



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

Кафедра метеорологических прогнозов

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА
(магистерская диссертация)

На тему «Прогноз грозовой активности с использованием мезомасштабной
гидродинамической модели»

Исполнитель Перетягина Анастасия Анатольевна

(фамилия, имя, отчество)

Руководитель доцент, кандидат физико-математических наук

(ученая степень, ученое звание)

Анискина Ольга Георгиевна

(фамилия, имя, отчество)

«К защите допускаю»
заведующий кафедрой

(подпись)

кандидат физико-математических наук, доцент

(ученая степень, ученое звание)

Анискина Ольга Георгиевна

(фамилия, имя, отчество)

« 06 » июня 2023 г.

Санкт-Петербург

2023

Оглавление

Введение.....	4
1.1. Климатические особенности Северо-Запада ЕЧР	8
1.1.1. Температурный режим Северо-Запада ЕЧР	9
1.1.2. Ветровой режим и распределение давления.....	10
1.2. Распределение гроз на Северо-Западе ЕЧР	12
2. Прогноз гроз при помощи атмосферных моделей погоды.....	15
2.1. Условия формирования кучевообразной облачности.....	15
2.2. Условия формирования грозовой деятельности	23
2.2.1. Стадии образования грозового облака	24
2.2.2. Классификация гроз	26
3. Методы прогноза грозовой активности различными методами	31
3.1. Синоптические методы.....	31
3.1.1. Метод Г.Д. Решетова	32
3.2. Индексы неустойчивости, как метод прогноза грозовой активности	34
3.3. Использование метеорологических радиолокаторов, грозопеленгаторов и спутниковой информации для прогноза грозовой активности.....	40
3.3.1. Радиолокаторы как источник важной метеорологической информации.....	41
3.3.2. Важность использования грозопеленгационной информации	43
3.3.3. Спутниковые снимки как дополнение для прогноза грозовой активности	43
3.3.4. Автоматизированный метод МСЗ	45
4. Использование мезомасштабной атмосферной моделей погоды WRF-ARW для численного прогноза гроз на территории Северо-Запада ЕЧР.....	47
4.1. Мезомасштабная атмосферная модель погоды WRF-ARW.....	49
4.1.1. Динамическое ядро WRF-ARW	50
4.1.2. Метод численного решения модели WRF-ARW.....	52
4.1.3. Параметризация физических процессов модели ARW.....	53
4.1.4. Структура прогностической системы гидродинамической модели погоды WRF-ARW	54
4.2. Прогноз грозовой активности при использовании численных экспериментов моделирования факта наличия и отсутствия гроз мезомасштабной гидродинамической модели WRF-ARW	55
4.2.1. Создание версии мезомасштабной гидродинамической модели WRF-ARW для Северо-Запада Европейской части России	55
4.2.2. Моделирование полей метеорологических величин с использованием мезомасштабной гидродинамической модели WRF-ARW	56
4.2.3. Расчет индексов неустойчивости атмосферы для полученных численных экспериментов моделирования	58

4.2.5. Прогноз гроз методом Г.Д. Решетова по численным экспериментам моделирования	65
4.2.6. Визуализация численных экспериментов моделирования для города Сыктывкар за 03.07.16 и 04.07.16.....	66
Заключение	77
Список использованных источников	80
Приложение А	84
Приложение Б.....	86
Приложение В	89
Приложение Г	92

Введение

Существует множество факторов, влияющих на формирование погоды и климата и одним из важнейших является облачность.

На планете Земля образуется большое количество разновидностей облаков и каждый из них несет свой вклад не только в формирование климата, но и в жизнедеятельность человека.

В данной работе пойдет речь об одном из самых опасных видов облачности – о грозовых облаках.

Гроза – крайне опасное атмосферное явление, способное оказывать сильное влияние не только на жизнедеятельность человека, но и вызывать различные аварии и катастрофы. От грозовой активности страдают следующие сферы человеческой деятельности:

- 1) авиационный транспорт;
- 2) линии электропередачи;
- 3) промышленная и гражданская застройка;
- 4) лесное хозяйство;
- 5) животноводство;
- 6) растениеводство;
- 7) рекреационная и спортивная деятельность;

Это лишь небольшой список наиболее уязвимых сфер человеческой деятельности, но также гроза может приводить к наводнениям, пожарам и смертям, как среди людей, так и среди животных. Но что же вызывает все эти ужасные последствия? А вызывают их атмосферные явления, сопровождающие грозовую активность, к которым относятся:

- 1) электрические разряды (молнии);
- 2) шумовое воздействие (гром);
- 3) турбулентность;
- 4) кратковременные усиления ветра (шквалы);

- 5) выпадение града;
- 6) ливни;
- 7) переохлажденная влага, способствующая обледенению самолет.

Актуальность данной работы заключается в первую очередь в предотвращение ужасных последствий, вызываемых деятельностью грозовой активности, поэтому крайне важно уметь прогнозировать это явление. На сегодняшний день все чаще используются результаты гидродинамического моделирования, поэтому разработать прогноз гроз, как постпроцессинг численного прогноза это очень важно и актуально.

- Целью данной работы является оценка возможности использования мезомасштабной гидродинамической модели для прогнозирования гроз на территории Северо-Запада ЕЧР.

Задачи необходимые для выполнения поставленной цели:

- 1) Создание архива данных о грозах на Северо-западе ЕЧР.
- 2) Создание версии модели WRF-ARW применительно к области исследования и проведение численных экспериментов для моделирования случаев грозы из созданного архива.
- 3) Анализ результатов моделирования.
- 4) Проведение сравнительного анализа качества моделирования гроз с использованием метода Г.Д. Решетова и индексов неустойчивости атмосферы.

Структура работы:

В первом разделе данной работы рассматривается область прогнозирования. Изучаются климатические характеристики Северо-Запада ЕЧР и распределение грозовой деятельности на территории Северо-Запада ЕЧР.

Второй раздел работы посвящен изучению особенностей формированию кучево-дождевой и грозовой облачности.

Рассмотрению различных методов прогнозирования посвящен третий раздел данной работы.

В 4 раздел работы посвящен проведению сравнительного анализа качества моделирования гроз с использованием индексов неустойчивости атмосферы и метода Г.Д. Решетова.

В Приложениях А, Б, В и Г приведены таблицы, содержащие данные о грозах и кучево-дождевых облаках за период с 2015 по 2020 гг.: данные радиозондирования атмосферы, выходные модельные данные, а также расчеты для прогноза по индексам неустойчивости атмосферы Vertical Totals, Cross Totals, Total Totals и методу Г.Д. Решетова.

1. Погодные условия Северо-Запада Европейской части России в теплое время года

В данной работе для реализации оценки качества прогноза грозовой активности методом Решетова при использовании рассчитанных модельных данных атмосферной модели WRF-ARW была взята ограниченная территория Европейской части России, а именно Северо-Запад Европейской территории России (ЕЧР). Точные границы выбранной территории представлены на рисунке 1.1.

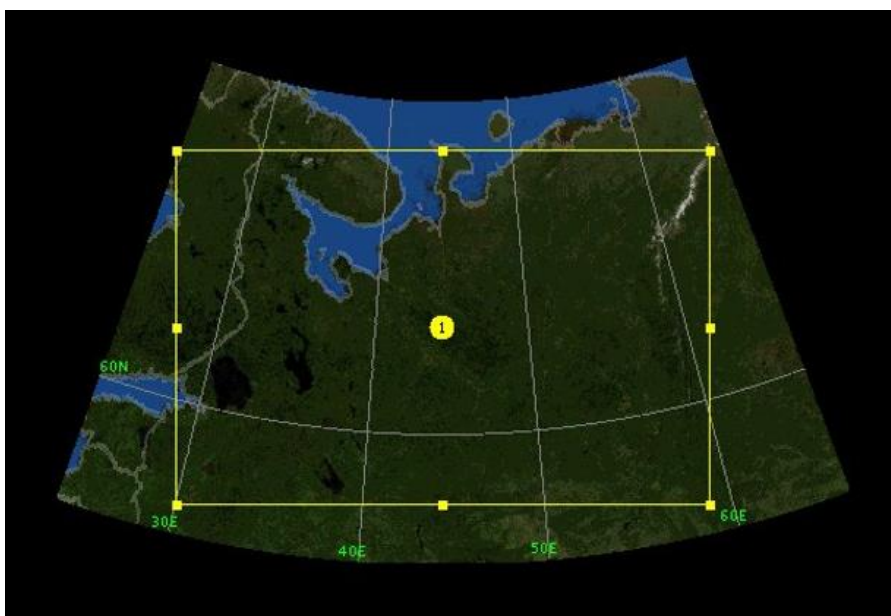


Рисунок 1.1 – Территория, выбранная для проведения исследования

На данной территории было выбрано 9 метеорологических станций в следующих городах: Сыктывкар, Кандалакша, Вологда, Каргополь, Печора, Петрозаводск, Нарьян-Мар, Архангельск, Мурманск. Координаты городов, прогноз гроз в которых разрабатывался и оценивался в данном исследовании, представлены в таблице 1.1.

Таблица 1.1 – Города, для которых разрабатывался прогноз гроз

Области СЗ ЕЧР	Метеостанция	Широта	Долгота
Мурманская область	Мурманск	68.98	33.09
	Кандалакша	67.16	32.41
Архангельская область	Архангельск	64.54	40.54
	Каргополь	60.50	38.95
Ненецкий АО	Нарьян-Мар	67.64	53.00
Республика Коми	Сыктывкар	61.67	50.81
	Печора	65.15	57.22
Республика Карелия	Петрозаводск	61.79	34.35
Вологодская область	Вологда	59.22	39.88

Далее будут кратко рассмотрены климатические особенности городов
выбранных метеорологических станций.

1.1. Климатические особенности Северо-Запада ЕЧР

На рисунке 1.2 представлена карта климатических поясов Северо-Запада Европейской части России. По ней видно, что на выбранной территории преобладают два климатических пояса, а именно: по побережью России область субарктического климата, а южнее располагается область умеренно-континентального климата.

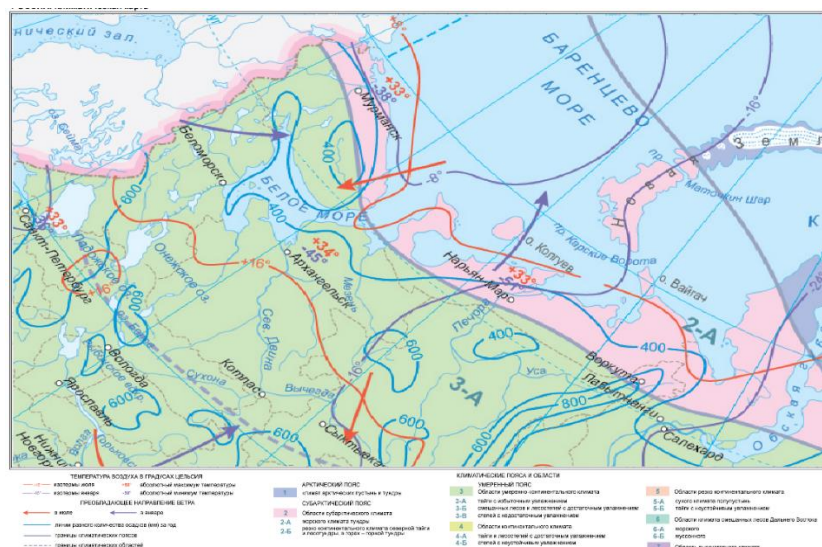


Рисунок 1.2 – Климатическая карта Северо-Запада ЕЧР

1.1.1. Температурный режим Северо-Запада ЕЧР

Распределение температуры воздуха на территории ЕЧР можно охарактеризовать изотермами, уклон которых наблюдается с ЮЗ на СВ. Такое распределение можно объяснить влиянием Атлантического океана на Северо-Западные и Центральные районы Европейской части России.

