



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: «Грозовая деятельность на аэродроме Волгоград»

Исполнитель Межебурский Александр Антонович
(фамилия, имя, отчество)

Руководитель кандидат географических наук, доцент
(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)

« 5 » июня 2025 г.

Санкт-Петербург
2025

Содержание

Введение.....	2
1. Гроза как опасное явление для ВС.....	5
1.1. Методы прогнозирования гроз.....	7
2. Сбор и анализ данных о грозовой активности на аэродроме города Волгоград.....	12
2.1 Сбор данных о количестве гроз, годовой динамике и динамике по месяцам.....	12
2.2 Сбор данных о грозах по срокам 00 и 12 UTC.....	16
2.3 Расчет методов прогноза гроз и анализ успешности.....	18
3. Углубленный анализ грозовой активности на аэродроме Волгоград за 2023 год 25	
3.1 Синоптический анализ и анализ успешности методов прогноза грозовой активности.....	27
Грозовая активность 16.05.23. 12 по UTC.....	27
Грозовая активность 30.05.23. 00 по UTC.....	28
Грозовая активность 04.06.23. 00 по UTC.....	29
Грозовая активность 12.06.23. 00 по UTC.....	30
Грозовая активность 21.08.23. 12 по UTC.....	32
3.2 Анализ ложных тревог.....	34
Заключение.....	44
Список литературы.....	46

Введение

Грозовая деятельность представляет собой одно из наиболее комплексных и опасных явлений погоды для авиации. Сопровождаясь мощной конвекцией, интенсивными ливнями, шквалами, градом, сдвигами ветра и электрическими разрядами, грозы создают серьезные угрозы безопасности полетов на всех этапах, особенно критичных – взлете и посадке. Воздействие грозовых факторов может привести к потере управляемости воздушного судна, повреждению конструкций и бортового оборудования, существенному ухудшению видимости и, как следствие, к авиационным происшествиям и инцидентам. В условиях постоянно растущей интенсивности воздушного движения и ужесточения требований к регулярности рейсов, точное прогнозирование гроз и минимизация связанных с ними рисков становятся важнейшими задачами метеорологического обеспечения авиации.

Аэродром Волгоград (Гумрак), являясь значимым транспортным узлом юга России, расположен в зоне континентального климата с выраженными чертами засушливости. Для этого региона характерны жаркое лето, значительные контрасты температур и влажности воздуха в приземном слое, а также активная циклоническая деятельность в теплый период года. Эти факторы создают благоприятные предпосылки для развития интенсивной конвекции и, как следствие, частой и мощной грозовой деятельности. Однако специфика проявления гроз на данной территории – их сезонное и суточное распределение, преобладающие типы, связь с определенными синоптическими процессами и орографией местности – изучена недостаточно детализировано применительно именно к задачам авиации. Существующие климатические справочники дают общую картину, но не отражают тонких особенностей, критически важных для оперативного прогноза и предупреждения опасных явлений в районе конкретного аэродрома. Более того, эффективность стандартных методов прогнозирования гроз (на основе синоптического анализа и конвективных

индексов) в специфических условиях Волгоградского региона требует эмпирической проверки и адаптации.

Недостаток систематизированных знаний о локальных особенностях грозовой деятельности на аэродроме Волгоград, отсутствие специализированных статистических моделей и апробированных пороговых значений прогностических индексов для данного района существенно ограничивают возможности метеорологов авиаметеорологической станции (АМСГ) по выдаче точных и своевременных штормовых предупреждений. Это, в свою очередь, может приводить как к недооценке риска (пропуску опасного явления), так и к избыточным ограничениям (ложным тревогам), влекущим за собой экономические потери от задержек и отмен рейсов, а также снижению доверия к метеоинформации со стороны потребителей.

Таким образом, актуальность настоящего исследования обусловлена:

1. Высокой опасностью гроз для безопасности полетов в районе аэродрома Волгоград.
2. Спецификой регионального климата, создающего условия для активной грозовой деятельности, но требующей детального изучения применительно к аэродрому.
3. Практической потребностью в повышении точности и заблаговременности прогнозов гроз для нужд метеорологического обеспечения полетов на данном аэродроме.
4. Необходимостью оценки и минимизации доли ложных прогнозов гроз, приводящих к неоправданным экономическим издержкам.

Целью выпускной квалификационной работы является комплексное исследование особенностей грозовой деятельности на аэродроме Волгоград (Гумрак) и оценка эффективности методов ее прогнозирования для повышения качества метеорологического обеспечения авиации.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие основные задачи:

1. Сбор и анализ данных о грозовой активности за 2019–2023 гг. Формирование репрезентативной базы данных на основе метеонаблюдений на аэродроме (METAR, журналы явлений), синоптических карт и, при наличии доступа, данных метеорадаров и грозопеленгации.

2. Написание программного модуля для фильтрации и систематизации данных о грозовой активности. Разработка алгоритма и программного обеспечения (на языке Python) для автоматизированной обработки и структурирования собранной информации, обеспечения удобства ее анализа.

3. Анализ годового и суточного хода случаев грозовой деятельности на аэродроме. Выявление статистических закономерностей повторяемости гроз по месяцам, декадам, времени суток за исследуемый период.

4. Типизация случаев гроз по синоптическим условиям возникновения. Классификация зафиксированных гроз на внутримассовые и фронтальные (с выделением подтипов фронтов), выявление преобладающих синоптических сценариев, приводящих к развитию гроз в районе аэродрома.

5. Апробация методов прогнозирования гроз и оценка их эффективности. Расчет и анализ значений ключевых конвективных индексов (SWEAT, индекс Вайтинга и т.д.) для случаев развития и отсутствия гроз по данным аэрологического зондирования. Определение их прогностической силы и оценка доли ложных тревог при использовании данных индексов.

1. Гроза как опасное явление для ВС

Гроза - атмосферное явление, в связи с которым в облаках появляются многократные электрические разряды в виде молний, влекущих за собой гром. Грозовая деятельность является результатом развития мощных кучево-дождевых облаков. [1]

Под необходимым условием для грозовой деятельности подразумевается наличие влагонестойчивого состояния воздушной массы (ВМ). Кучево-дождевые облака появляются в результате интенсивных восходящих потоков влажного воздуха. Эти потоки образуются путем термической конвекции, которая в свою очередь является вынужденным поднятием воздуха и вытеснением вверх теплого воздуха на атмосферные фронты.

Грозовая активность в теплое полугодие (март–август) представляет собой критический фактор, влияющий на безопасность авиационных перелетов, устойчивость работы аэродромной инфраструктуры и эффективность управления воздушным движением [7]. Для аэродрома г. Волгоград, расположенного в зоне континентального климата с выраженной засушливостью и резкими температурными контрастами, изучение гроз в период 2019–2023 гг. приобретает особое значение.

Регион характеризуется интенсивной конвекцией в теплый сезон, обусловленной прогревом подстилающей поверхности, адвекцией влаги с Каспийского моря и частым взаимодействием воздушных масс разного происхождения. Эти условия создают предпосылки для формирования опасных метеоявлений, включая шквалы, град и интенсивные электрические разряды, которые напрямую угрожают авиационной безопасности [3].

Классификация гроз по условиям возникновения:

- внутримассовые;
- фронтальные.

Внутримассовые грозы - кратковременные, в основном возникающие примерно в 15-19 часов, имеют очаговый характер. Перемещаются со скоростью

5-25 км/час в направлении ведущего потока на высотах 3-5 км. Внутримассовые грозы подразделяются на конвективные, адвективные и орографические [2].

Типичными синоптическими процессами для формирования гроз являются: тыловая часть циклона, седловина, восточная периферия антициклона, размытые барические системы, заполняющиеся циклоны. Предвестниками гроз являются башенкообразные и хлопьевидные высоко кучевые облака, большая величина абсолютной влажности 12-15 г/м³ и более высокая температура 20-25° в утренние часы.

Фронтальные грозы - наиболее активны, большой горизонтальной протяженности, на радиолокаторе вытянутые засветки вдоль фронта. Обойти их трудно. Если на экране локатора отмечаются пальцеобразные засветки — это характерно для града.

Грозовая деятельность на атмосферном фронте тем интенсивнее, чем больше разность температур между ВМ и чем больше влагосодержание теплой ВМ [1]. Грозовые облака бывают сосредоточены вдоль линии фронта шириной от 30 до 50 км, протяженность может достигать 1000 км. Перемещаются эти грозы вместе с фронтом [2].

Фронтальные грозы подразделяются на грозы холодного фронта, теплого фронта и фронтов окклюзии.

Грозы на холодном фронте возникают над поверхностью холодного фронта. Эти грозы растянуты вдоль линии фронта и имеют ширину 50-70 км. Средняя скорость смещения грозовых зон составляет 30-40 км/ч, но иногда они могут смещаться и со скоростью 100 км/ч. Грозы на ХФ усиливаются во второй половине дня и ослабевают ночью.

Грозы на теплом фронте наблюдаются редко. Они возникают при подъеме теплого и влажного воздуха.

Грозы на теплом фронте усиливаются ночью и ослабевают в дневное время. Это можно объяснить тем, что в ночное время верхняя граница облачности перестает «нагреваться» и начинает излучать тепло. В результате температура верхней границы облачности понижается, что приводит к

увеличению вертикального градиента температуры в облаке, появлению неустойчивой стратификации и возникновению кучево-дождевой облачности вместо слоисто-дождевой.

Грозы на фронтах окклюзии могут наблюдаться в любое время суток, но чаще они возникают на холодных фронтах окклюзии, а следовательно, во второй половине дня [1].

1.1. Методы прогнозирования гроз

Метод Вайтинга считается одним из наиболее точным методом для прогноза гроз, когда речь идет не о прогнозе в конкретном пункте, а по площади. Основан на расчете параметра K по данным утреннего температурно-ветрового зондирования.

Вероятность образования гроз рассчитывается по следующей формуле:

$$K = 2T850 - T500 - D850 - D700 \quad (1.1)$$

где, K – коэффициент метода Вайтинга

T – температура на изобарической поверхности;

D – дефицит температуры точки росы на изобарической поверхности

Вероятность развития грозы оценивается по следующей таблице:

Таблица 1 - Градации оценки метода Вайтинга

Значение K	Оценка
$K < 20$	Без гроз. Площадь: —
$20 < K < 25$	Отдельные изолированные грозы. Площадь: $\leq 10\%$
$25 < K < 30$	Несколько гроз. Площадь: 10-20%

Значение К	Оценка
$30 < K < 35$	Рассеянные грозы. Площадь: 20-50%
$35 < K < 40$	Многочисленные грозы. Площадь: 50-70%
$K > 40$	Грозы повсеместно. Площадь: >70%

Индекс неустойчивости SWEAT Severe Weather Threat Index (SWEAT) служит комплексным критерием для диагностики и прогноза опасных погодных явлений (включая грозы), связанных с конвективной облачностью, а также для оценки скорости и сдвига ветра. Рассчитывается по следующей формуле:

$$SWEAT = 12 \cdot Td_{850} + 20 \cdot (TT - 49) + 3,888 \cdot v_{850} + 1,944 \cdot v_{500} + (125 \cdot [\sin(D_{500} - D_{850}) + 0,2]) \quad (1.2)$$

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;

Оценка вероятности грозы приведена в таблице ниже:

Таблица 2 - Градации оценки метода SWEAT

Значение SWEAT	Оценка
$SWEAT < 250$	Нет условий для возникновения сильных гроз.
$250 < SWEAT < 350$	Есть условия для сильных гроз, града и шквалов.

