает хорошую оправдываемость. Это связано с тем, что индекс учитывает высоту только до 700 гПа (3000 метров). Как правило, при зимних грозах на этих высотах наблюдается большой дефицит влаги, который может быть составлять 15...25°C.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Грозовая активность представляет из себя комплекс опасных явлений погоды, при котором в облачности формируются электрические разряды (молнии), влекущие за собой грозы. Частыми спутниками грозы становятся разнообразные осадки, например, ливневой снег или дождь, град, шквалы при развитии кучево-дождевой облачности.

Зимние грозы являются также опасным явлением погоды. В отличие от летних гроз, зимние над территорией России достаточно тяжело прогнозировать. Это может приносить дополнительный ущерб различным отраслям экономики страны.

В результате моей работы было рассмотрено 30 случаев образования зимних гроз на территории России за период 2012-2023 гг. Был создан архив случаев их образования.

Чаще всего гроза фиксировалась в теплом секторе циклона (53%), при прохождении холодного фронта (17%) и в центре циклона (10%), при этом воздушная масса должна быть теплой. Продолжительность грозовой деятельности в среднем составила 15-20 минут. При этом наблюдается контраст температур (до 10°C) и атмосферного давления (до 30 гПа).

Большинство случаев было зафиксировано в январе и феврале (по 9 случаев). Чаще всего наблюдались в вечернее (10 случаев) и ночное время (8 случаев).

Были рассчитаны индексы конвективной неустойчивости по м. Вайтинга, а также индексы Cross Totals, Total Totals, Vertical Totals, SWEAT. Наибольший процент оправдываемости у Cross Totals – 93%, далее Total Totals (77%), Vertical Totals (53%), м. Вайтинга (23%), SWEAT (20%). Тем не менее, индекс Cross Totals может в некоторых случаях быть перестраховочным, т.е. он может прогнозировать грозу тогда, когда она не наблюдалась. Индексы

неустойчивости показали наилучшие результаты при прогнозе гроз в центре циклона (73%).

Для прогноза зимних гроз необходимо использовать комплексный подход, который включает в себя анализ синоптических ситуаций, данные температурно-ветрового зондирования атмосферы, данные метеорологических локаторов, а также расчет критериев неустойчивости. Также необходимо знание местных особенностей на территории прогнозирования.



## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Матвеев Л.Т. Основы общей метеорологии. Физика Атмосферы. – СПб.: Гидрометеиздат, 1965. – 876 с.;
2. Богаткин О.Г., Тараканов Г.Г. Основы метеорологии. Санкт-Петербург, РГГМУ, 2006 – 228 с.
3. Пряхина С. И., Котова А. А. Синоптические условия формирования снежных гроз на территории Западной Сибири // Известия Саратовского университета. Новая серия. Серия: Науки о Земле. 2021. Т. 21, вып. 3. с.166–168.
4. Лукша М.В., Новик А.А. Аэросиноптические условия образования зимних гроз на примере аэродрома Минск-2. Журнал Белорусского государственного университета. География. Геология [Электронный ресурс] – Режим доступа: [https://elibrary.ru/download/elibrary\\_49305646\\_35075967.pdf](https://elibrary.ru/download/elibrary_49305646_35075967.pdf)
5. Гроза: как образуется, причины появления, полезная информация для всех [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://gkd.ru/404954a-groza-kak-obrazuetsya-prichinyi-royavleniya-poleznaya-informatsiya-dlya-vseh>
6. Предупреждение об опасных явлениях погоды [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://meteo-orw.ru/meteobooks/Прогноз%20опасных%20явлений.pdf>
7. ГРОЗА, ГРОМ, МОЛНИЯ [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://tainaprirody.ru/atmosfera/groza>
8. Ливневые осадки [Электронный ресурс] – Режим доступа: [https://meteoinfo.ru/glossary/6193-2012-11-21-11-05-12#:~:text=Ливневые%20осадки.%20Осадки%20большой%20интенсивности%20С,\(но%20не%20всегда\)%20грозовыми%20явлениями](https://meteoinfo.ru/glossary/6193-2012-11-21-11-05-12#:~:text=Ливневые%20осадки.%20Осадки%20большой%20интенсивности%20С,(но%20не%20всегда)%20грозовыми%20явлениями)
9. С.Э. Смирнов, Ю.М. Михайлов, Г.А. Михайлова, О.В. Капустина. Особенности зимних гроз на Камчатке [Электронный ресурс] – Режим доступа:

[https://vk.com/doc137842236\\_640066486?hash=Bis7vYRMk9NotVOcqy1RYFBTeJrDUBL4RBxozs2ZR90&dl=0Sai1HUjvIlyj0FR609cs336Ioh0kulM6VN7rc9l0Lg](https://vk.com/doc137842236_640066486?hash=Bis7vYRMk9NotVOcqy1RYFBTeJrDUBL4RBxozs2ZR90&dl=0Sai1HUjvIlyj0FR609cs336Ioh0kulM6VN7rc9l0Lg)

10. Погода и метеоявления в Калининградской области [Электронный ресурс] – Режим доступа: [https://vk.com/wall-166301441\\_24255](https://vk.com/wall-166301441_24255)

11. Зимняя гроза разразилась в Назарово [Электронный ресурс] – Режим доступа: <https://tvknews.ru/publications/news/70591/>

12. Нежданная ноябрьская гроза в Перми [Электронный ресурс] – Режим доступа: <http://accident.perm.ru/index.php/novosti/68-nezhdannaya-noyabrskaya-groza-v-permi>

13. Global distribution of winter lightning: A threat to wind turbines and aircraft [Электронный ресурс] – Режим доступа: [https://www.researchgate.net/publication/304189162\\_Global\\_distribution\\_of\\_winter\\_lightning\\_A\\_threat\\_to\\_wind\\_turbines\\_and\\_aircraft](https://www.researchgate.net/publication/304189162_Global_distribution_of_winter_lightning_A_threat_to_wind_turbines_and_aircraft)