Температура в первой половине июня может понижаться до отрицательных значений, особенно актуально это для побережья ЕЧР. В данном месяце наблюдается рост температуры, в среднем значения увеличиваются на 5 – 6 °С.

В июле же в большинстве случаев наблюдаются максимальные значения, это наиболее жаркий месяц.

Зонально с севера на юг над Северо-Западом ЕЧР происходит смена воздушных масс: с арктической на континентальную, что сопровождается повышением температуры.

Далее представлены среднемесячные температуры за выбранный промежуток времени для всех 9 метеостанций.

Сыктывкар				Нарьян-Мар				Печора			
год	июн	июл	авг	год	июн	июл	авг	год	июн	июл	авг
2015	16.2	13.9	12.4	2015	12.1	9.0	10.0	2015	14.4	11.1	10.5
2016	14.6	19.9	18.1	2016	9.9	18.8	14.6	2016	13.1	20.3	16.6
2017	12.4	18.3	16.0	2017	6.6	17.8	12.0	2017	10.8	19.5	13.8
2018	13.5	19.5	14.5	2018	8.2	16.3	11.7	2018	11.0	19.5	12.1
2019	13.6	15.4	11.4	2019	7.5	12.8	9.8	2019	10.5	15.5	11.3
2020	13.5	20.0	13.8	2020	9.0	17.0	11.9	2020	11.2	18.3	13.3

Рисунок 1.3 – Среднемесячные температуры для Сыктывкара, Нарьян-Мара и Печоры

Мурманск				Кандалакша				Архангельск			
год	июн	июл	авг	год	июн	июл	авг	год	июн	июл	авг
2015	9.8	9.9	12.5	2015	10.7	11.7	13.0	2015	13.7	12.7	12.1
2016	10.5	16.1	12.5	2016	11.6	17.7	13.3	2016	13.7	19.2	16.1
2017	6.8	14.2	11.2	2017	8.8	15.0	12.4	2017	9.7	17.7	15.5
2018	9.3	18.1	12.8	2018	10.9	18.7	14.4	2018	12.1	19.4	15.3
2019	8.6	10.7	10.7	2019	11.9	12.9	11.8	2019	13.3	13.5	11.4
2020	10.7	15.7	11.7	2020	14.9	16.1	13.0	2020	13.8	17.0	13.2

Рисунок 1.4 – Среднемесячные температуры для Мурманска, Кандалакши и Архангельска

Вологда				Каргополь				Петрозаводск			
год	июн	июл	авг	год	июн	июл	авг	год	июн	июл	авг
2015	15.6	15.3	14.6	2015	14.6	14.5	14.3	2015	14.2	14.3	15.4
2016	15.2	19.8	17.7	2016	14.6	19.6	16.2	2016	14.2	18.5	15.3
2017	12.3	16.2	16.5	2017	11.8	16.7	16.2	2017	11.7	15.5	15.8
2018	14.4	18.5	16.9	2018	13.6	19.0	16.5	2018	13.6	18.5	17.0
2019	16.6	14.6	12.9	2019	15.8	14.3	12.5	2019	16.5	13.5	13.4
2020	16.0	17.4	14.8	2020	15.7	16.8	13.9	2020	16.1	16.2	14.6

Рисунок 1.5 – Среднемесячные температуры для Вологды, Каргополя и Петрозаводска

В большинстве случаев максимальные среднемесячные температуры наблюдаются в июле.

1.1.2. Ветровой режим и распределение давления

В летний период происходит смещение полосы пониженного давления на материк, а именно на северное побережье Европейской части России, что приводит к смене характера циркуляции атмосферы на муссонный.

Наблюдается рост давления с В и СВ на З и ЮЗ. При этом по сравнению с зимой барическое поле выражено менее четко, благодаря чему барические градиенты незначительны.

Это приводит к ослаблению и неустойчивости направлений ветра, однако все же можно выделить повторяемость направлений.

На большей территории ЕЧР преобладают северные ветры: 15 – 25 % - побережье Кольского полуострова; северо-восточные ветры: 20 – 30 % - большая часть Кольского полуострова и Карелия; юго-восточное направление: 16 – 22 % - СЗ побережье Белового моря.

Также далее представлены месячные суммы осадков за выбранное время для всех 9 метеостанций.

Сыктывкар				Нарьян-Мар				Печора			
год	июн	июл	авг	год	июн	июл	авг	год	июн	июл	авг
2015	58	45	91	2015	106	43	64	2015	111	76	66
2016	53	91	173	2016	63	16	93	2016	108	30	46
2017	96	76	84	2017	29	29	75	2017	125	26	110
2018	76	93	52	2018	38	19	79	2018	104	27	84
2019	92	134	112	2019	55	71	50	2019	91	171	157
2020	41	59	71	2020	60	65	60	2020	43	74	78

Рисунок 1.6 – Месячные суммы осадков для Сыктывкара, Нарьян-Мара и Печоры

Мурманск				Кандалакша				Архангельск			
год	июн	июл	авг	год	июн	июл	авг	год	июн	июл	авг
2015	82	33	76	2015	110	114	56	2015	85	45	109
2016	82	80	80	2016	71	78	119	2016	49	120	84
2017	65	40	87	2017	46	57	178	2017	89	134	169
2018	79	24	71	2018	87	30	46	2018	80	30	118
2019	85	60	44	2019	75	78	31	2019	58	67	103
2020	51	40	284	2020	34	91	57	2020	30	119	91

Рисунок 1.7 – Месячные суммы осадков для Мурманска, Кандалакши и Архангельска

Вологда				Каргополь				Петрозаводск			
год	июн	июл	авг	год	июн	июл	авг	год	июн	июл	авг
2015	45	55	57	2015	49	94	99	2015	49	81	65
2016	52	48	101	2016	84	151	150	2016	71	123	203
2017	129	125	41	2017	110	119	78	2017	68	75	63
2018	43	92	59	2018	56	59	95	2018	37	58	106
2019	51	159	92	2019	71	98	61	2019	31	133	49
2020	61	142	71	2020	21	145	87	2020	43	58	57

Рисунок 1.8 – Месячные суммы осадков для Вологды, Каргополя и
Петрозаводска

1.2. Распределение гроз на Северо-Западе ЕЧР

Образование грозовой деятельности может происходить в течение всего дня: около 60 % гроз – это послеполуденные грозы и около 10 % - ночные.

В Европейской части России преобладают грозы, образующиеся на фронтальных системах, из них около 70 % - это грозы холодных фронтов, а в 30 % грозы возникают на теплых фронтах. Следует отметить, что грозовая активность, связанная именно с теплыми фронтами, происходит в ночное время суток.

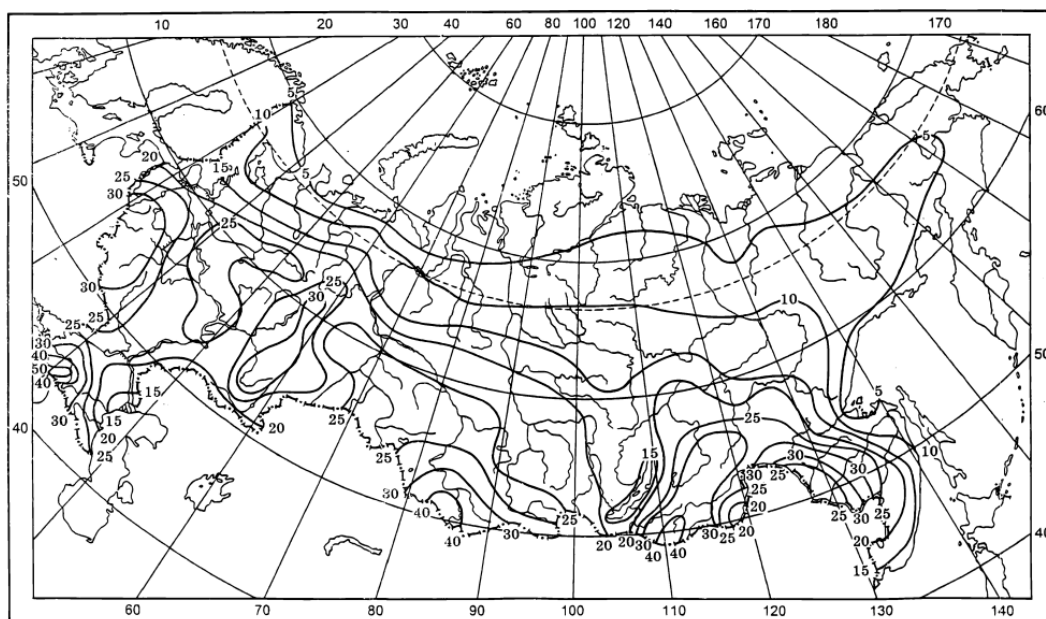


Рисунок 1.9 – Число дней с грозой (по А. М. Носовой)

Анализируя данные представленные на рисунке 1.9 видно, что на выбранную территорию приходится наименьшее количество случаев гроз в год. Значения варьируются от менее 5 до 20 случаев в год, при этом наблюдается увеличение частоты с севера на юг.

Наибольшая частота наблюдается на юге страны, на территории, которая в данной работе не рассматривается.

На рисунке представлено распределение грозовых разрядов на землю на 1 км^3 .