Значение SWEAT	Оценка
$351 < \text{SWEAT} < 500$	Есть условия для очень сильных гроз, крупного града, сильных шквалов, смерчей.
$\text{SWEAT} > 500$	Есть условия для очень сильных гроз, крупного града, сильных шквалов, сильных смерчей.

Метод Vertical Totals (VT) обозначает статическую устойчивость или вертикальный градиент температуры в слое 850 и 500 гПа.

Рассчитывается по следующей формуле:

$$VT = T_{850} - T_{500} \quad (1.3)$$

где, VT – рассчитываемый индекс Vertical Totals;

T_{850} – температура на изобарической поверхности 850 гПа;

T_{500} – температура на изобарической поверхности 500 гПа.

Если значения $VT \leq 28$, то вероятность грозы мала.

Метод Cross Totals (CT) использует соотношение температуры точки росы (T_d) на уровне 850 гПа и температуры воздуха (T) на уровне 500 гПа.

Рассчитывается по следующей формуле:

$$CT = T_{d850} - T_{500} \quad (1.4)$$

где, CT – рассчитываемый индекс Cross Totals;

T_{d850} – температура точки росы на изобарической поверхности 850 гПа;

T_{500} – температура воздуха на изобарической поверхности 500 гПа.

В таблице ниже дается оценка вероятности грозовой деятельности:

Таблица 3 - Градации оценки метода СТ

Значение СТ	Оценка
СТ < 18	Низкий потенциал конвективной неустойчивости. Грозовая деятельность отсутствует.
18 < СТ < 19	Умеренная неустойчивость. Слабая грозовая деятельность.
20 < СТ < 21	Сильная неустойчивость. Умеренные грозы.
22 < СТ < 23	Очень сильная неустойчивость. Возможны сильные грозы.
24 < СТ < 25	Высокая энергия неустойчивости. Сильные грозы.
СТ > 25	Очень высокая энергия неустойчивости. Очень сильные грозы.

Метод Total Totals (ТТ) включает в себя рассмотренные выше для показателя: Vertical Totals (VT) и Cross Totals (СТ).

Используется для прогноза очагов грозовой активности и рассчитывается по следующей формуле:

$$TT = VT + CT \quad (1.5)$$

Вероятность развития грозы оценивается по следующей таблице:

Таблица 4 - Градации оценки метода ТТ

Значение ТТ	Оценка
$ТТ < 44$	Грозовая деятельность невозможна.
$44 < ТТ < 45$	Отдельная гроза или несколько гроз.
$46 < ТТ < 47$	Рассеянные грозовые очаги.
$48 < ТТ < 49$	Значительное количество гроз, отдельные - сильные.
$50 < ТТ < 51$	Рассеянные сильные грозовые очаги, отдельные очаги со смерчем.
$52 < ТТ < 55$	Значительное количество очагов сильных гроз, отдельные очаги со смерчем.
$ТТ > 55$	Многочисленные сильные грозы с сильными смерчами.

2. Сбор и анализ данных о грозовой активности на аэродроме города Волгоград

2.1 Сбор данных о количестве гроз, годовой динамике и динамике по месяцам

Первостепенной задачей для анализа грозовой активности является сбор информации о явлении и предоставление его годового хода (в период с 2019 по 2023 гг.).

Для этого была собрана, с помощью мною написанного программного блока на языке программирования Python, база данных с сайта Ogimet. Метеорологический авиационный метеорологический код для передачи сводок о фактической погоде на аэродроме METAR за каждый месяц теплого полугодия (март-август) каждого года выгружался в отдельный текстовый документ, наименование которого прописывалось в коде, после чего обрабатывался кодом на наличие гроз (TS в коде METAR), с обязательным условием, что явление должно было фиксироваться до блока TEMPO (прогнозируемые временные изменения метеоусловий).

Далее производился подсчет случаев грозовой активностью по срокам в каждом месяце теплого полугодия с 2019 по 2023 год. Если интервал времени между фиксациями грозовой активности составлял менее одного часа тридцати минут, то данные фиксации объединялись в один случай, в противном случае разделялись на разные случаи.

aer.20	METAR URWW 300300Z 30003MPS CAVOK 13/11 Q1020 RETS R24/010070 TEMPO BKN004=	9
	METAR URWW 300230Z 31002MPS CAVOK 14/12 Q1020 RETS R24/010070 TEMPO 1000 BR BKN004=	
	METAR URWW 300200Z 30002MPS CAVOK 13/12 Q1020 RETS R24/010070 TEMPO 1000 BR BKN004=	
	METAR URWW 300130Z 31002MPS CAVOK 13/11 Q1020 RETS R24/010070 TEMPO BKN004=	
	METAR URWW 300100Z 30002MPS CAVOK 14/11 Q1020 RETS R24/010070 TEMPO BKN004=	
	METAR URWW 300030Z 32002MPS CAVOK 14/11 Q1019 RETS R24/010070 TEMPO BKN004=	
	METAR URWW 300000Z 28001MPS CAVOK 13/10 Q1019 RETS R24/010070 TEMPO BKN004=	
	METAR URWW 292330Z 27002MPS CAVOK 13/11 Q1019 RETS R24/010070 TEMPO BKN004=	
	METAR URWW 292300Z 28002MPS CAVOK 15/12 Q1019 RETS R24/010070 TEMPO BKN004=	
	METAR URWW 292230Z 30002MPS CAVOK 15/12 Q1019 RETS R24/010070 NOSIG=	
	METAR URWW 292200Z 30003MPS CAVOK 15/12 Q1019 RETS R24/010070 NOSIG=	
	METAR URWW 292130Z 29003MPS CAVOK 15/12 Q1019 RETS R24/010070 NOSIG=	
	METAR URWW 292100Z 29003MPS CAVOK 15/12 Q1018 RETS R24/010070 NOSIG=	
	METAR URWW 292030Z 28002MPS CAVOK 16/12 Q1019 RETS R24/010070 NOSIG=	
	METAR URWW 292000Z 29002MPS CAVOK 16/12 Q1018 RETS R24/010070 NOSIG=	
	METAR URWW 291930Z 30002MPS CAVOK 17/12 Q1018 RETS R24/010070 NOSIG=	
	METAR URWW 291900Z 28002MPS CAVOK 17/12 Q1018 RETS R24/010070 NOSIG=	
	METAR URWW 291830Z 31002MPS CAVOK 17/12 Q1018 RETS R24/010070 NOSIG=	
	METAR URWW 291800Z 32003MPS CAVOK 17/12 Q1018 RETS R24/010070 NOSIG=	
	METAR URWW 282100Z 35003MPS 9999 VCTS SCT060CB 18/14 Q1011 RETS R06/010070 TEMPO -TSRAGR BKN005 BKN030CB=	
	METAR URWW 282030Z 03005MPS 9999 VCTS SCT050CB 18/14 Q1010 RETS R06/010070 TEMPO -TSRAGR BKN005 BKN030CB=	
	METAR URWW 282000Z 35005MPS 300V040 9999 TS SCT049CB 20/14 Q1010 R06/010070 TEMPO -TSRAGR BKN030CB=	
	METAR URWW 281300Z 03008MPS 9999 VCTS SCT056CB 21/15 Q1009 R06/010070 TEMPO VRB13G18MPS 2000 TSRAGR BKN005 BKN030CB=	
	METAR URWW 281230Z 01006G11MPS 310V060 9000 -TSRA BKN050CB 19/17 Q1009 R06/010070 TEMPO VRB13G18MPS 2000 TSRAGR BKN005 BKN030CB=	
	METAR URWW 281200Z 14004MPS 9999 -TSRA BKN041CB 27/16 Q1008 R06/010070 TEMPO VRB11G16MPS 2000 TSRAGR BKN005 BKN030CB=	
	METAR URWW 1211600Z 36004MPS 9999 SCT046CB 20/16 Q1008 RETSRA R06/290160 TEMPO VRB16MPS 0700 +TSRAGR SQ BKN003 BKN030CB=	
	METAR URWW 121130Z 05004MPS 020V100 9000 -TSRA BKN031CB 20/15 Q1009 R06/290160 TEMPO VRB16MPS 0700 +TSRAGR SQ BKN003 BKN030CB=	
	METAR URWW 1211300Z 31005MPS 9999 BKN060CB 28/11 Q1007 RETS R24/010060 TEMPO VRB11G16MPS 0700 +TSRAGR BKN003 SCT030CB=	
	METAR URWW 1211230Z 33005MPS 300V360 9999 BKN060CB 28/10 Q1007 RETS R24/010060 TEMPO VRB11G16MPS 0700 +TSRAGR BKN003 SCT030CB=	
	METAR URWW 121130Z 23005MPS 190V300 9999 VCTS SCT060CB 31/08 Q1007 R24/010060 TEMPO VRB11G16MPS 0700 +TSRAGR BKN003 SCT030CB=	
	METAR URWW 0711630Z 01006MPS 9999 VCTS SCT066CB 31/14 Q1013 R06/010060 TEMPO 1000 TSRAGR BKN004 BKN030CB=	
	METAR URWW 071130Z 36006MPS 300V060 9999 BKN///CB 35/10 Q1013 RETS R06/010060 TEMPO 1000 TSRAGR BKN004 BKN030CB=	
	METAR URWW 071100Z 36007MPS 330V040 9999 TS BKN060CB 34/12 Q1013 R06/010060 TEMPO 1000 TSRAGR BKN004 BKN030CB=	
	METAR URWW 051530Z 05008MPS 9999 SCT056CB 31/14 Q1011 RETS R06/010060 TEMPO VRB15MPS 1000 TSRAGR SQ BKN004 BKN030CB=	
	METAR URWW 051500Z 03009MPS 9999 VCTS SCT056CB 31/14 Q1011 R06/010060 TEMPO VRB15MPS 1000 TSRAGR SQ BKN004 BKN030CB=	
	METAR URWW 020830Z 28009MPS 9999 -TSRA SCT050CB 23/11 Q1008 R24/010060 TEMPO VRB20MPS 0700 +TSRAGR SQ BKN003 BKN020CB=	
	METAR URWW 020800Z 27004MPS 240V320 9999 TS SCT050CB 25/10 Q1008 R24/010060 TEMPO VRB15MPS 1000 TSRAGR SQ BKN005 BKN030CB=	

Рисунок 1 - Пример базы данных на основе кода METAR

```

1 def read_text_file(file_path):
2     with open(file_path, 'r') as file:
3         return file.read()
4
5 def find_thunderstorms(text):
6     # Разделяем текст на строки
7     lines = text.split('\n')
8     # Ищем строки, содержащие подстроку 'TS', но не после 'ТЕМПО'
9     thunderstorm_lines = []
10    for line in lines:
11        if 'TS' in line and 'ТЕМПО' not in line.split('TS')[0]:
12            thunderstorm_lines.append(line)
13    # Выводим найденные строки в терминале
14    for line in thunderstorm_lines:
15        print(line)
16
17 # Путь к текстовому файлу
18 file_path = 'D:\ВУЗ\ДИПЛОМ\месяцгроз.txt'
19 # Читаем текст из файла
20 text = read_text_file(file_path)
21 # Вызываем функцию для поиска строк с грозами
22 find_thunderstorms(text)

```

Рисунок 2 - Часть программного блока для анализа кода METAR

Далее, после завершения сбора информации, была составлена таблица (табл. 1) с подсчетами случаев грозовой активности суммарно за года

исследования, суммарно по месяцам каждого года исследования, общее количество грозовой активности за пять лет, а также среднее число гроз.

Таблица 5 - Статистика грозовой активности (2019–2023)

	март	апрель	май	июнь	июль	август	Сумма по годам
2019	1	5	10	3	13	2	34
2020	0	0	3	9	5	9	26
2021	0	7	6	13	12	11	49
2022	0	8	3	7	15	4	37
2023	2	4	9	11	10	6	42
Сумма по месяцам	3	24	31	43	55	32	188

Среднее	38
----------------	-----------

Затем, также на языке программирования Python, были визуализированы данные из этой таблицы.

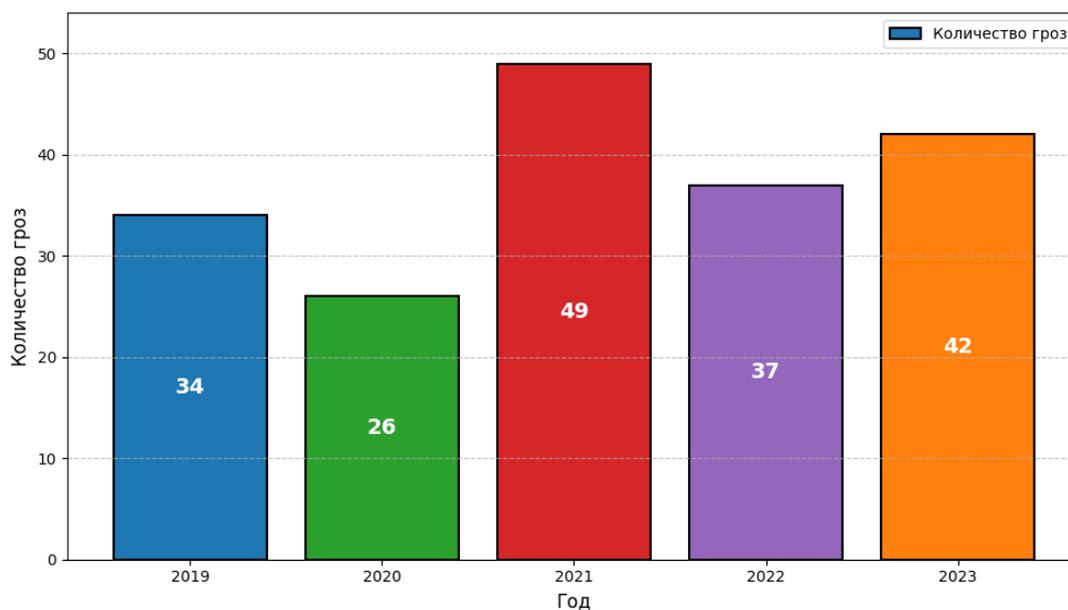


Рисунок 3 - Число случаев гроз по годам с 2019 – 2023 года

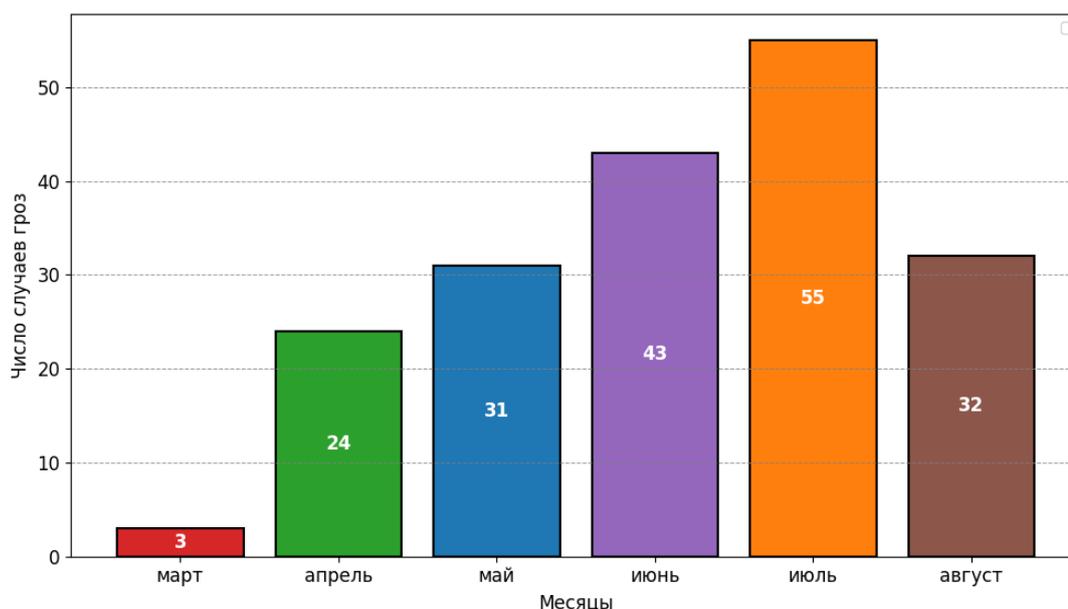


Рисунок 4 - Число случаев гроз по месяцам за 2019 – 2023 года

```
import matplotlib.pyplot as plt
import seaborn as sns
import numpy as np

months = ['март', 'апрель', 'май', 'июнь', 'июль', 'август']
average = [0.6, 4.8, 6.2, 8.6, 11, 6.4] # среднее за 5 лет
data_2023 = [2, 4, 9, 11, 10, 6]

plt.figure(figsize=(12, 6))
```

Рисунок 5 - Пример части кода визуализации данных на графиках

Из графика динамики гроз по годам (рис. 3), можно сделать вывод что количество гроз за пять лет имеет общую тенденцию к росту: с 34 в 2019 году до 42 в 2023 году, несмотря на колебания (спад до 26 в 2020 году и пик в 49 в 2021 году).

Второй график динамики гроз по месяцам за пять лет (рис. 4) иллюстрирует закономерность: число гроз в Волгограде растет с марта по июль, достигая пика в 55 случаев в июле благодаря максимальному теплу и влаге, а

затем снижается до 32 в августе из-за охлаждения и изменения погодных условий.

2.2 Сбор данных о грозах по срокам 00 и 12 UTC

Далее для анализа были отобраны уже из собранной, общей базы гроз, те случаи, которые были взяты по срокам 00 и 12 UTC или приближенны к ним с интервалом ± 1.5 часа, чтобы можно было захватить большее число явлений, но при этом не выйти за интервал влияния явления на регион исследования. Также данные сроки были взяты так как метеорологические центры выпускают прогнозы на базе данных 00 и 12 UTC и данные радиозонда поступают по тем же срокам, что позволяет получить более точные данные для дальнейшего расчета методов прогноза гроз.

июн.21		9
	METAR URWW 182300Z 09007MPS 9999 SCT056CB 19/10 Q1023 RETS R06/010070 TEMPO 1000 TSRAGR BKN020CB=	
	METAR URWW 141330Z 09007MPS 9999 TS BKN040CB 24/17 Q1013 R06/010070 TEMPO 1000 TSRAGR BKN004 BKN030CB=	
	METAR URWW 111100Z 26003MPS 9999 SCT060CB 24/15 Q1011 RETS R06/290060 TEMPO 1000 TSRAGR BKN005 BKN020CB=	
	METAR URWW 101130Z VRB01MPS 9999 BKN043CB 20/13 Q1010 RETS R24/290060 TEMPO VRB20MPS 0600 +SHRA SQ BKN003 BKN020CB=	
	METAR URWW 081200Z 30005MPS 260V330 9999 TS BKN040CB 22/11 Q1011 R24/010070 TEMPO VRB20MPS 1000 TSRAGR SQ BKN004 BKN020CB=	
	METAR URWW 051100Z 20004MPS 170V230 9999 -TSRA BKN012CB 17/14 Q1013 R24/290060 TEMPO 1000 TSRAGR BKN003 BKN020CB=	
	METAR URWW 031300Z 35006MPS 9999 BKN017CB 18/15 Q1011 RETSRA R24/290060 TEMPO VRB16MPS 0500 +TSRAGR SQ BKN004 BKN020CB=	
	METAR URWW 021130Z 06009MPS 9999 -SHRA SCT051CB 17/16 Q1008 RETSRA R06/290050 TEMPO 0500 +TSRAGR=	
	METAR URWW 020030Z 07007MPS 9999 TS SCT046CB 18/15 Q1008 R06/290055 TEMPO VRB13G19MPS 0500 +TSRAGR BKN003 BKN020CB=	

Рисунок 6 - Часть базы данных с отображенными случаями гроз по срокам 00 и 12 UTC

Для отбора данных для случаев грозовой активности в 00 и 12 UTC также был написан программный модуль (рис. 7), который анализировал уже отобранные ранее случаи гроз из кодов METAR и отсеивал все случаи кроме 00 и 12 UTC в диапазоне ± 1.5 часа. Программа работает по тому же принципу, что и программа, которая отбирала из всех сводок METAR только те, что с грозами, только здесь в отдельный текстовый документ были помещены все отсортированные сводки с грозами и уже они проходили повторную сортировку с вышеописанными критериями. Итоговый результат выводится в консоли (рис.

8) в среде разработки, в которой и написан код, и заносится в текстовый документ для использования в дальнейшем анализе.

```
    # Обработка заголовка месяца
    if any(month in line for month in months):
        month_str = line.split('.')[0]
        current_month = months.get(month_str[:3])
        continue

    # Обработка METAR
    if line.startswith('METAR'):
        parts = line.split()
        timestamp = parts[2] # Формат DDhhmmZ
        day = int(timestamp[:2])
        hour = int(timestamp[2:4])
        # Фильтруем ТОЛЬКО сроки 00 и 12 UTC
        if hour in [0, 12]:
            thunder_dates.add((current_month, day, hour))

# Генерация всех сроков 00/12 UTC за период
start_date = datetime(2023, 3, 1)
end_date = datetime(2023, 8, 31)
target_hours = [0, 12] # Только ключевые сроки

all_dates = set()
current = start_date
while current <= end_date:
    for hour in target_hours:
        all_dates.add((current.month, current.day, hour))
        current += timedelta(days=1)
```

Рисунок 7 - Часть программного модуля для отбора случаев гроз по срокам 00 и 12 UTC

```
12.03 00:00 UTC
12.03 12:00 UTC
13.03 00:00 UTC
13.03 12:00 UTC
14.03 00:00 UTC
14.03 12:00 UTC
15.03 00:00 UTC
15.03 12:00 UTC
16.03 00:00 UTC
16.03 12:00 UTC
17.03 00:00 UTC
17.03 12:00 UTC
18.03 00:00 UTC
```

Рисунок 8 - Часть консоли с выведенными значениями

2.3 Расчет методов прогноза гроз и анализ успешности

Следующим пунктом в сборе и анализе данных стал расчет методов прогноза гроз, описанных выше. Их расчет позволит оценить их эффективность и надежность в прогнозировании гроз в регионе города Волгоград.