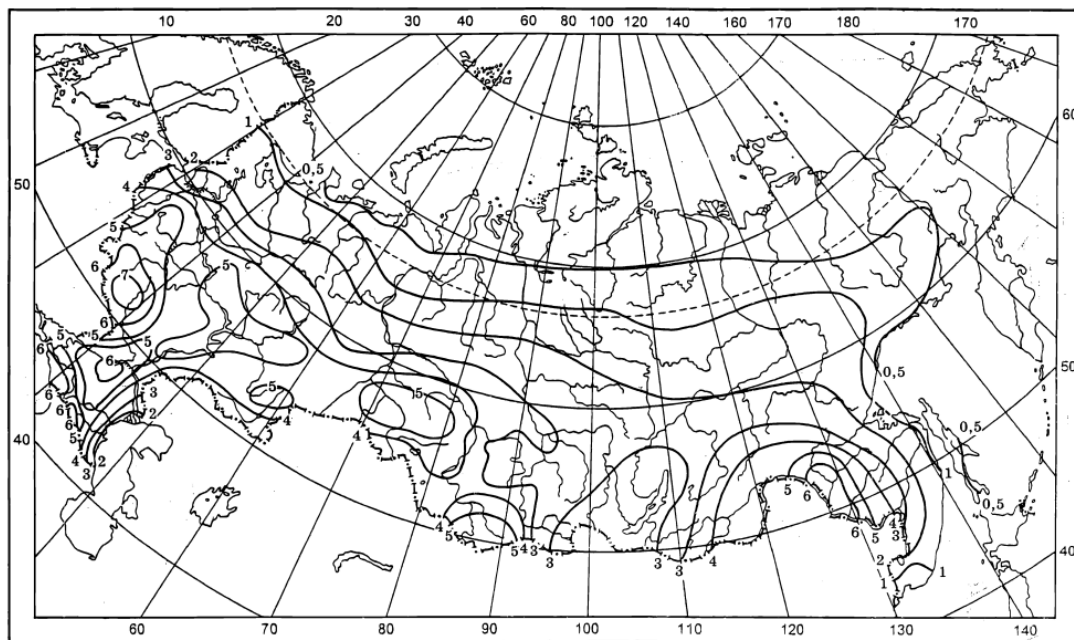


Рисунок 1.10 – Число грозовых разрядов на землю на 1 км^3 (по Т.В. Лободину)

По данным Т.В. Лободина, приведённым на рисунке 1.10, также можно сделать вывод, что выбранная для исследования область подверженная грозовым разрядам меньше, чем большинство других районов страны.

На севере ЕЧР частота разрядов самая наименьшая – 0,5 разрядов на 1 км^3 . С севера на юг наблюдается увеличение случаев. И на выбранной территории достигает значения 3 разрядов на 1 км^3 .

На рисунке 1.11 представлена продолжительность грозовой активности на территории России.

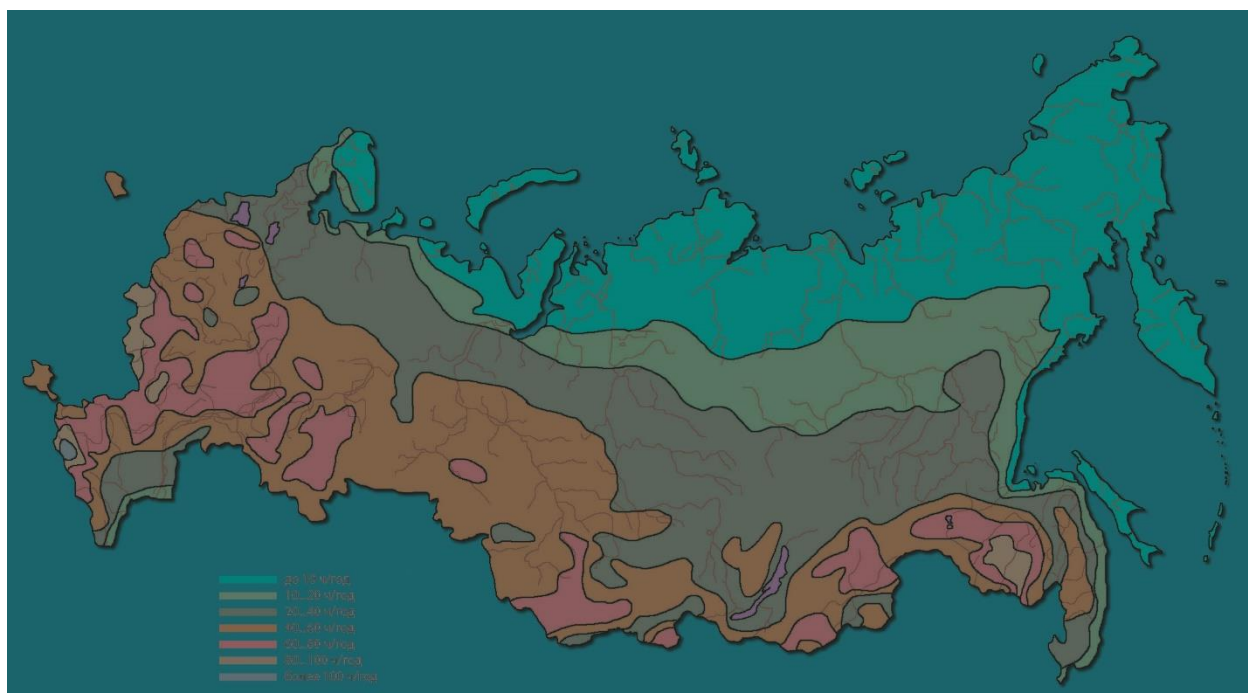


Рисунок 1.11 – Карта продолжительности гроз на территории России

Север страны обладает наименьшей продолжительностью гроз, а именно менее 10 часов в год. С севера на юг также, как и в случаях с числом грозовых дней и числом грозовых разрядов, наблюдается и увеличение продолжительности грозовой активности. Так, например, на территории Северо-Запада ЕЧР продолжительность составляет уже 10-20 часов в год.

С грозами связаны такие явления, как выпадение града и шквалы.

В умеренных широтах ЕЧР выпадение града не самое частое явление, наблюдается оно в 1 из 10 случаев грозовой активности. Следует отметить, что «крупный» град (диаметр более 20 мм) не наблюдается на севере ЕЧР.

В целом можно сделать вывод, что Северо-Запад Европейской Части России является не самым грозоопасным районом страны, однако исследование условий грозообразования и прогнозирование гроз в данном регионе также важны.

2. Прогноз гроз при помощи атмосферных моделей погоды

Говоря о прогнозе грозовой активности, в первую очередь следует описать условия формирования кучевой облачности и гроз, как явления, в целом.

2.1. Условия формирования кучевообразной облачности

Возникновение грозовой деятельности всегда связано с облачностью вертикального развития – кучевой облачностью.

Отличительной чертой данного вида облачности является в первую очередь существенная вертикальная протяженность, которая может превышать значения горизонтальных размеров облака или системы облаков.

К условиям формирования типичным для всех видов облачности, добавляются также следующие обязательные условия: образование кучевой облачности происходит в неустойчивых слоях атмосферы, при наличии интенсивных воздушных потоков вертикальной направленности и достаточной увлажненности воздуха.

Одно из условий образования данного вида облачности, а именно наличие мощных вертикальных потоков, связано с таким процессом, как конвекция, поэтому следует уделить внимание и этому процессу.

Конвективные процессы бывают термического и динамического происхождения.

Природа термической конвекции заключается в наличии больших градиентов температуры: в результате неравномерного прогрева земной поверхности, прихода воздушной массы с относительно холодными воздушными частицами. Благодаря наличию двух воздушных масс,

обладающих разными температурами, происходит подъем тяжелого холодного воздуха и опускание легкого теплового – формируются вертикальные воздушные потоки. Данный процесс представлен на рисунке 2.1.

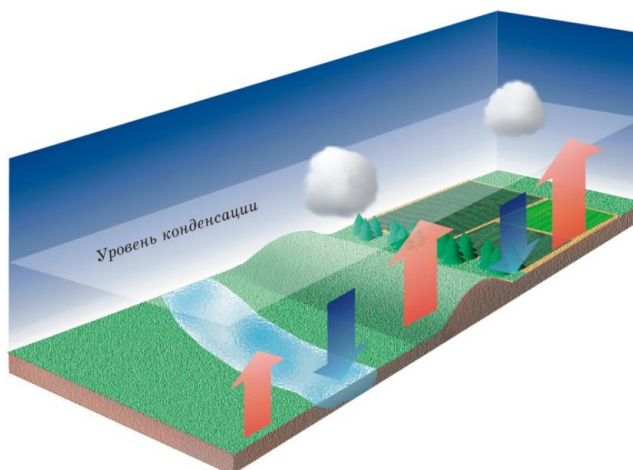


Рисунок 2.1 – Формирование термической конвекции [стр.16, 9]

Причиной формирования динамической (вынужденной) конвекции являются некие препятствия, в роли которых могут выступать горные, антропогенные ландшафты, и даже холодный фронт с большим углом наклона фронтальной поверхности.

При наличии препятствия, происходит вынужденный подъем воздушной массы, а также, при соответствующих условиях – конденсация водяного пара и образование кучевой облачности. Схема динамической конвекции представлена на рисунке 2.2.

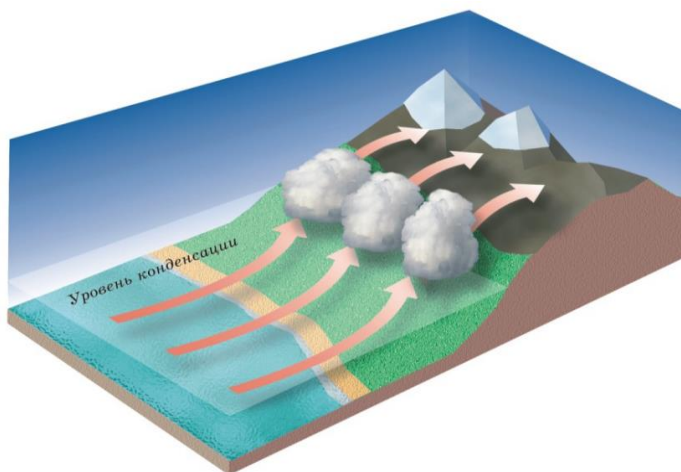


Рисунок 2.2 – Формирование динамической конвекции [стр.19, 9]

Также следует обратить внимание на один важный момент – процесс вовлечения.

При данном процесс происходит формирование термика (относительно небольшой элемент (диаметр 60 – 70 м) формирования конвекции), который имеет форму сферической башни. При поднятии этих элементов (скорость поднятия до 1 – 2 м/с) происходит вовлечение более холодного и сухого воздуха, что уменьшает их подъемную силу. Поэтому для формирования большого мощного кучевого облака необходимо большое количество термиков.

Кучевая облачность может иметь внутримассовую и фронтальную природу образования. Формирование внутримассовой конвективной облачности характерно для второй половины дня, когда атмосфера максимально для этого подготовлена: в послеполуденные часы, когда был достигнут максимум температуры воздуха, с сильно нагретой поверхности земли происходит подъем теплых влажных воздушных масс и при подходящих условиях в атмосфере, происходит формирование кучевой облачности, которая может дорасти до облаков с большой вертикальной протяженностью и в итоге преобразоваться в грозовые облака.

В данной работе рассматриваются случаи формирования гроз в точный промежуток времени, а именно 12 часов дня, поэтому наиболее вероятно, что природа формирования этих случаев гроз связана не с внутримассовой, а фронтальной облачностью.

Формирование гроз на фронтах происходит в результате столкновения теплой и холодной воздушных масс. Холодный воздух вытесняет более теплую воздушную массу вверх, которая охлаждаясь конденсируется. Данный процесс схематически представлен на рисунке 2.3.

Касательно времени суток, грозы на холодных фронтальных системах могут образовываться в любое время дня, в то время, как формирование гроз на теплых фронтах связано только с ночным временем суток.

Причина заключается в следующем: ночью происходит сильное радиационное выхолаживание верхней границы облачности теплого фронта, это приводит к увеличению температурных градиентов, а, следовательно, возникновению мощных вертикальных потоков внутри системы облаков. Таким образом формируются скрытые ночные грозы теплых фронтальных систем.

Но учитывая, что в данной работе произведён анализ лишь полуденных гроз, наличие гроз теплового фронта наименее вероятно.

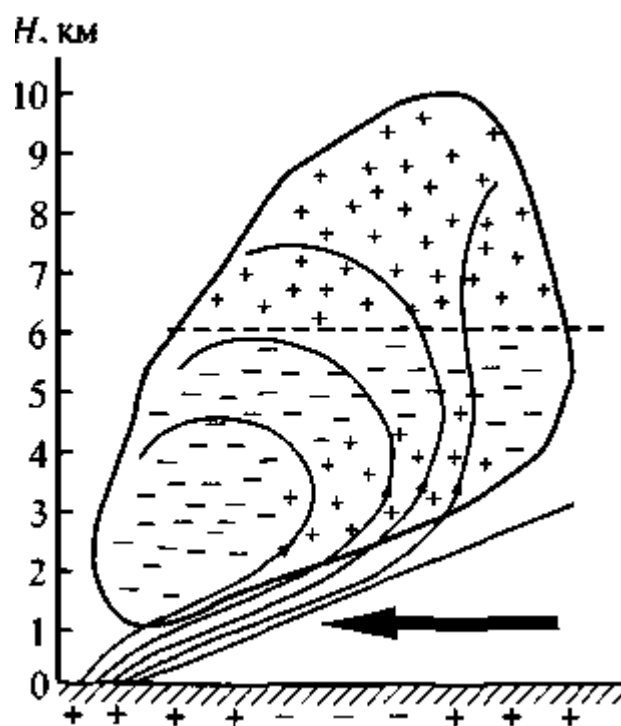


Рисунок 2.3 – Формирование гроз на фронтальных системах

Также формирование ночных гроз может быть связано с наличием вблизи формирования водной поверхности, когда на нагретую поверхность воды вторгается масса значительно более холодного воздуха с земли, успевшего остыть после захода Солнца [10].

Кучевообразная облачность разделяется на два основных вида: кучевые и кучево-дождевые облака. Визуально данные виды облачности представлены на рисунке 2.4.

В случае формирования грозовой деятельности кучевые облака являются лишь промежуточной стадией в формировании грозового облака, поэтому более детально остановимся лишь на особенностях кучево-дождевых облаков.

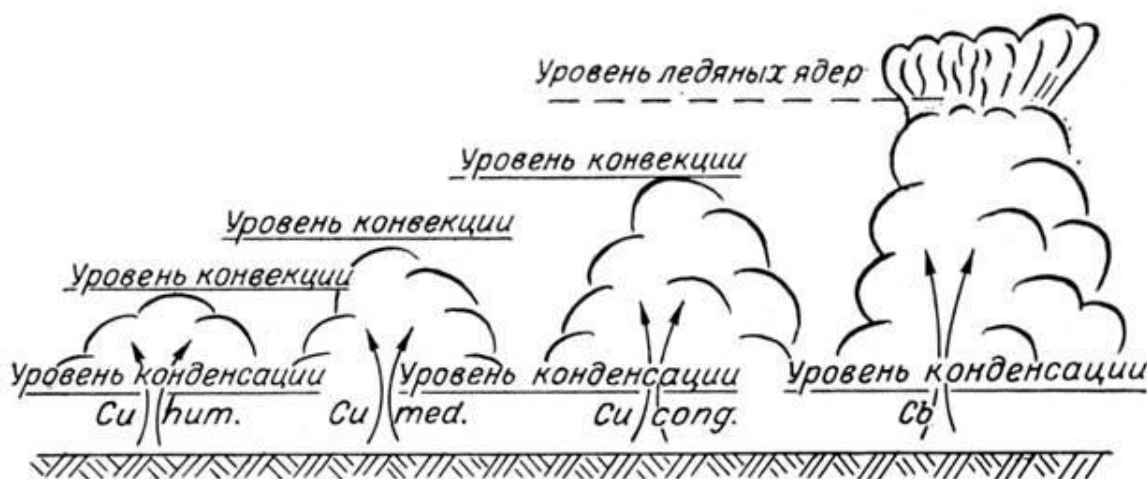


Рисунок 2.4 – Кучевые и кучево-дождевые облака

Образование кучево-дождевой облачности всегда связано с опасными атмосферными явлениями начиная от ливневых осадков и заканчивая формированием смерчей.

Годовой ход данного вида облачности выражен следующим образом: в силу усиленной солнечной активности кучево-дождевые облака чаще встречаются в теплый период года, а именно, в середине лета наблюдается наибольшая повторяемость. В холодный период кучево-дождевые облака также могут встречаться, но это достаточно редкое явление и мощность облачности при этом значительно меньше, чем в летний период.

Кучево-дождевые облака могут занимать всю вертикальную протяженность образования облачности: с нижнего до верхнего яруса. Мощность облака может достигать 15-20 км в зависимости от исходных и сопутствующих условий формирования облака до широты формирования облака или облачной системы в общем.

Горизонтальная протяженность данного вида облаков может достигать нескольких десятков километров.

При этом верхняя граница облачности видоизменяется и принимает кристаллическую природу. Связано это с наличием высоких скоростей ветра на большой высоте, которые «вытягивают» кристаллы льда из верхней части

облака. Таким образом, формируется волокнистая структура (по своей природе данный процесс похож на процесс формирования перистой облачности) Учитывая данный факт выделяется 2 подвида Cumulonimbus.

- Лысые (Cumulonimbus calvus);
- Волосатые (Cumulonimbus capillatus).

Лысые кучево-дождевые облака по своей сути также являются переходной формой облачности: от мощно-кучевого в кучево-дождевое волосатое. Пример такого облака представлен на рисунке 2.5.

Формирование округлой вершины данного вида облачности связано с отсутствием волокнистой структуры в верхней части своего тела. В данной момент вертикальное развитие облака прекращается, вершина начинает приобретать сглаженную форму.

У лысых кучево-дождевых облаков есть своя разновидность – Cumulonimbus calvus arcus, которая определяется наличием грозового вала.

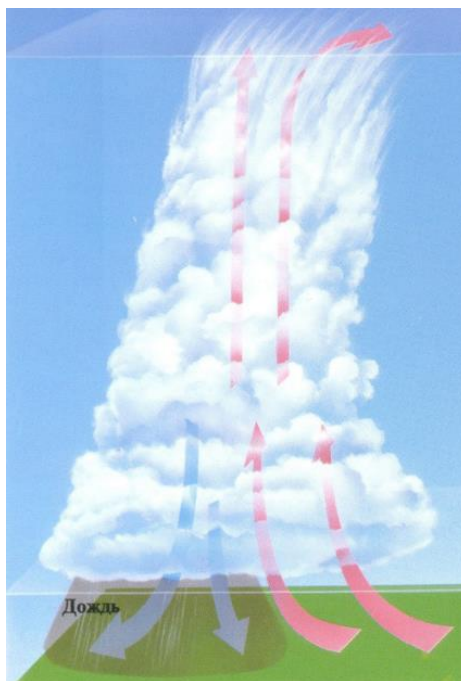


Рисунок 2.4 – Лысое кучевого-дождевое облако

Волосатые кучево-дождевые облака являются следующей стадией в формировании кучево-дождевой облачности. В данном случае уже

произошло формирование перистой облачности на верхней границе кучевого облака. Верхняя граница облака приобретает форму наковальни. Данный вид облачности можно наблюдать на рисунке 2.6.

Разновидности волосатого кучево-дождевого облака:

- 1) Волосатые с грозовым валом (*Cumulonimbus capillatus arcus*)
- 2) Волосатые с наковальней (*Cumulonimbus incus*)
- 3) Волосатые плоские (*Cumulonimbus humilis*)



Рисунок 2.6 – Волосатое кучево-дождевое облако

Классификация кучево-дождевых облаков:

- 1) Холодный фронт 1 рода.

Кучево-дождевые облака располагаются в передней части облачной системы. При прохождении фронта происходит смена кучево-дождевой облачности на слоисто-дождевую, а ливневых осадков на обложные.

1) Холодный фронт 2 рода.

Кучево-дождевая облачность – это основной вид облачности в данном случае. Располагаются перед фронтом и представляют собой облачные валы. При этом наблюдаются ливневые осадки, шкалы и грозы. Максимальное развитие в послеполуденные часы, к ночи размываются [9].

2) Теплый фронт.

Могут образовываться в стадии волны циклона, вблизи приземной линии фронта.

3) Фронт окклюзии.

Как и в случае теплого фронта, кучево-дождевая облачность образуется вблизи приземной линии фронта [9].

2.2. Условия формирования грозовой деятельности

Для образования грозовых облаков также есть особые условия, о которых следует упомянуть.

Ранее в данной работе было сказано, что для формирования конвективной облачности необходим неустойчивый слой атмосферы, мощные вертикальные потоки воздуха и значительная увлажненность воздуха. Но в случае грозовых облаков так же важно учитывать ионизацию атмосферы.

В результате процесса ионизации у воздуха появляется электропроводность, т.е. способность проводить электрический ток. Процесс ионизации представлен на рисунке 2.7.

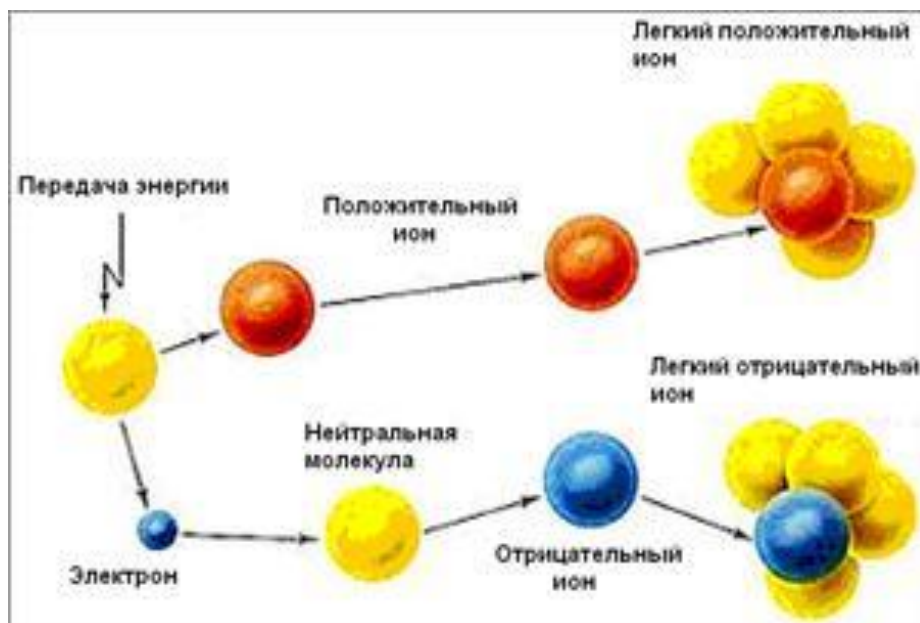


Рисунок 2.7 – Процесс образования молекулярных ионов

2.2.1. Стадии образования грозового облака

Выделяют три стадии: стадия роста, зрелости и распада.