Для этого также же был разработана программа (рис. 9), которая позволяет рассчитать нужные методы.

```
tt = (temperature_850 - temperature_500) + (dewpoint_850 - temperature_500)
# Преобразование направлений ветра в радианы
delta_direction_rad = math.radians(wind_direction_500 - wind_direction_850)
# Расчет SWEAT
sweat = (
    12 * dewpoint_850
    + 20 * (tt - 49)
    + 3.888 * wind_speed_850
    + 1.944 * wind_speed_500
    + 125 * (math.sin(delta_direction_rad) + 0.2)
)
return round(sweat, 2)

def interpret_sweat_index(sweat):
    """Интерпретация SWEAT."""
    if sweat < 250:
        return "Нет условий для сильных гроз"
    elif 250 <= sweat < 350:
        return "Условия для сильных гроз/града/шквалов"
    elif 351 <= sweat < 500:
        return "Условия для очень сильных гроз/крупного града/смерчей"
    else:
        return "Экстремальные условия для суперячеек"

def calculate_whiting_index(temperature_850, temperature_500, dewpoint_850,
                           temperature_700, dewpoint_700):
    """Расчет индекса Вайтинга (Ki): Ki = T850 - T500 + Td850 - (T700 - Td700)"""
    delta_td700 = temperature_700 - dewpoint_700
    ki = temperature_850 - temperature_500 + dewpoint_850 - delta_td700
    return ki

def interpret_whiting_index(ki):
```

Рисунок 9 - Часть программного кода для расчета методов прогноза гроз

Изначально программа представляла собой некий “калькулятор”, который через консоль (рис. 10) позволял пользователю выбрать один из предложенных методов, затем программа запрашивает нужные для расчета того или иного метода данные, например температура на изобарической поверхности 850 гПа, температура точки росы на изобарической поверхности 700 гПа и т.д.

```
Система расчета конвективных индексов для аэродрома Волгоград
=====
Выберите индекс для расчета:
1. SWEAT
2. Вайтинга (Ki)
3. Total Totals (TT)
4. Vertical Totals (VT)
5. Cross Totals (CT)
0. Выход

Ваш выбор: 
```

Рисунок 10 - Консоль программы, в которой производится выбор метода

Затем программа исходя из выбора пользователя запрашивала нужные для расчета данные, после ввода данных программа производила расчет и исходя из загруженных в нее изначально градаций методов делала вывод и выводила его на консоль (рис. 11).

```
Ваш выбор: 4

[РАСЧЕТ ИНДЕКСА VERTICAL TOTALS]
Температура на 850 гПа (°C): 15
Температура на 500 гПа (°C): -12

Результат: VT = 27.0 → Малая вероятность гроз
```

Рисунок 11 - Консоль программы, в которой производится расчет выбранного метода и вывод результата

Эта программа значительно облегчает расчет методов, но, если задача состоит в том, чтобы сосчитать либо определенный метод или же методы в малом количестве.

Задача же данной работы была в том, чтобы проанализировать большое количество данных и поэтому было принято решение модернизировать программу.

Вместо консоли, которая выводила перечень методов, которые пользователь мог выбрать, теперь программа через консоль (рис. 12) сразу

начинала запрашивать все требуемые для расчета значения для всех методов, что должны быть рассчитаны.

```
Введите метеорологические данные для расчёта индексов грозовой активности
=====
Температура на 850 гПа (°C): 20
Температура на 700 гПа (°C): 7
Температура на 500 гПа (°C): -11
Точка росы на 850 гПа (°C): 14.36
Точка росы на 700 гПа (°C): 3.79
Скорость ветра на 850 гПа (м/с): 8
Скорость ветра на 500 гПа (м/с): 10
Направление ветра на 850 гПа (°): 330
Направление ветра на 500 гПа (°): 0
```

Рисунок 12 - Консоль программы, в которой производится расчет всех методов одновременно.

Соответственно, данная программа в консоли с выводом результатов (рис. 13) выдавала расчет и анализ по градациям сразу для всех методов, что значительно ускорило расчет методов, так как надобность переключаться между методами после расчета пропала.

```
Результаты расчёта индексов грозовой активности:
=====
Индекс Вайтинга (Ki): 42.1 - Грозы повсеместно. Площадь: >70%
Индекс SWEAT: 457.56 - Есть условия для очень сильных гроз, крупного града, сильных шквалов, смерчей.
Индекс Total Totals (TT): 56.4 - Многочисленные сильные грозы с сильными смерчами.
Индекс Vertical Totals (VT): 31.0 - Грозы вероятны.
Индекс Cross Totals (CT): 25.4 - Очень высокая энергия неустойчивости. Очень сильные грозы.
```

Рисунок 13 - Консоль программы, в которой производится итоговый вывод расчета всех методов.

По итогам расчётов была собрана база данных (рис. 13), в которой представлены результаты всех методов по всем интересующим срокам.

дата случая	sweat	вайтинг
27 апреля 2019 13 UTC	86.81 - Нет условий для возникновения сильных гроз.	18.4 - Без гроз. Площадь: —
15 апреля 2019 13 UTC	268.66 - Есть условия для сильных гроз, града и шквалов.	28.8 - Несколько гроз. Площадь: 10-20%
26 мая 2019 12 UTC	195.05 - Нет условий для возникновения сильных гроз.	32.6 - Рассеянные грозы. Площадь: 20-50%
13 мая 2019 12	490.95 - Есть условия для очень сильных гроз, крупного града, сильных шквалов, смерчей.	40.5 - Грозы повсеместно. Площадь: >70%
2 мая 2019 00	208.39 - Нет условий для возникновения сильных гроз.	26.8 - Несколько гроз. Площадь: 10-20%
16 июня 2019 00	-26.17 - Нет условий для возникновения сильных гроз.	26.7 - Несколько гроз. Площадь: 10-20%
30 июля 2019 1230	49.12 - Нет условий для возникновения сильных гроз.	22.6 - Отдельные изолированные грозы. Площадь: ≤10%
29 июля 2019 13	-3.12 - Нет условий для возникновения сильных гроз.	23.0 - Отдельные изолированные грозы. Площадь: ≤10%
22 июля 2019 1230	-23.33 - Нет условий для возникновения сильных гроз.	22.9 - Отдельные изолированные грозы. Площадь: ≤10%
9 июля 2019 01	304.46 - Есть условия для сильных гроз, града и шквалов.	37.0 - Многочисленные грозы. Площадь: 50-70%
2 июля 2019 2330	258.44 - Есть условия для сильных гроз, града и шквалов.	32.5 - Рассеянные грозы. Площадь: 20-50%
19 августа 2019 1230	-104.25 - Нет условий для возникновения сильных гроз.	15.2 - Без гроз. Площадь: —
18 августа 2019 1230	-24.69 - Нет условий для возникновения сильных гроз.	23.1 - Отдельные изолированные грозы. Площадь: ≤10%

Рисунок 14 - Часть базы данных с анализом методов прогноза гроз за 2019-2023
ГОД

В базе данных, для удобства чтения, цветом выделены успешные прогнозы по определенному методу (зеленый цвет) и не успешные прогнозы (красный цвет). После анализа данной базы данных была создана итоговая таблица (табл. 2) демонстрирующая успешность прогнозов по разным методам.

Таблица 6 - Успешность прогнозов по методам

год	всего гроз	метод	успешные	процент успешных
2019	13	SWEAT	4	31
		Вайтинг	11	85
		ТТ	8	62
		СТ	7	54
		VT	6	46
год	всего гроз	метод	успешные	процент успешных
2020	12	SWEAT	1	8
		Вайтинг	9	75
		ТТ	9	75
		СТ	6	50
		VT	9	75
год	всего гроз	метод	успешные	процент успешных
2021	23	SWEAT	8	35
		Вайтинг	23	100
		ТТ	23	100
		СТ	21	91
		VT	15	65
год	всего гроз	метод	успешные	процент успешных
2022	17	SWEAT	2	12
		Вайтинг	14	82
		ТТ	15	88
		СТ	14	82
		VT	10	59
год	всего гроз	метод	успешные	процент успешных
2023	16	SWEAT	4	25
		Вайтинг	15	94
		ТТ	15	94
		СТ	12	75
		VT	8	50
итог	всего гроз	метод	успешные	процент успешных
	81	SWEAT	19	23
		Вайтинг	72	89
		ТТ	70	86
		СТ	60	74
		VT	48	59

На основании данных за пятилетний период, включающий 81 грозу в сроки 00 и 12 UTC, можно сделать следующие выводы:

Метод Вайтинг продемонстрировал наивысшую общую эффективность, достигнув 89% успешных прогнозов (72 из 81 случая). Он также показал исключительную стабильность, с результатами от 75% до 100% ежегодно, включая идеальный показатель в 2021 году.

Метод ТТ также показал хорошую эффективность с результатом 86% (70 успешных прогнозов). Он также отличался высокой стабильностью (от 62% до 100% по годам).

Метод СТ показал среднюю общую эффективность на уровне 74% (60 успешных прогнозов), хотя его результаты по годам варьировались заметнее (от 50% до 91%).

Метод VT показал умеренную общую эффективность в 59% (48 успешных прогнозов). При этом его результаты в последние годы (2022-2023) имели тенденцию к снижению (50-59%) по сравнению с более ранним периодом (46-65% в 2019-2021).

Метод SWEAT оказался наименее эффективным, с общей успешностью всего 23% (19 прогнозов). Он значительно и стабильно уступал всем другим методам каждый год, демонстрируя особенно низкие результаты в 2020 (8%) и 2022 (12%) годах, а его максимальный результат за период составил лишь 35% (2021 год).

Таким образом, методы Вайтинг и ТТ зарекомендовали себя как наиболее надежные и стабильные методы прогнозирования гроз в анализируемый период, значительно превосходя остальные. Метод СТ показал приемлемую, но более вариативную эффективность. Метод VT продемонстрировал умеренную результативность с признаками снижения в последние годы. Метод SWEAT показал себя как наименее эффективный и требует серьезного пересмотра или дополнения. Наглядные результаты представлены на диаграмме, ниже также созданной с помощью языка программирования Python.

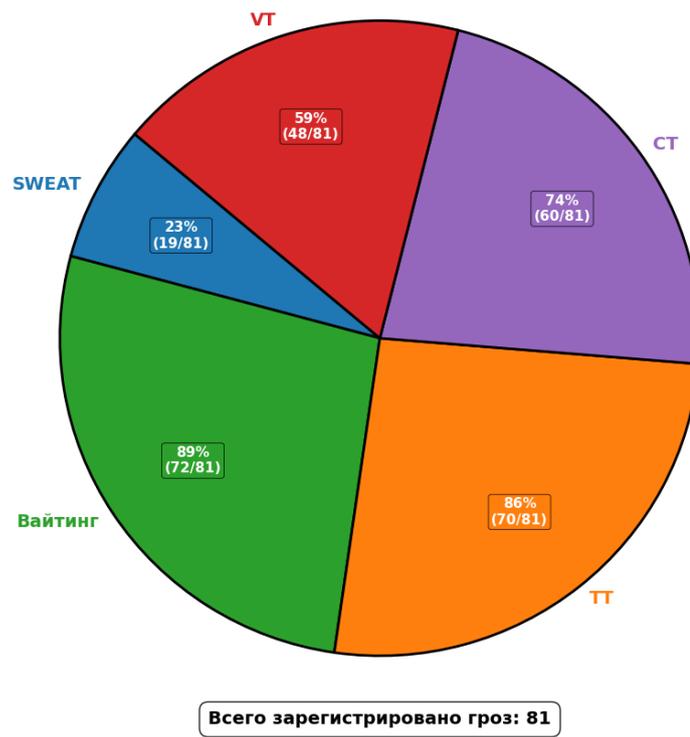


Рисунок 15 - Диаграмма успешности методов прогнозов

3. Углубленный анализ грозовой активности на аэродроме Волгоград за 2023 год

Выбор 2023 года в качестве основного объекта исследования грозовой активности обусловлен совокупностью следующих критериев:

Актуальность данных: 2023 год является наиболее “свежим” в доступном ряду наблюдений (2019–2023 гг.). Анализ этого периода предоставляет самую актуальную информацию о текущих особенностях грозообразования и их прогнозирования.