Формирование грозового облака в первую очередь связано с наличием зарядов в облаке, а именно с их распределением.

В формирование облака участвуют ядра конденсации, имеющие положительный и отрицательный заряды. В силу особенностей формирования (на отрицательно заряженных ядрах процесс конденсации происходит при меньших пересыщениях) отрицательные ядра конденсации способствуют формированию более крупных капель. В результате обладания большой массы, отрицательно заряженные капли начинают опускаться в то время, как положительно заряженные капли продолжают свой подъем. Происходит расслоение зарядов в облаке [14].

Данный процесс называется макроэлектризацией облака [11].

В результате разделения зарядов происходит формирование электрического поля, которое способствует процессу коагуляции (процесс

формирования капель, при котором происходит их налипание друг к другу) и еще большему разделению зарядов.

В данный момент облако находится на стадии кучевого – на этапе зарождения грозового облака.

Затем облако продолжает расти вертикально и наступает стадия зрелости, представляющая собой кучево-дождевое облако.

В результате роста каплю набирают массу, что приводит к их падению – выпадению ливневых осадков.

Происходит формирование электрических разрядов. Электрическое поле, сформировано разделенными зарядами капель, достигает значений 2-3 кВ/см, в результате чего происходит электрический разряд, называемый молнией [13].

В этой стадии наблюдаются мощные восходящие потоки, достигающие 50 м/с и нисходящие по краям – 30 м/с [16].

В результате выпадения осадков происходит распад облака, на смену объемного отрицательного заряда, расположенного внизу облака, приходит положительный – происходит изменение направления электрического поля.

Это приводит к появления восходящих молний, переносящих отрицательный заряд обратно в облако.

Так же выпадение осадков приводит к ослаблению теплых восходящих потоков воздуха и прекращению разделения электрических зарядов.

Благодаря тому, что положительный заряд в верхней части облака невелик, количество восходящих молний значительно меньше нисходящих – примерно 10% от общего числа разрядов [13].

Имеются, как восходящие, так и нисходящие потоки воздуха, но их скорость совсем небольшая – порядка 5 м/с.

В результате распада облака образуется облачность различных ярусов.

Все стадии развития грозы представлены на рисунке 2.8.

На нем можно наблюдать:

- а) Стадия зарождения облака
- б) Стадия развития
- в) Стадия разрушения

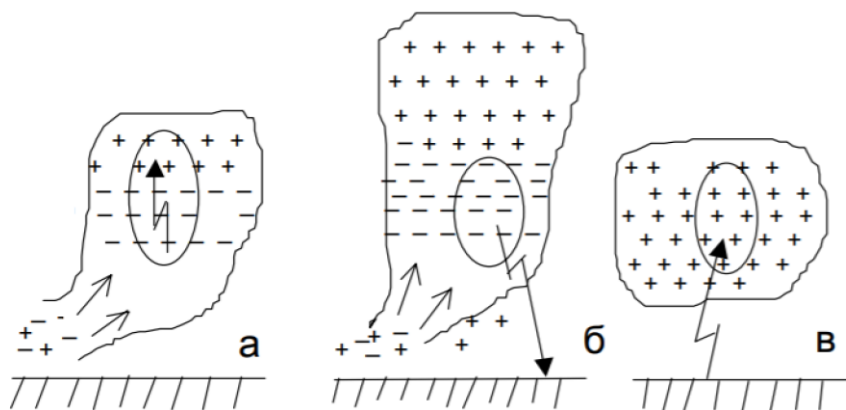


Рисунок 2.8 – Стадии развития грозового облака [стр.12, 13]

2.2.2. Классификация гроз

Классификация гроз зависит от условий их формирования.

- 1. Внутримассовые грозы
 - Oroграфические
 - Тепловые

- Адвективные
2. Фронтальные грозы
 - Грозы на холодном фронте
 - Грозы на теплом фронте
 - Грозы на фронте окклюзии

Классификация с точки зрения оценки данных о структуре радиоэха

1. Одноячейковые
2. Многоячейковые
 - Многоячейковые кластерные грозы
 - Многоячейковые линейные грозы
3. Суперячейковые

Одноячейковое грозовое облако представляет собой одно кучево-дождевое облако, сформированное при малоградиентном барическом поле и малых скоростях ветра. Иначе этот вид грозовых облаков называют локальными грозами. Горизонтальные размеры такого облака находятся в диапазоне 5-20 км, вертикальная протяженность – 8-12 км. Среднее время жизни порядка 30 минут, но может достигать и 1 часа [18].

Процесс формирования одноячейкового грозового облака представлен на рисунке 2.9.

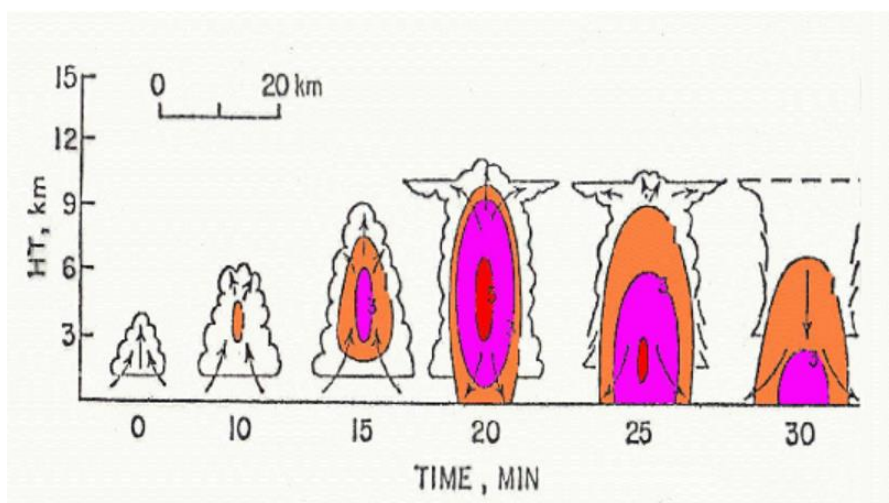


Рисунок 2.9 – Формирование одноячейкового облака [19]

К самому часто встречающемуся виду гроз относятся многоячейковые кластерные грозы. Этот вид гроз характеризуется группой грозовых ячеек, находящихся на разных стадиях формирования, при этом движущихся, как единое целое.

Сформированные грозовые ячейки, находящиеся в стадии зрелости, располагаются в центральной части кластера, остальные ячейки, продолжающие свое формирование, располагаются с подветренной стороны. Ячейки имеют горизонтальные размеры 20-40 км, в высоту часто поднимаются до уровня тропопаузы.

Такие грозы несут с собой ливневые осадки и слабые шквалистые ветра. Время жизни всего кластера может достигать нескольких часов. Имеют большую интенсивность, нежели одноячейковые грозы [18].

Пример многоячейкового грозового облака представлен на рисунке 2.10.

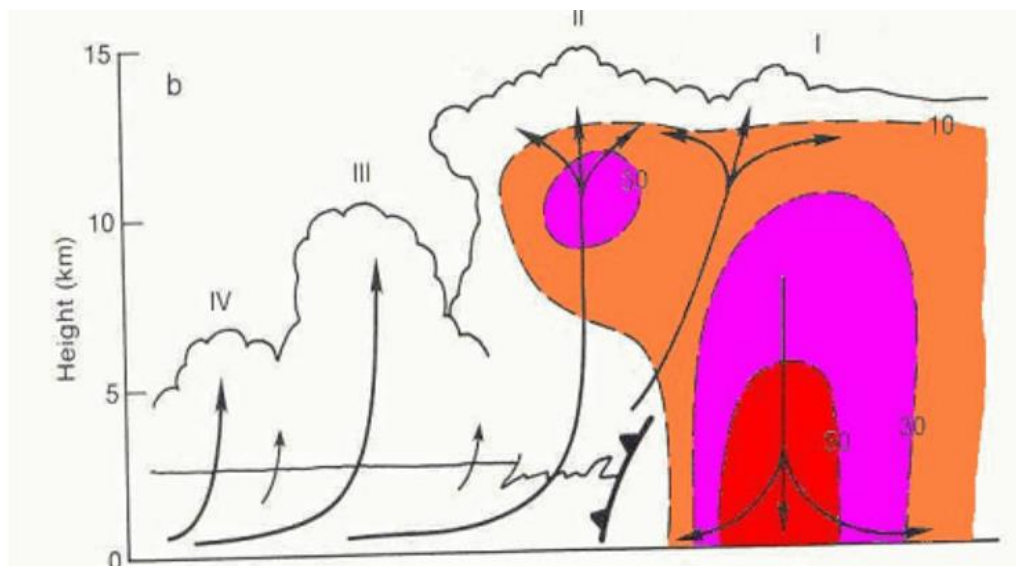


Рисунок 2.10 – Многоячейковое грозное облако [19]

Многоячейковые линейные грозы характеризуются линией шквалов.

Линии шквалов формируют мощные нисходящие потоки, могут приносить обильные ливневые осадки и крупный град. На территории России встречаются редко.

Суперячейковые грозные облака напоминают одноячейковые, т.к. оба этих вида облаков обладают одной зоной восходящего потока воздуха. Но это является единственной схожестью, в остальном суперячейка – необычный и крайне опасный вид грозовой активности.

Проявляется это в следующих особенностях: суперячейка обладает большим диаметром – около 50 км, вертикально распространяется до высоты 10-15 км, иногда даже может просачиваться в стратосферу, скорость восходящего потока достигает 40-60 м/с. Самой главной особенностью данного вида гроз является вращение восходящих потоков воздуха, поэтому в радарной терминологии суперячейки называют мезоциклонами.

Суперячейковые грозные облака несут экстремальные погодные явления: большой град (более 5 сантиметров), шквалы, достигающие 40 м/с и самое разрушительное – смерчи [18].

На рисунке 2.11 представлен вертикальный и горизонтальные разрезы суперячейкового грозного облака.

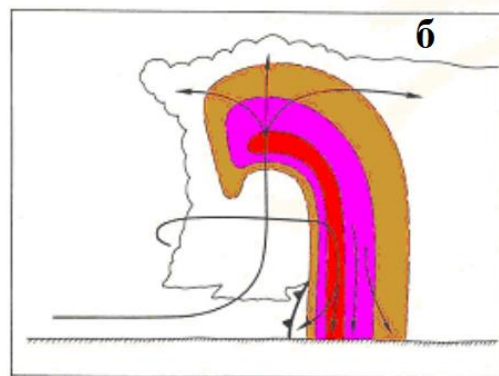
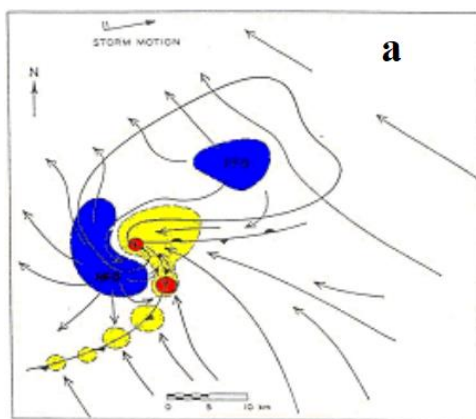


Рисунок 2.11 – Горизонтальный (а) и вертикальный (б) разрезы суперячейкового грозового облака [19]

3. Методы прогноза грозовой активности различными методами

Для прогноза грозовой деятельности используется множество различных методов: синоптические, индексы неустойчивости, использование метеорологических радиолокаторов и грозопеленгаторов, а использование различных моделей атмосферы.

3.1. Синоптические методы

В настоящее время синоптиками разработано большое количество различных синоптических методов, позволяющих успешно прогнозировать возникновение гроз и грозового положения. В данном разделе будут рассмотрены лишь некоторые из них в силу того, что все методы охватить невозможно: метод Вайтинга, Фауста, А.В. Фатеева, Кокса, Бейли, Н.В. Лебедевой, Б.Е. Пескова, Г.Д. Решетова и многие другие.

Большинство разработанных синоптических методов полагаются на адиабатическую теорию, которая предполагает прогноз методом частицы и слоя.

Суть данных методов заключается в следующем:

1. Метод частицы

Изменение воздушных потоков происходит исключительно по адиабатическому закону, взаимодействия с окружающим воздухом не происходит, также отсутствует учет нисходящих потоков.

На данном методе основаны: метод Кокса, Вайтинга, Г.Д. Решетова, Н.В. Лебедевой и т.д.

2. Метод слоя

Изменения воздушных потоков в данном случае происходят по сухоадиабатическому закону, а также происходит учет нисходящих потоков. Но данный методом крайне сложен в расчетах.

Примеры: методы А. Симиля, Н.С. Шишкина.

3. Метод И.А. Славина

Отдельно стоящий метод, т.к. учитывает неадиабатичность процессов в облаке

Особенность метода в том, что учитывается эффект «вовлечения».
[20].

Более подробно решено рассмотреть метод Г.Д. Решетова по той причине, что в данной работе он используется для оценки качества полученных результатов.

3.1.1. Метод Г.Д. Решетова

В методе Решетова принято, что для центральной части восходящего потока воздуха влияние эффекта вовлечения несущественно.

Прогноз грозовой деятельности необходимо начать с анализа синоптической ситуации и нахождения условий необходимых для образования грозовой облачности.

По аэрологической диаграмме выполняется построение прогностических кривых температуры и точки росы до изобарической поверхности 100 гПа.

Затем происходит расчет предикторов, по которым графическим или расчетным (по дискриминантным функциям) методом определяется возможность образования грозы или грозового положения.

В качестве предикторов используются: расчетная высота верхней границы облачности (H_B), расчетная температура воздуха на верхней границе облачности (T_B) и мощность облака в зоне отрицательных температур (ΔH).

H_B и T_B определяются по аэрологической диаграмме, а ΔH определяется по формуле 3.5:

$$\Delta h_{0^{\circ}\text{C}}^B = H_B - H_{0^{\circ}\text{C}}, \quad (3.5)$$

где $H_{0^{\circ}\text{C}}$ – высота нулевой изотермы в облаке, км.

На рисунке 3.2. представлен график, который позволяет определить возможность прогноза грозовой деятельности.

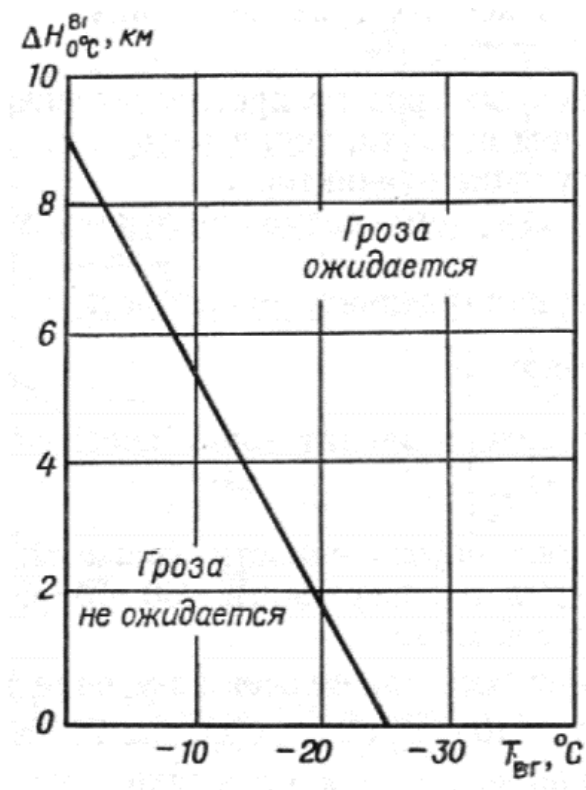


Рисунок 3.2. – График для прогнозирования гроз по методу Г.Д. Решетова
[стр.164, 20]

Прямая линия на представленном графике соответствует дискриминантной функции L_1 , которая рассчитывается по формуле 3.6.

$$L_1 = -0,022 \cdot T_B + 0,08 \cdot h_0^B \cdot ^\circ C - 0,562 \quad (3.6)$$

Дискриминантная функция L_2 рассчитывается по формуле 3.7.

$$L_2 = 0,36 \cdot H_B - 0,0753 \cdot T_B - 0,53 \cdot h_0^B \cdot ^\circ C - 3,36 \quad (3.7)$$

Далее приведены критерии для определения грозы:

- $L_1 < 0$ – интенсивная конвекция в данном случае не прогнозируется;
- $L_1 \geq 0$ и $L_2 < 0$ – прогнозируется грозовая активность;
- $L_1 \geq 0$ и $L_2 \geq 0$ – прогнозируется гроза с градом [20].

3.2. Индексы неустойчивости, как метод прогноза грозовой активности

1) K_i

Расчет K_i основан на вертикальном градиенте температуры, влажности воздуха в нижней тропосфере, а также учёте вертикальной протяженности влажного воздушного слоя.

K_i характеризует степень конвективной неустойчивости воздушной массы, которая требуется для возникновения и развития гроз.

$$K_i = T_{850} - T_{500} + Td_{850} - \Delta Td_{700} \quad (3.1)$$

где K_i — индекс неустойчивости (число Вайтинга),

T_{850} — температура воздуха на изобарической поверхности 850 гПа,

T_{500} — температура воздуха на 500 гПа,

Td_{850} — температура точки росы на 850 гПа,

Td_{700} — дефицит точки росы ($T - Td$) на поверхности 700 гПа.

K_i наиболее хорошо подходит для использования в летний период для прогнозирования внутримассовых гроз.

2) В таблице 3.1 приведены пороговые значения для определения наличия грозы по индексу K_i

Таблица 3.1 – Пороговые значения для определения наличия грозы по индексу K_i

K_i	Количественная оценка	Определение терминов покрытия
< 20	Без гроз	—
$20 \leq K_i \leq 25$	Отдельные изолированные грозы	Не более 10% площади территории
$25 < K_i \leq 30$	Несколько гроз	Не более 10-20% площади территории
$30 < K_i \leq 35$	Рассеянные грозы	20-50% площади территории
$35 < K_i \leq 40$	Многочисленные грозы	50-70% площади территории
$K_i > 40$	Грозы повсеместно	Грозовые очаги занимают >70% территории

3) VT — Vertical Totals индекс

$$VT = T_{850} - T_{500},$$

где T_{850} — температура воздуха на изобарической поверхности 850 гПа,

T_{500} — температура воздуха на 500 гПа.

Критерии индекса VT:

При значениях $VT > 28$, атмосфера обладает высоким потенциалом конвективной неустойчивости.

4) CT — Cross Totals индекс

$$CT = Td_{850} - T_{500},$$

где Td_{850} — температура точки росы на 850 гПа,

T_{500} — температура воздуха на 500 гПа.

Критерии индекса СТ:

- При $СТ < 18$ — Тропосфера обладает низким потенциалом конвективной неустойчивости.
- $СТ\ 18 - 19$ — Умеренная неустойчивость. Слабая грозовая деятельность.
- $СТ\ 20 - 21$ — Высокая неустойчивость. Грозы.
- $СТ\ 22 - 23$ — Энергия неустойчивости при которой возможны сильные грозы.
- $СТ\ 24 - 25$ — Высокая энергия неустойчивости. Сильные грозы.
- $СТ > 25$ — Очень высокая энергия неустойчивости. Очень сильные грозы.

5) ТТ — Total Totals индекс

$$ТТ = VT + СТ,$$

где СТ — Cross Totals индекс,

VT — Vertical Totals индекс.

Критерии индекса ТТ:

- При $ТТ < 44$ — Грозовая деятельность не возможна.
- $ТТ\ 44 - 45$ — Отдельная гроза или несколько гроз.
- $ТТ\ 46 - 47$ — Рассеянные грозовые очаги.
- $ТТ\ 48 - 49$ — Значительные количество гроз, отдельные из которых сильные.
- $ТТ\ 50 - 51$ — Рассеянные сильные грозовые очаги, отдельные очаги со смерчем.
- $ТТ\ 52 - 55$ — Значительное количество очагов сильных гроз, отдельные очаги со смерчем.
- $ТТ > 55$ — Многочисленные сильные грозы с сильными смерчами.

6) SWEAT — Severe Weather ThrEAT индекс

SWEAT — индекс неустойчивости, разработанный в BBC США. SWEAT — комплексный критерий для диагноза и прогноза опасных и стихийных явлений погоды, связанных с конвективной облачностью. SWEAT включает в себя индекс неустойчивости воздушной массы, скорость и сдвиг ветра.

$$\text{SWEAT} = 12 \cdot Td_{850} + 20 \cdot (\text{TT} - 49) + 3.888 \cdot F_{850} + 1.944 \cdot F_{500} + (125 \cdot [\sin(D_{500} - D_{850}) + 0.2])$$

где Td_{850} — температура точки росы на 850 гПа,

TT — Total Totals индекс,

F_{850} — скорость ветра на 850 гПа,

F_{500} — скорость ветра на 500 гПа,

D_{500} и D_{850} — направление ветра на соответствующих поверхностях.