Значительная грозовая активность: Количество зафиксированных гроз в 2023 году (42 случая) является одним из самых высоких в рассматриваемом периоде (2019-2023), уступая лишь аномальному 2021 году (49 случаев). Такое большое количество событий формирует обширную и репрезентативную выборку, достаточную для проведения статистически значимого и точного анализа различных аспектов грозовой деятельности.

Фокус на типичных условиях и восполнение пробела: В отличие от экстремального и интенсивно изученного 2021 года, синоптические условия и прогностические аспекты грозовой активности 2023 года, несмотря на высокую интенсивность, исследованы существенно меньше. Выбор 2023 года позволяет избежать дублирования выводов, сделанных для уникальной ситуации 2021 года, и сосредоточиться на анализе гроз в условиях, более близких к климатической норме последних лет, тем самым восполняя существующий исследовательский пробел.

Далее была собрана отдельная база данных для 2023 года в которой помимо рассчитанных ранее методов прогноза гроз добавился еще и анализ гроз по синоптическим условиям возникновения.

Месяц	вид грозы	SWEAT	Вайтинг
22 апреля 12	внутримассовая	182.74. Низкая вероятность сильной грозы.	27.64. Несколько гроз. Площадь: 10-20%
30 мая 00	фронтальная (холодный фронт)	290.49. Есть условия для сильных гроз, града и шквалов.	33.39. Рассеянные грозы. Площадь: 20-50%
27 мая 12 (11:30)	фронтальная(окклюзия)	251.53. Есть условия для сильных гроз, града и шквалов.	33.92. Рассеянные грозы. Площадь: 20-50%
16 мая 12	внутримассовая	265.57. Есть условия для сильных гроз, града и шквалов.	26.94. Несколько гроз. Площадь: 10-20%
15 мая 12	внутримассовая	173.15. Нет условий для возникновения сильных гроз.	29.18. Несколько гроз. Площадь: 10-20%
6 мая 12	фронтальная (хф)	134.26. Нет условий для возникновения сильных гроз.	25.21. Несколько гроз. Площадь: 10-20%
5 мая 12 (13:00)	фронтальная (окклюзия)	34.06. Нет условий для возникновения сильных гроз.	27.38. Несколько гроз. Площадь: 10-20%
16 июня 00	фронтальная (окклюзия)	164.45. Нет условий для возникновения сильных гроз.	39.06. Многочисленные грозы. Площадь: 50-70%
12 июня 00 (2300 МЕТАР)	фронтальная (хф)	285.05. Есть условия для сильных гроз, града и шквалов.	35.77. Многочисленные грозы. Площадь: 50-70%
4 июня 00	фронтальная (тф)	135.98. Нет условий для возникновения сильных гроз.	17.05. Без гроз. Площадь: —
16 июля 12	фронтальная? (тф)	150.06. Нет условий для возникновения сильных гроз.	31.02. Рассеянные грозы. Площадь: 20-50%
4 июля 12 (1230 МЕТАР)	фронтальная (окклюзия)	192.61. Нет условий для возникновения сильных гроз.	37.69. Многочисленные грозы. Площадь: 50-70%
21 августа 12	внутримассовая?	17.63. Нет условий для возникновения сильных гроз.	30.03. Рассеянные грозы. Площадь: 20-50%
13 августа 12	фронтальная (теплый сектор циклона)	142.7. Нет условий для возникновения сильных гроз.	29.28. Несколько гроз. Площадь: 10-20%
9 августа 12	внутримассовая	21.47. Нет условий для возникновения сильных гроз.	31.74. Рассеянные грозы. Площадь: 20-50%
3 августа 12 (13 метар)	внутримассовая	39.91. Есть условия для сильных гроз, града и шквалов.	34.50. Рассеянные грозы.

Рисунок 16 - Часть таблицы с итогами расчетов методов

3.1 Синоптический анализ и анализ успешности методов прогноза грозовой активности

Грозовая активность 16.05.23. 12 по UTC

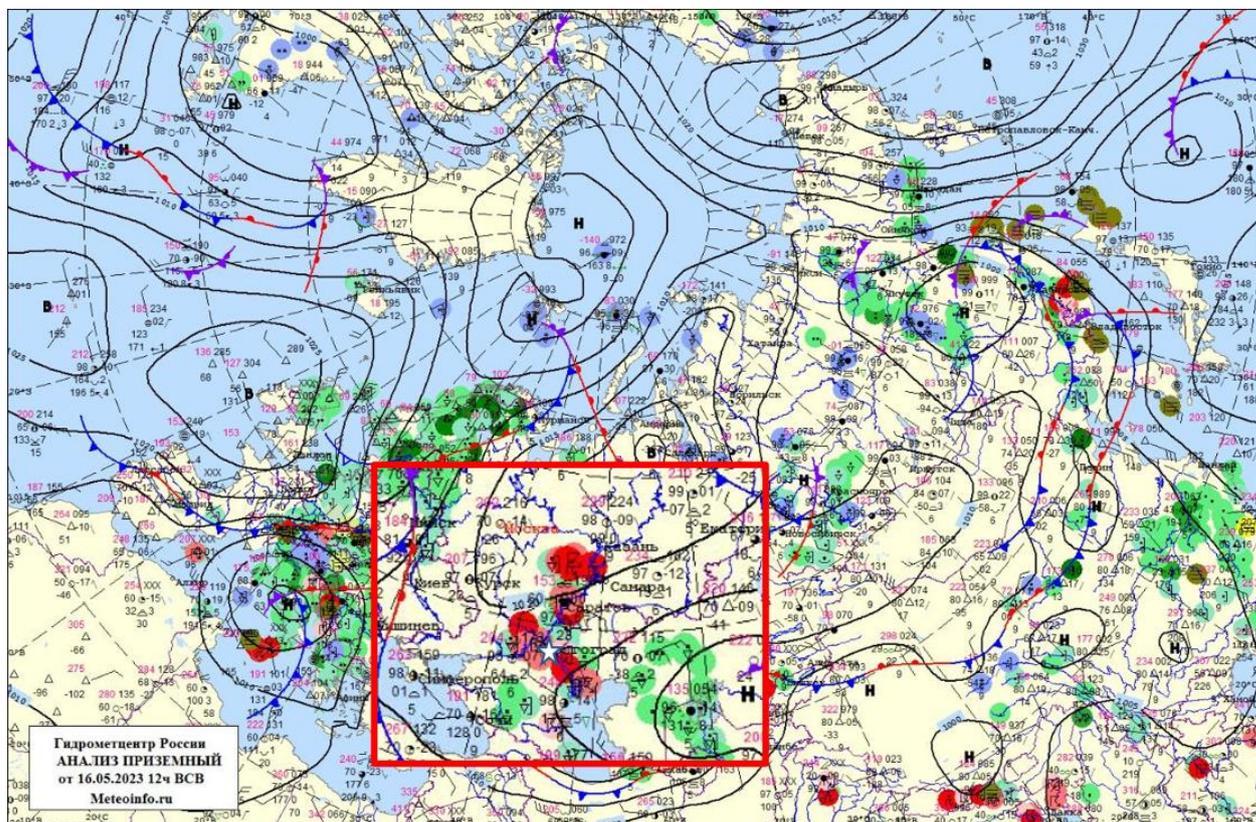


Рисунок 17 - Приземная карта за 16.05.23 12 по UTC

Тип грозы — внутримассовая

Рассчитанные методы:

- SWEAT — 265.57. Есть условия для сильных гроз, града и шквалов.
- Метод Вайтинга — 26.94. Несколько гроз. Площадь: 10-20%
- ТТ — 56.51. Многочисленные сильные грозы с сильными смерчами.
- СТ — 27.51. Очень высокая энергия неустойчивости. Очень сильные грозы.
- VT — 29.0. Грозы вероятны

Все рассчитанные индексы (SWEAT, метод Вайтинга, ТТ, СТ, VT) однозначно подтверждают наличие грозовой активности, что согласуется с данными синоптических карт.

Небольшое расхождение данных с синоптической картой и расчета метода Вайтинга наблюдается в определении площади грозовой деятельности.

При рассмотрении синоптической карты, можно заметить, что площадь воздействия грозовой деятельности довольно обширная, порядком 50-70%, в свою очередь по методу Вайтинга прогнозируется лишь 10-20%.

Грозовая активность 30.05.23. 00 по UTC

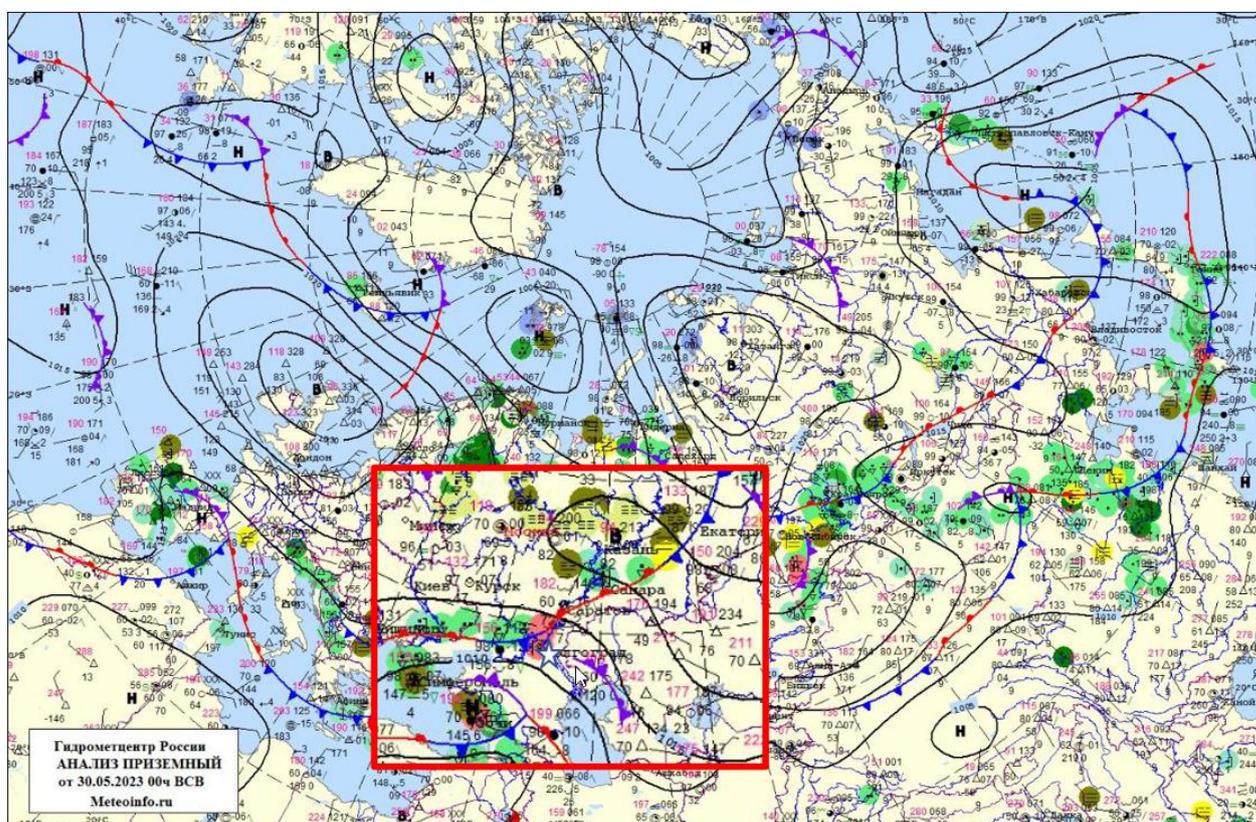


Рисунок 18 - Приземная карта за 30.05.23 12 по UTC

Тип грозы — фронтальная (холодный фронт)

Рассчитанные методы:

- SWEAT — 290.49. Есть условия для сильных гроз, града и шквалов.
- Метод Вайтинга — 33.39. Рассеянные грозы. Площадь: 20-50%

- ТТ — 50.24. Рассеянные сильные грозовые очаги, отдельные очаги со смерчем.
- СТ — 19.5. Очень высокая энергия неустойчивости. Очень сильные грозы.
- VT — 30.0. Грозы вероятны.