В формуле:

- Температура воздуха дана в градусах Цельсия;
- Скорость ветра — в м/с;
- Направление ветра — в градусах;
- Второй член уравнения установить в 0, если $\text{TT} \leq 49$;
- Последнее слагаемое в формуле будет равно нулю, если не выполняется любое из следующих условий:
 - D_{850} в диапазоне от 130 до 250 градусов;
 - D_{500} в диапазоне от 210 до 310 градусов;
 - Разность в направлении ветра ($D_{500} - D_{850}$) положительна;
 - F_{850} и F_{500} скорости ветра ≤ 7 м/с.

Критерии индекса SWEAT:

- $\text{SWEAT} < 250$ — нет условий для возникновения сильных гроз;
- $\text{SWEAT} 250\text{-}350$ — есть условия для сильных гроз, града и шквалов;

- SWEAT 350-500 — есть условия для очень сильных гроз, крупного града, сильных шквалов, смерчей;
- $SWEAT \geq 500$ — условия для очень сильных гроз, крупного града, сильных шквалов, сильных смерчей.

7) L_i — Lifted index

L_i — Разница температур окружающего воздуха и некоторого единичного объёма, поднявшегося [адиабатически] от поверхности земли (или с заданного уровня) до уровня 500 гПа. L_i рассчитывается с учётом вовлечения окружающего воздуха.

L_i — характеризует термическую стратификацию атмосферы по отношению к вертикальному перемещению воздуха.

Критерии индекса:

- $L_i \geq 6$ — Глубокая инверсия. Атмосфера очень устойчива. Развиты нисходящие движения воздуха.
- $1 \leq L_i \leq 5$ — Устойчивое состояние атмосферы. Кучевая облачность хорошей погоды.
- $0 \geq L_i \geq -2$ — Небольшая неустойчивость. Конвективная облачность с ливнями, при интенсивном дневном прогреве или в зоне атмосферного фронта — с грозами и градом.
- $-3 \geq L_i \geq -5$ — Умеренная неустойчивость. Сильные грозы.
- $L_i \leq -6$ — Высокая неустойчивость. Очень сильные грозы.

8) T_i — Thompson index

$$T_i = K_i - L_i$$

где K_i — К-индекс (число Вайтинга),

L_i — Lifted index.

Критерии индекса:

- $T_i < 25$ — Без гроз.
- $T_i 25 - 34$ — Возможны грозы.
- $T_i 35 - 39$ — Грозы, местами сильные.

- $T_i \geq 40$ — Сильные грозы.

9) CAPE — Convective Available Potential Energy

CAPE — Потенциальная энергия конвективной неустойчивости, которая напрямую связана вертикальной скоростью восходящих потоков. Более высокие значения энергии неустойчивости указывают на более интенсивную конвекцию в облаке, т.е. на более опасные явления погоды.

На аэрологической диаграмме, запасы энергии неустойчивости представляют собой области, заключенные между кривыми стратификации и состояния. Кривая стратификации — красная линия на диаграмме, которая показывает распределение температуры воздуха с высотой. Кривая состояния — синяя линия на диаграмме, характеризует изменения температуры в адиабатически поднимающейся частице воздуха.

Взаимное положение кривых стратификации и состояния позволяет судить об энергии неустойчивости. Область на аэрологической диаграмме с положительной энергией неустойчивости заштрихована красным цветом. Эта область на диаграмме, между нижней и верхней границей конвекции, называется также конвективно-неустойчивым слоем — КНС.

Общий запас энергии неустойчивости в атмосфере CAPE находится как алгебраическая сумма энергий неустойчивости отдельных слоёв E_i .

E_i — это работа, совершаемая силой плавучести при адиабатическом подъеме единичной массы воздуха от нижней границы слоя z_0 до верхней z_1 .

$$E_i = g \cdot z_0 \int_{z_1} (T_i - T_e) dz / p_0.286, [\text{Дж/кг}],$$

где T_i — температура частицы воздуха,

T_e — температура окружающего воздуха,

g — ускорение свободного падения.

Критерии индекса CAPE:

- 400-1000 Дж/кг — небольшая неустойчивость (Cu, Cb, слабые ливневые осадки);
- 1000-2500 Дж/кг — умеренная неустойчивость (Cb с ливнями, грозы);
- 2500-3500 Дж/кг — сильная неустойчивость (грозы, местами сильные);
- ≥ 3500 Дж/кг — очень сильная неустойчивость (сильные и очень сильные грозы, смерчи).

10) CIN — Convective INhibition

CIN — количество энергии, необходимой частице воздуха для преодоления в нижней тропосфере задерживающего слоя. В этом слое перемещение воздушных частиц по вертикали вверх затруднено или полностью исключено. В частности, слои инверсии температуры воздуха имеют наиболее устойчивую стратификацию и препятствуют развитию восходящих движений воздуха. На аэрологической диаграмме CIN — область от поверхности земли до нижней границы КНС. Значение CIN больше 200 Дж/кг достаточно для предотвращения конвекции в атмосфере. Энергию CIN принято записывать отрицательными числами.

К разрушению задерживающего слоя приводят:

- интенсивный дневной прогрев;
- увлажнение пограничного слоя атмосферы (адвекция влажного воздуха или испарение с местных источников влаги);
- подъем воздуха синоптического масштаба.

3.3. Использование метеорологических радиолокаторов, грозопеленгаторов и спутниковой информации для прогноза грозовой активности

3.3.1. Радиолокаторы как источник важной метеорологической информации

Одним из самых оперативных средств получения информации о местоположении грозовых облаков является радиолокационная информация.

Создание сети метеолокаторов, в которых используется доплеровский сдвиг частоты, позволило с помощью поступления современной радиолокационной информации перенести метеобеспечение на новый уровень, т.к. данная информация позволяет получить более оперативную и объективную информацию о состоянии атмосферы.

Получение радиолокационной информации позволяет осуществлять анализ синоптической обстановки, отслеживание опасных атмосферных явлений и даже способствует разработке сверхкраткосрочных прогнозов.

Благодаря радиолокационным наблюдениям можно узнать следующие характеристики погоды: расположение, перемещение, форму облачности; информацию о верхней границе облаков, что очень важно, т.к. с поверхности земли при наличии нижней облачности, сильно затрудняется обнаружение вышерасположенных форм облачности; зоны перемещения и выпадения, интенсивность осадков; развитие различных метеобъектов.

Пример карты явлений погоды по данным радарных наблюдений представлен на рисунке 3.1.

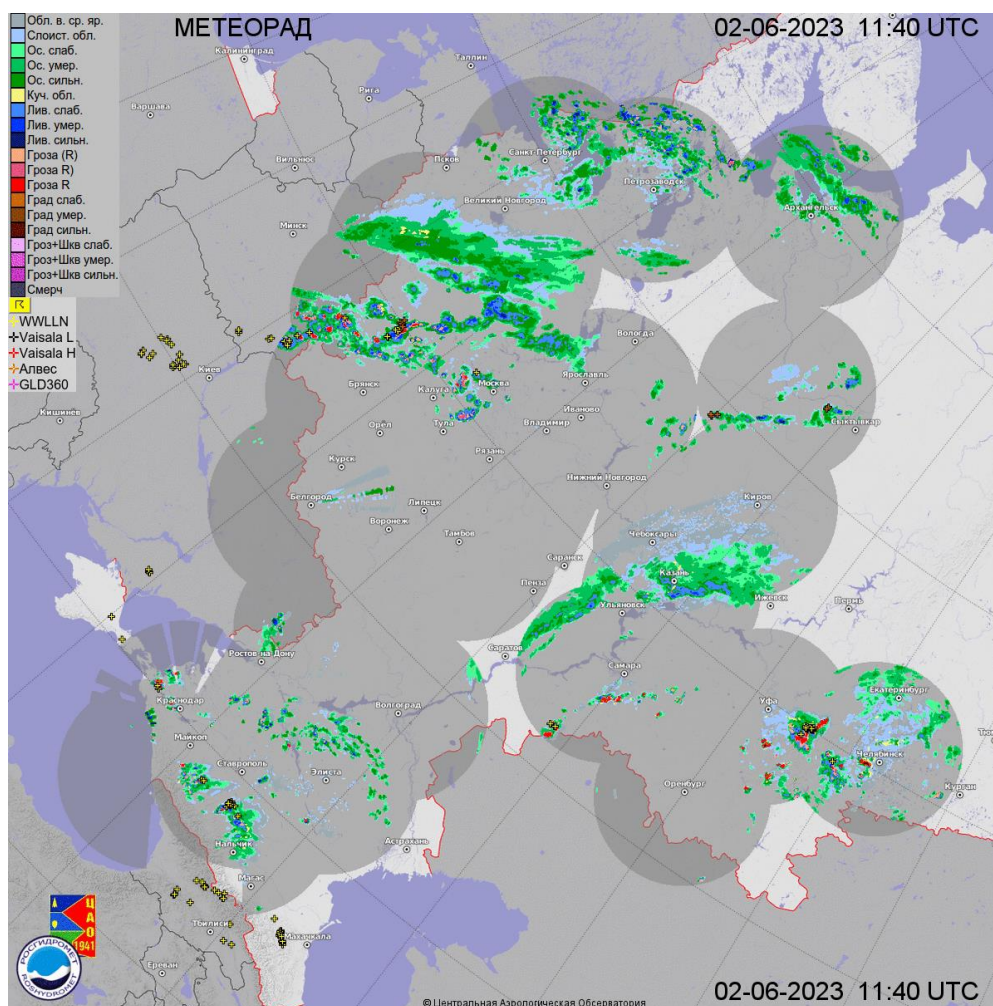


Рисунок 3.1 – Карты явлений погоды по данным радарных наблюдений [25]

На карте представлено перемещение различных форм облачности и метеорологических явлений (грозы и ливни различной интенсивности).

Все выше написанные метеорологические характеристики имеют прямое отношение к грозовой деятельности, что позволяет судить о важности и в некоторых случаях необходимости использования радиолокационных методов для обнаружения гроз.

Получение оперативной, значительно более полной и объективной информации, дает возможность повысить уровень надежности и оправдываемости уже существующих метеорологических прогнозов, а также дает информацию для создания новых.

Радиолокаторы, используемые в метеорологии для обнаружения и развития облачности, осадков и различных явлений:

- 1) Доплеровский метеорологический радиолокатор (ДМРЛ)
- 2) Микродождевой радиолокатор вертикального зондирования (MRR-2)

3.3.2. Важность использования грозопеленгационной информации

Грозопеленгационной системой происходит фиксирование всех электрических разрядов, происходящих в атмосфере.

Но не всех электрические разряды связаны с грозовой активностью, поэтому грозопеленгационные системы и радиолокаторы дополняют друг друга, позволяя получить более точную и корректную информацию о местоположение грозовых облаков.

Грозопеленгационные системы, используемые в Росгидромете:

- 1) Грозопеленгационная система «Алвес»
- 2) 8 датчиков LS8000 фирмы Вайсала

Увеличение метеорологической сети и установка новых грозопеленгационных систем, особенно в тех районах, где отсутствуют радиолокационные наблюдения, позволит существенно увеличить прогнозирование гроз, повысить оправдываемость прогнозов, а значит и совершенствование используемых методов.