Все рассчитанные индексы (SWEAT, метод Вайтинга, ТТ, СТ, VT) однозначно подтверждают наличие грозовой активности, что согласуется с данными синоптических карт.

Грозовая активность 04.06.23. 00 по UTC

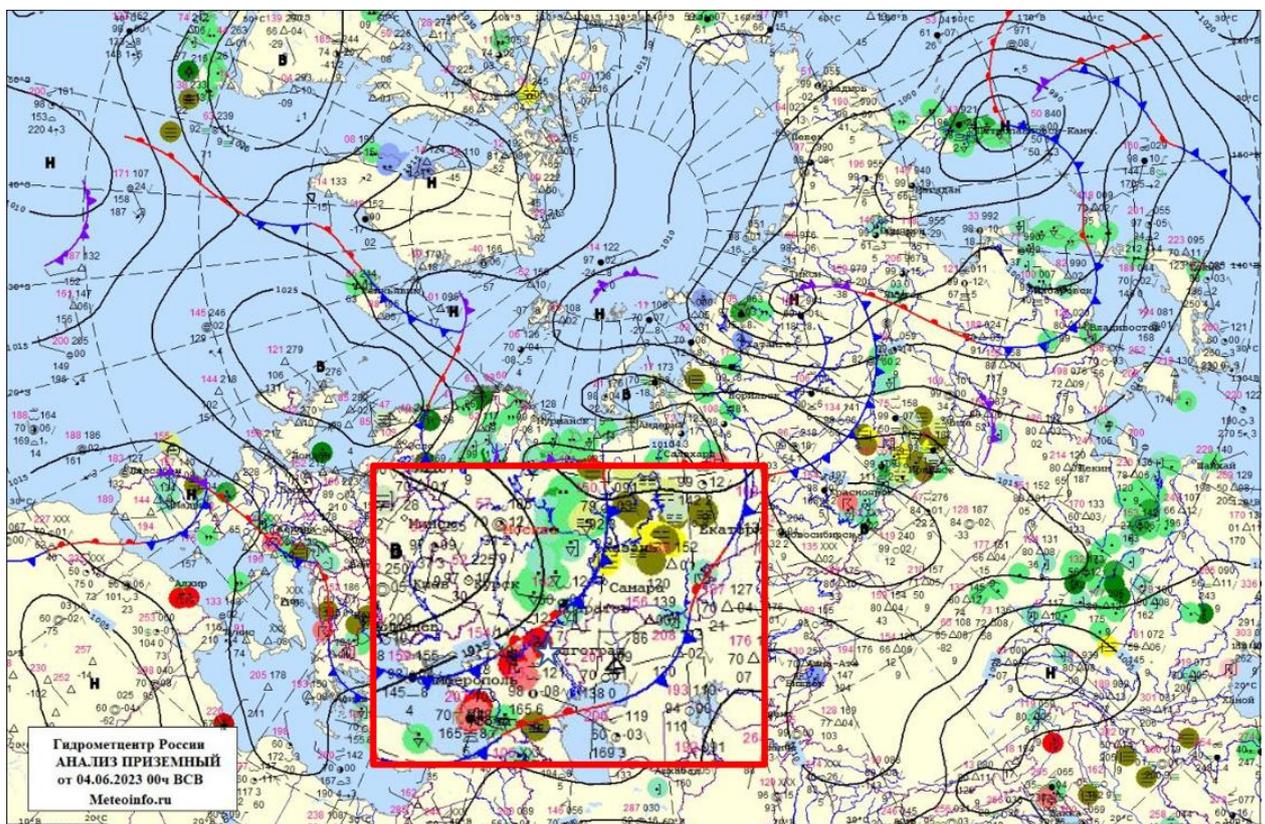


Рисунок 19 - Приземная карта за 04.06.23 00 по UTC

Тип грозы — фронтальная (теплый фронт)

Рассчитанные методы:

- SWEAT — 135.98. Нет условий для возникновения сильных гроз.

- Метод Вайтинга — 17.05. Без гроз. Площадь: —
- ТТ — 46.42. Рассеянные грозовые очаги.
- СТ — 19.42. Очень высокая энергия неустойчивости. Очень сильные грозы.
- VT — 27.0. Малая вероятность грозы.

В данном случае методы ТТ (46.42) и СТ (19.42) правильно спрогнозировали грозовую активность, указав на рассеянные грозовые очаги и высокий потенциал для сильных гроз соответственно. Остальные индексы — SWEAT (135.98), метод Вайтинга (17.05) и VT (27.0) — не выявили значительного потенциала для гроз, что связано с их меньшей чувствительностью к особенностям фронтальных гроз на теплом фронте.

Грозовая активность 12.06.23. 00 по UTC

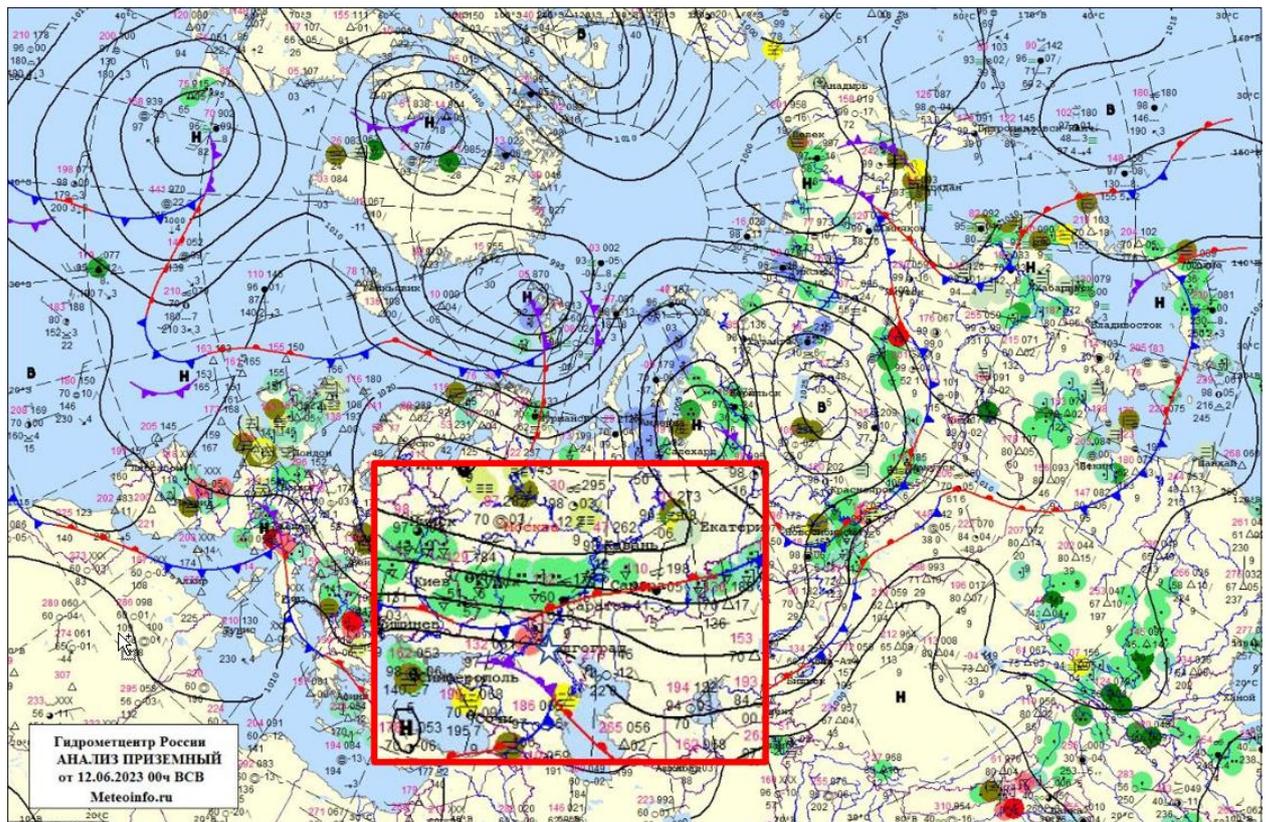


Рисунок 20 - Приземная карта за 12.06.23. 00 по UTC

Тип грозы — фронтальная (холодный фронт)

Рассчитанные методы:

- SWEAT — 285.05. Есть условия для сильных гроз, града и шквалов.
- Метод Вайтинга — 35.77. Многочисленные грозы. Площадь: 50-70%
- ТТ — 50.24. Рассеянные сильные грозовые очаги, отдельные очаги со смерчем.
- СТ — 21.24. Очень высокая энергия неустойчивости. Очень сильные грозы.
- VT — 29.0. Грозы вероятны

Все рассчитанные индексы (SWEAT, метод Вайтинга, ТТ, СТ, VT) однозначно подтверждают наличие грозовой активности, что согласуется с данными синоптических карт.

Единственное расхождение данных с синоптической карты с данными расчета методов прогноза гроз наблюдается в расчете метода Вайтинга, который дает довольно большую область грозовой активности (50-70%), что в свою очередь не подтверждается на синоптической карте (рис. 13).

Грозовая активность 21.08.23. 12 по UTC

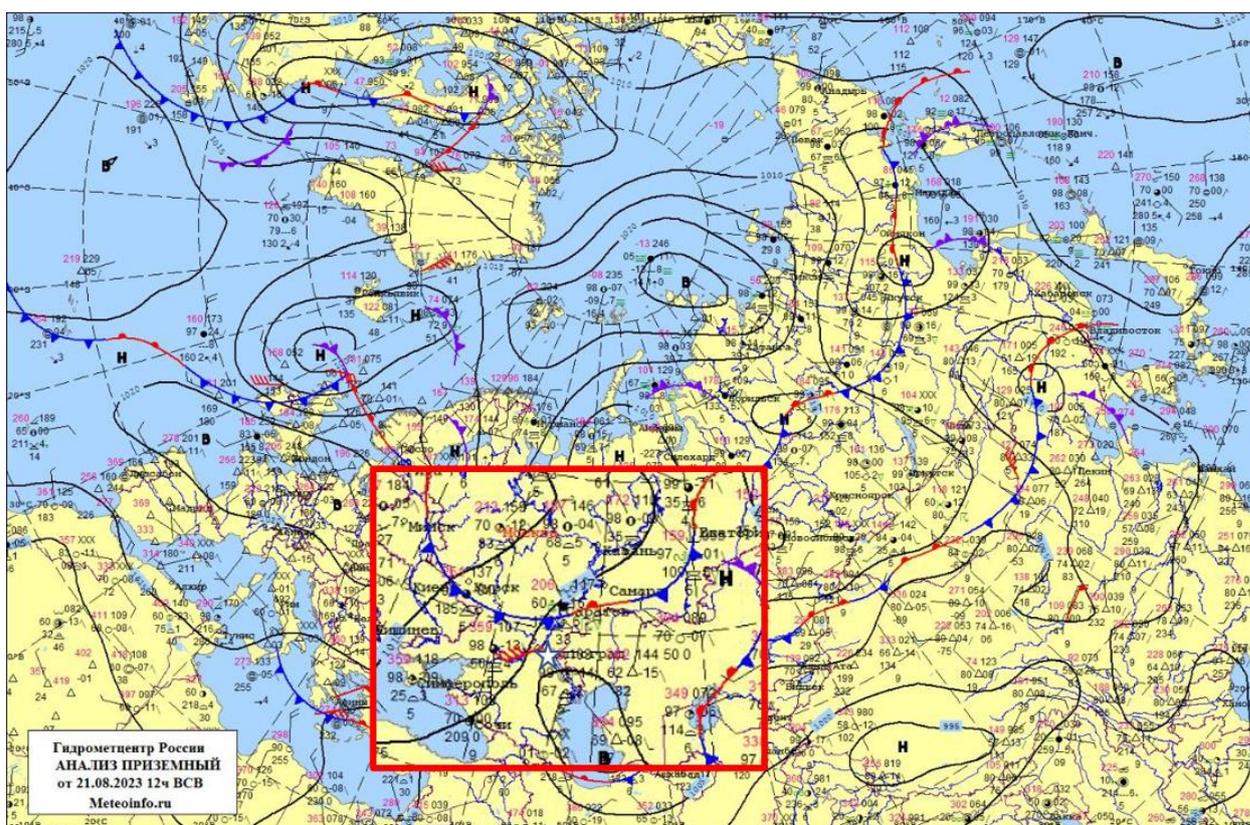


Рисунок 21 - Приземная карта за 21.08.23. 12 по UTC

Тип грозы — внутримассовая

Рассчитанные методы:

- SWEAT — 17.63. Нет условий для возникновения сильных гроз.
- Метод Вайтинга — 30.03. Рассеянные грозы. Площадь: 20-50%
- ТТ — 50.09. Рассеянные сильные грозовые очаги, отдельные очаги со смерчем.
- СТ — 18.09. Умеренная неустойчивость. Слабая грозовая деятельность.
- VT — 32.0. Грозы вероятны.

Индексы метод Вайтинга (30.03), ТТ (50.09) и VT (32.0) подтвердили наличие рассеянных гроз, в том числе с возможностью сильных очагов и отдельных смерчей, с площадью охвата 20–50%. Однако SWEAT (17.63) и СТ (18.09) не смогли предсказать эту активность.

В результате анализа всех случаев гроз в 2023 году попадающим в 00 и 12 UTC, была сделана таблица с их условиями синоптического возникновения.

Таблица 7 - Синоптические условия возникновения гроз

Внутримассовая	Фронтальная (хф)	Фронтальная (окклюзия)	Фронтальная (тф)
6	3	4	3

Основным механизмом возникновения гроз в 2023 году (апрель-август) были фронтальные процессы, на долю которых пришлось 62.5% всех случаев (10 из 16). Однако внутримассовые грозы, не связанные с фронтами (37.5%, 6 случаев), оказались наиболее частым единичным типом грозообразования. Среди фронтальных гроз наиболее продуктивными были сложные окклюдированные системы (25%), в то время как холодные и теплые фронты вносили равный, но меньший вклад (по 18.75% каждый).

Погода в регионе в тот период часто определялась сложными фронтальными системами (окклюзиями), а не только простыми холодными или теплыми фронтами. Значительная доля внутримассовых гроз указывает на то, что локальные факторы (сильный прогрев поверхности, влажность воздушной массы, орография) часто были достаточны для развития гроз без крупномасштабного фронтального "толчка".

3.2 Анализ ложных тревог

Анализ ложных тревог — случаев, когда прогноз предупреждает о грозе, но она не происходит, — является критически важным компонентом оценки любых метеорологических методов прогнозирования. Его необходимость обусловлена несколькими фундаментальными причинами.

Во-первых, он позволяет получить полную и объективную картину эффективности метода. Высокий процент успешных предсказаний сам по себе может вводить в заблуждение, если достигается ценой большого количества ложных срабатываний. Истинная надежность метода определяется балансом между обнаружением реальных событий (попаданиями) и минимизацией двух типов ошибок: пропусков событий и именно ложных тревог.

Во-вторых, ложные тревоги имеют серьезные экономические последствия. Каждое ошибочное предупреждение влечет за собой ненужные затраты: приостановку строительных работ, задержки авиарейсов, отмену массовых мероприятий, неоправданную мобилизацию аварийных служб и эвакуацию населения.

В-третьих, анализ ложных тревог необходим для оптимизации самих методов. Понимание соотношения ложных тревог и пропущенных событий помогает метеорологам калибровать пороги срабатывания предупреждений, находить оптимальный для конкретных задач баланс между излишней осторожностью (много ложных тревог) и излишним риском (много пропусков), а также выявлять слабые места в моделях и алгоритмах для их последующего совершенствования.

Для анализа ложных тревог были отобраны все даты, когда гроза точно не прогнозировалась в те же сроки, 00 и 12 UTC. В качестве исходных данных были использованы данные радиозонда за соответствующие сроки до геопотенциальной высоты в 500 гПа.

PRES hPa	HGHT m	TEMP C	DWPT C	RELH %	MIXR g/kg	DRCT deg	SPED m/s	THTA K	THTE K	THTV K
1000.0	92									
994.0	145	14.4	11.9	85	8.84	280	3.0	288.0	313.0	289.6
973.0	327	20.4	14.4	68	10.66	284	4.8	295.9	326.8	297.8
925.0	759	16.6	7.6	55	7.10	295	9.0	296.3	317.2	297.5
877.0	1208	12.6	5.5	62	6.45	310	8.0	296.6	315.7	297.8
850.0	1472	10.2	4.2	66	6.09	305	8.0	296.8	314.9	297.9
828.0	1689	8.4	3.4	71	5.91	300	8.3	297.1	314.7	298.2
705.0	2998	0.0	-8.0	55	2.97	271	9.9	301.8	311.2	302.4
700.0	3055	-0.3	-8.3	55	2.92	270	10.0	302.1	311.3	302.7
652.0	3620	-1.7	-17.7	28	1.46	273	11.9	306.7	311.6	307.0
625.0	3947	-3.9	-21.5	24	1.10	275	13.0	307.9	311.7	308.2
500.0	5670	-15.5	-41.5	9	0.20	265	16.0	314.1	314.8	314.1

Рисунок 22 - Часть таблицы с итогами расчетов методов

Далее были сформированы текстовые документы на каждый анализируемый месяц, содержащие подобные данные радиозонда за каждый срок, когда не было грозы (т.е. сроки с грозами исключались).

Были созданы 5 файлов на каждый изучаемый месяц (апрель-август, март не был взят, так как случаев гроз, подходящих по срокам 00 и 12 UTC не было, соответственно не было надобности производить расчет ложных тревог.) в котором единообразно записаны данные зонда, разделенные датами.

Для дальнейшего анализа, и его оптимизации по времени, файлов был написан программный блок, который вычленяет данные из радиозонда нужные для расчета (на высотах 850, 700 и 500 гПа), рассчитывает методы прогноза гроз и выносит результаты в отдельный текстовый документ:

- Геопотенциальная высота/ давление (PRES, hPa)
- Температура (TEMP, C)
- Точка росы (DWPT, C)
- Направление ветра (DRCT, deg (градусы))
- Скорость ветра (SPED, m/s (м/с))

```

for line in text.split('\n'):
    if not line.strip():
        continue

    if any(prefix in line for prefix in ['PRES', 'hPa']):
        in_data_section = True
        continue

    if '-----' in line:
        continue

    if in_data_section:
        parts = re.split(r'\s+', line.strip())
        if len(parts) >= 8:
            try:
                pres = float(parts[0])
                # Проверяем уровень давления
                if pres not in [850, 700, 500]:
                    continue

                # Извлекаем данные
                temp = float(parts[2])
                dwpt = float(parts[3])
                drct = int(parts[6])
                sped = float(parts[7])

                data.append({
                    'pressure': pres,
                    'temperature': temp,
                    'dewpoint': dwpt,
                    'direction': drct,
                    'speed': sped
                })
            except (ValueError, IndexError):
                # Пропускаем строки с ошибками
                continue

return data

```

Рисунок 23 - Фрагмент программного блока для оценки ложных тревог

После сбора всех данных радиозондов, нужных для анализа, они были собраны в базу данных, для дальнейшей оценки ложных тревог у разных методов прогноза гроз. Ниже приведена таблица, демонстрирующая фрагмент базы данных:

Таблица 8 - Ложные срабатывания индексов неустойчивости на грозу

Дата	Ложный прогноз
01.05 00:00 UTC	SWEAT, Вайтинг, ТТ, VT, СТ
01.05 12:00 UTC	
02.05 00:00 UTC	ТТ и СТ
02.05 12:00 UTC	

Дата	Ложный прогноз
03.05 00:00 UTC	ТТ и СТ
03.05 12:00 UTC	
04.05 00:00 UTC	
04.05 12:00 UTC	
05.05 00:00 UTC	Вайтинг, ТТ, СТ
06.05 00:00 UTC	Вайтинг, ТТ, VT, СТ
07.05 00:00 UTC	Вайтинг, ТТ, СТ

В данных таблицах производился анализ, какой из методов гроз в определенный срок давал ложный прогноз, затем количества ложных “срабатываний” подсчитывались и заносились в таблицы для итогового подсчета и выводов.

Ниже приведены таблицы за каждый месяц и итоговая сводная таблица:

Таблица 9 - Ложные прогнозы за апрель 2023 года

Методы	Кол-во ложных прогнозов	Процент НЕ давания ложных прогнозов (%)
SWEAT	0	100
Вайтинг	8	86
ТТ	28	53
СТ	24	59
VT	8	86

Всего сроков без гроз было 59. Сроки без ложных прогнозов составляли 31 случай.

SWEAT: показал идеальную надежность в периоды без гроз. 0 ложных срабатываний (100% случаев без ложного прогноза). Это самый надежный индекс в данном аспекте за апрель 2023.

Вайтинг и VT: Оба показали одинаковую и высокую надежность. Только 8 ложных срабатываний у каждого. Они не давали ложного прогноза в 86% случаев без грозы. Надежность значительно выше среднего.

СТ: показал низкую надежность. 24 ложных срабатывания. Он не давал ложного прогноза только в 59% случаев без грозы. Каждый 3-4-й его прогноз в "спокойные" сроки был ложным.

ТТ: показал самую низкую надежность. 28 ложных срабатываний (больше, чем у любого другого индекса). Он не давал ложного прогноза лишь в 53% случаев без грозы.

Таблица 10 - Ложные прогнозы за май 2023 года

Методы	Кол-во ложных прогнозов	Процент НЕ давания ложных прогнозов
SWEAT	1	98
Вайтинг	23	57
ТТ	31	43
СТ	25	54
VT	13	76

Всего сроков без гроз было 54. Сроки без ложных прогнозов составили 20 случаев.

В апреле SWEAT выдал 0 ложных прогнозов, 100% надежности. В мае он дал 1 ложный прогноз, снизив надежность до 98%, что скорее всего связано с тем, что в последующий срок наблюдалась грозовая активность.

В апреле Вайтинг был одним из лучших (8 ложных прогнозов, 86% надежности). В мае он стал вторым по ненадежности с 23 ложными прогнозами и надежностью всего 57%.

ТТ показал низкую специфичность с 31 ложным прогнозом и надежностью лишь 43%. Он ошибочно предсказывал грозу более чем в половине "спокойных" сроков.

Индекс СТ также продемонстрировал плохой результат (25 ложных прогнозов, надежность 54%).

VT показал наиболее стабильную (по сравнению с апрелем) и наилучшую среди "низких" индексов надежность (13 ложных прогнозов, 76%).

Таблица 11 - Ложные прогнозы за июнь 2023 года

Методы	Кол-во ложных прогнозов	Процент НЕ давания ложных прогнозов
SWEAT	0	100
Вайтинг	25	56
ТТ	21	63
СТ	20	65
VT	11	81

Всего сроков без гроз было 57. Сроки без ложных прогнозов составили 21 случай.

В июне SWEAT надежно исключает грозу при отрицательном сигнале.

Метод VT показывает стабильно высокий результат, 11 ложных прогнозов (надежность: 81%).

СТ и ТТ — умеренная надежность. СТ: 20 ложных прогнозов (надежность: 65%). ТТ: 21 ложный прогноз (надежность: 63%).

Критическое снижение точности Вайтинга 25 ложных прогнозов (надежность: 56%, худший показатель июня).

Таблица 12 - Ложные прогнозы за июль 2023 года

Методы	Кол-во ложных прогнозов	Процент НЕ давания ложных прогнозов
SWEAT	0	100
Вайтинг	36	38
ТТ	25	57
СТ	24	59
VT	11	81

Всего сроков без гроз было 58. Сроки без ложных прогнозов составили 15 случай.

Похожая тенденция сохраняется, как и в прошлом месяце.

SWEAT показывает идеальный результат (100% надежности)

Метод VT, как и в прошлом месяце показывает хорошие результаты 81% успешности прогнозов.

Стабильно примерно “вровень” идут СТ и ТТ (59% и 57% надежности).

Вайтинг показывает худший результат за все месяцы (38% надежности).

Таблица 13 - Ложные прогнозы за август 2023 года

Методы	Кол-во ложных прогнозов	Процент НЕ давания ложных прогнозов
SWEAT	1	98
Вайтинг	30	46
ТТ	20	64
СТ	15	73
VT	20	64

Всего сроков без гроз было 56. Сроки без ложных прогнозов составили 21 случай.

SWEAT 1 ложный прогноз (всего 1 из 56), «чистых» — 55 (98 %).

СТ 15 ложных (27 % ложных, 73 % чистых). В августе СТ достигает максимума работы (73 % «чистых») для всего периода апрель—август, что говорит об адаптации к конце-летним условиям.

ТТ и VT показали одинаковый процент — 64 % (36 «чистых» из 56). По сравнению с июлем у ТТ заметен рост «чистых» (57 % → 64 %), у VT значительно упал (81 % → 64 %).

Вайтинг 30 ложных (54 % ложных, 46 % чистых). Несмотря на незначительное восстановление по сравнению с июлем (38 % → 46 %), этот метод остаётся на низкой отметке надёжности в конце лета.

Таблица 14 - Итоговая таблица ложных прогнозов 2023 года

Методы	Кол-во ложных прогнозов	Процент НЕ давания ложных прогнозов
SWEAT	2	99
Вайтинг	122	57
ТТ	125	56
СТ	108	62
VT	63	78

Всего сроков без гроз было 284. Сроки без ложных прогнозов составили 108 случай.

Метод SWEAT почти идеален: всего 2 ложных прогноза за 284 «чистых» периода, то есть 99 % периодов проходят без ошибок.

Методы ТТ, СТ и Вайтинг, у всех трёх методов доля правдивых прогнозов лежит в диапазоне 56 %–62 %. Самый слабый итог у ТТ и Вайтинг: 56 % и 57 %

соответственно, то есть каждый из этих методов в $\approx 44\%$ случаев даёт хотя бы одну ложную тревогу. У СТ показатель чуть лучше – 62% .

Метод VT показал промежуточный результат: 78% «чистых» периодов, 63 ложных сигнала. Он уступает SWEAT по надёжности (99% против 78%), но существенно превосходит все остальные методы.

Ниже представлена диаграмма, созданная на языке программирования Python, для лучшей наглядности результатов анализа.

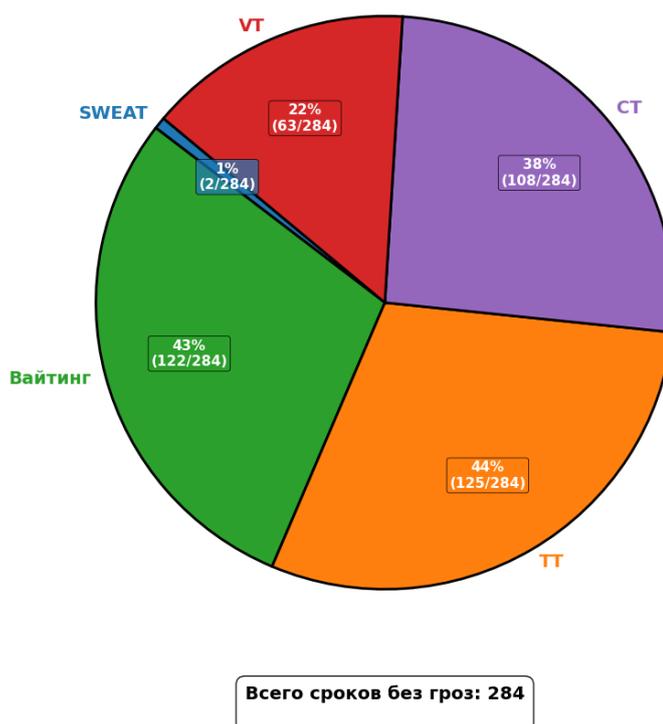


Рисунок 24 - Диаграмма с результатами анализа ложных тревог по методам, а
2023 год

```

# Создаем фигуру
fig, ax = plt.subplots(figsize=(12, 9))

# Круговая диаграмма для ложных тревог
wedges, texts = ax.pie(
    false_percent,
    colors=colors,
    startangle=140,
    shadow=False,
    wedgeprops={'edgecolor': 'black', 'linewidth': 2}
)

# Добавляем названия методов и значения
for i, (wedge, method, count, fp) in enumerate(zip(wedges, methods, false_alarms, false_percent)):
    # Координаты для размещения текста (название)
    ang = (wedge.theta2 - wedge.theta1)/2. + wedge.theta1
    x_name = 1.05 * np.cos(np.deg2rad(ang))
    y_name = 1.05 * np.sin(np.deg2rad(ang))

    # Координаты для размещения значений
    x_val = 0.7 * np.cos(np.deg2rad(ang))
    y_val = 0.7 * np.sin(np.deg2rad(ang))

    # Определяем цвет текста
    r, g, b = wedge.get_facecolor()[0:3]
    text_color = 'white' if (r*0.299 + g*0.587 + b*0.114) < 0.6 else 'black'

    # Добавляем название метода
    ha = 'left' if x_name > 0 else 'right'
    ax.text(x_name, y_name, method,
            ha=ha, va='center',
            fontsize=14, fontweight='bold',
            color=wedge.get_facecolor())

```

Рисунок 25 - Фрагмент программного кода для визуализации результатов по ложным тревогам.

Заключение

Исследование грозовой активности на аэродроме Волгограда за 2019–2023 годы позволило создать базу данных из 188 случаев гроз с использованием Python.

Также для сбора данных был специально разработан алгоритм на языке Python для отбора метеорологических сводок METAR с сайта Ogimet. В ходе обработки данных учитывались только случаи гроз (обозначенные в коде как TS), зафиксированные до блока TEMPO, что исключало прогнозируемые изменения погоды.

Для каждого месяца теплого полугодия (март–август) проводился подсчёт случаев грозовой активности. Если интервал между фиксациями составлял менее 1,5 часов, они объединялись в один случай, в противном случае учитывались как отдельные события.

После получения всех данных был произведен анализ годового хода гроз (2019 – 2023) и анализ месячного хода гроз за период 2019 – 2023, которые были визуализированы с помощью программного модуля.

Анализ временной динамики (третья задача) выявил рост числа гроз с 34 случаев в 2019 г. до 42 в 2023 г., сезонный пик в июле (55 случаев за 5 лет) и преобладание активности в сроки 00–12 UTC (62% в 2023 г.). Четвертая задача решена через типизацию 16 случаев гроз 2023 года: установлено доминирование фронтальных гроз (62.5%), особенно окклюзий (25%), и значительная доля внутримассовых (37.5%), связанных с локальной конвекцией и орографией. Пятая задача включала апробацию методов прогнозирования: тестирование 5 индексов на 81 случае показало максимальную эффективность метода Вайтинга (89% успешности) и ТТ (86%), неприменимость SWEAT (23%) из-за низкой чувствительности к региональным условиям, а анализ ложных тревог выявил минимальный риск у SWEAT (1%) при высоких показателях у Вайтинга (43%) и ТТ (44%).

Полученные результаты подчеркивают важность дальнейших исследований для совершенствования методов прогнозирования и обеспечения безопасности авиационных операций. Более детальный анализ запланирован в будущих работах.

Список литературы

1. Матвеев Л.Т. Основы общей метеорологии. Физика Атмосферы. – СПб.: Гидрометеоиздат, 1965. – 876 с.;
2. Богаткин О. Г., Тараканов Г. Г. Основы метеорологии. — Санкт-Петербург: РГГМУ, 2006. — 228 с.
3. Ермаков Е. И., Стожков Ю. И. Физика грозových облаков // Краткие сообщения по физике. — М.: ФИАН, 2004. — 438 с.
4. Ogimet [Электронный ресурс]. — URL: <https://www.ogimet.com/index.phtml.en> (дата обращения: 10.05.2025).
5. Ventusky [Электронный ресурс]. — URL: <https://www.ventusky.com/> (дата обращения: 10.05.2025).
6. Метеоинфо [Электронный ресурс]. — URL: <https://meteoinfo.ru/mapsynop> (дата обращения: 10.05.2025).
7. Flymeteo.org: прогнозы погоды для авиации [Электронный ресурс]. — URL: <https://flymeteo.org/> (дата обращения: 10.05.2025).
8. Константинова, А. М. Особенности грозовой деятельности в условиях меняющегося климата (на примере Северо-Запада России) : дис. ... канд. геогр. наук : 25.00.30 / Константинова Анна Михайловна ; Главная геофизическая обсерватория им. А.И. Воейкова (ГГО). — Санкт-Петербург, 2021. — 187 с. [Электронный ресурс]. — URL: http://voeikovmgo.ru/download/aspirantura/Disser_Konstantinova.pdf (дата обращения: 10.05.2025).
9. University of Wyoming Atmospheric Science Radiosonde Archive [Электронный ресурс] / Dept. of Atmospheric Science, University of Wyoming. — Электрон. дан. — Laramie, WY : University of Wyoming. — URL: <https://weather.uwyo.edu/upperair/sounding.shtml>