3.3.3. Спутниковые снимки как дополнение для прогноза грозовой активности

Спутниковые снимки могут использоваться также в качестве дополнения ко всем остальным источникам информации: стандартной информации с метеостанций, аэрологическому зондированию атмосферы, радиолокационной и грозопеленгационной информации, модельным данным различных моделей атмосферы.

Спутниковые снимки позволяют получить синоптикам следующую информацию о состоянии атмосферы:

- 1) В глобальных масштабах отслеживание формирования и развития различных барических образований (циклоническая,

антициклоническая деятельность, формирование фронтальных систем, струйные течения и т.д.)

- 2) При детализации спутниковых снимков оценка мощности, а также степени опасности того или иного вида облачности, атмосферного явления. В особенности явлений конвективной природы.

Возможность посмотреть на атмосферу и Землю в целом из космоса, позволяет практикующим синоптикам и ученым сконцентрированным на изучение атмосферы продолжать делать всевозможные открытия.

Далее представлены примеры оперативных спутниковых данных с геостационарных спутников MeteoSat, взятых с сайта Росгидромета - <https://meteoinfo.ru/>.

На рисунке 3.2 представлен спутниковый снимок облачности.

На рисунке 3.3. представлен спутниковый снимок канала водяного пара.

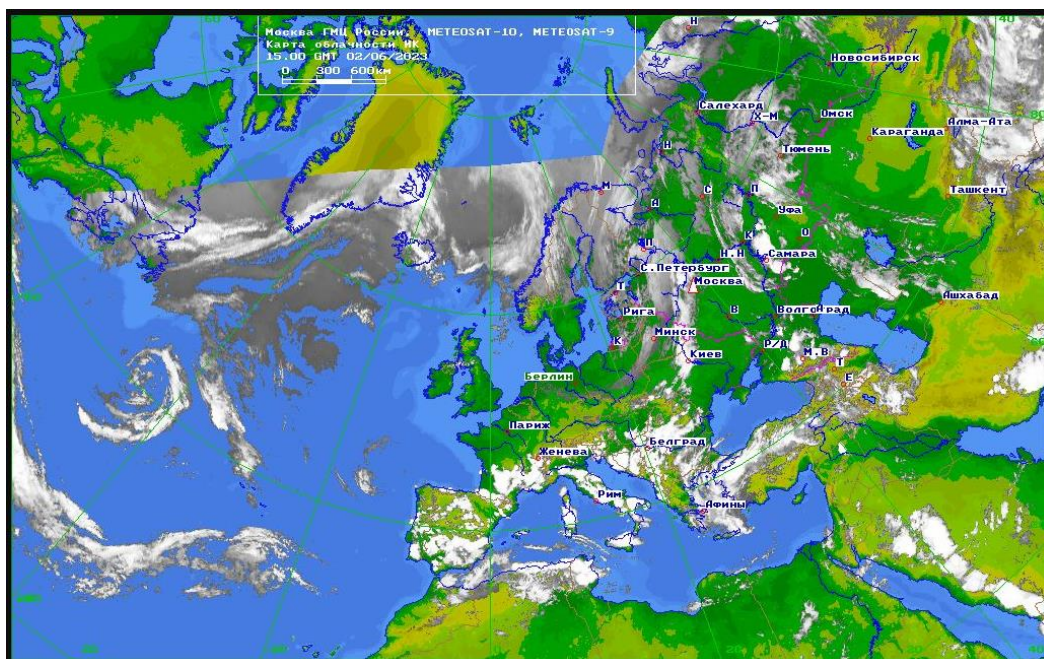


Рисунок 3.2 – Спутниковые данные с геостационарных спутников MeteoSat.

Облачность – Северная Атлантика и Европа

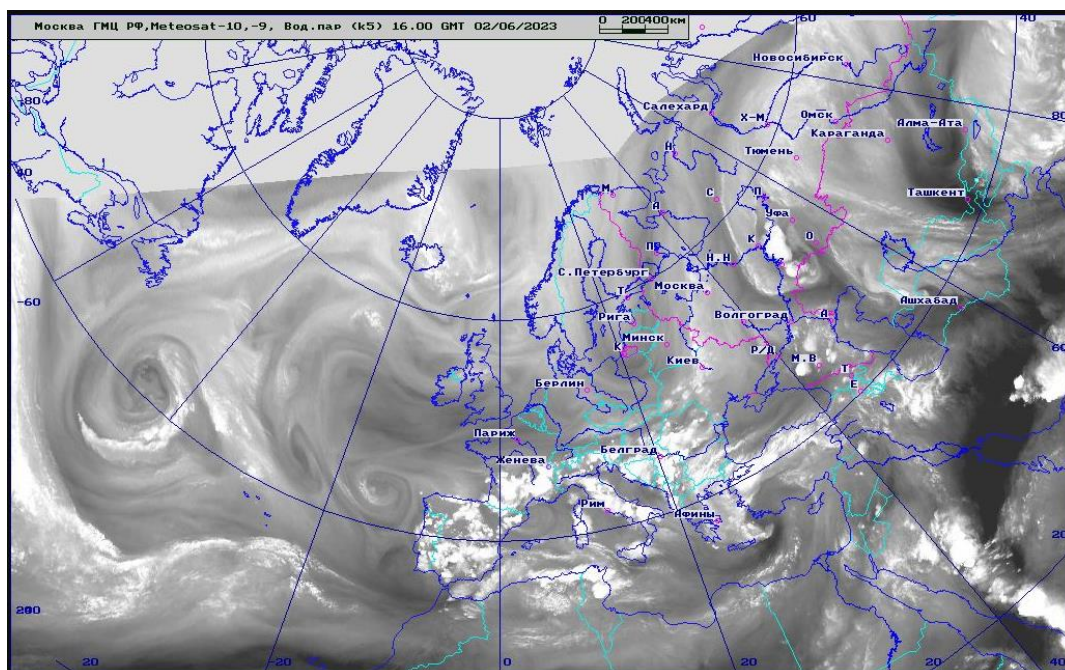


Рисунок 3.3 – Спутниковые данные с геостационарных спутников MeteoSat.

Водяной пар – Северная Атлантика и Европа

Спутниковые снимки рисунков 3.2 и 3.3 представлены для следующего района: Северная Атлантика, Европа.

3.3.4. Автоматизированный метод МСЗ

В данном методе используется информация с геостационарных спутников НИЦ «Планета» (автор – М.В. Бухаров). Она представлена в виде автоматизированного метеорологического диагноза текущего состояния атмосферы. Поступление информации происходит с периодичностью в 15 минут.

Полезность данной информации заключается в следующем: развитие явлений конвективного происхождения происходит относительно быстро и стандартной метеорологической информации для их прогноза, а самое главное подъема штормового предупреждения, может быть недостаточно. Связано это с недостаточной плотностью и частотой поступления данных. Прогностические модели в данном случае имеют тот же недостаток: обновление выходных данных редко и недостаточно точно.

Для решения возникших проблем автоматизированный метод МЗС оказывается очень полезен благодаря частоте поступающей информации.

Но также данный метод подходит для уточнения уже спрогнозированного явления, что повышает надежность прогноза.

Однако необходимо учесть. Что данный метод, как и любой другой, обладает своими погрешностями, которые могут существенно сказаться на прогнозе. Поэтому использовать метод МЗС следует в качестве дополнительной информации.

Основан данный метод на построении карт спутникового диагноза, которые представлены на рисунке 3.4 [31].

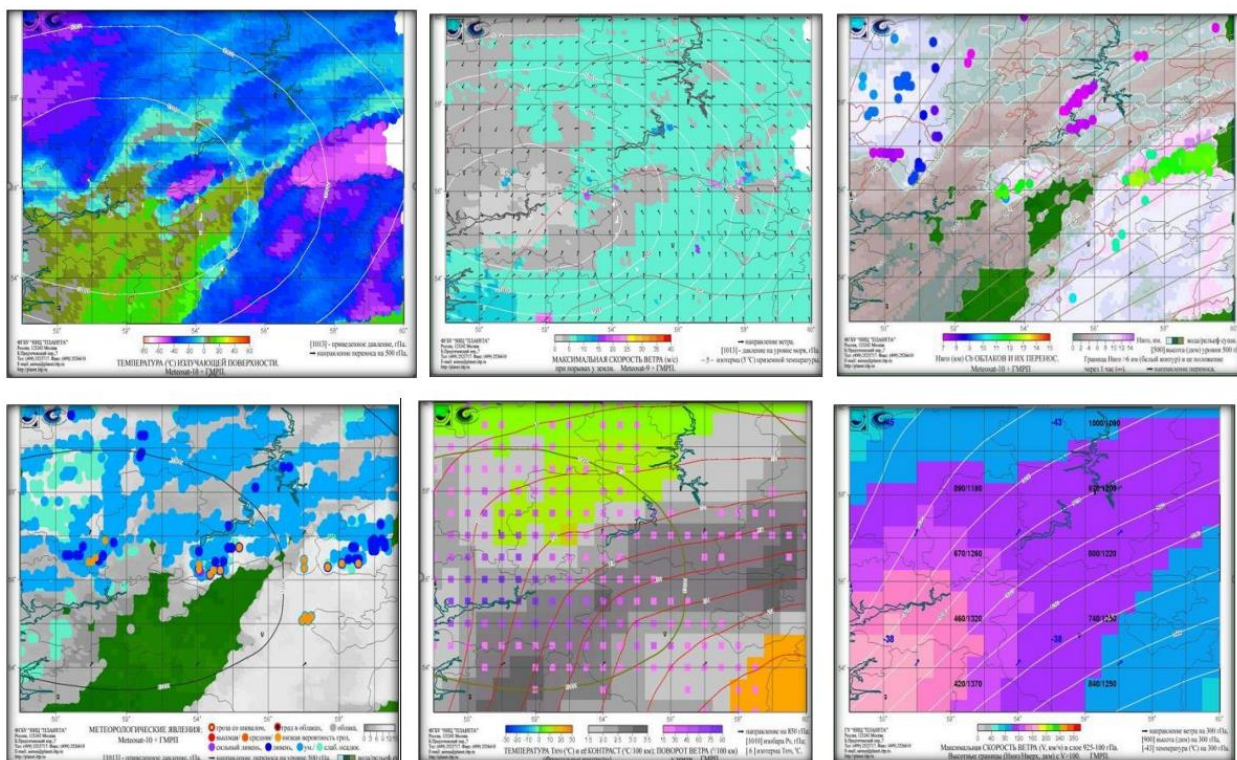


Рисунок 3.4. Карты спутникового диагноза автоматизированного метода МЗС.

4. Использование мезомасштабной атмосферной моделей погоды WRF-ARW для численного прогноза гроз на территории Северо-Запада ЕЧР

Численный прогноз погоды – это прогноз, полученный в результате выполнения численного моделирования и интерпретирования его результатов.

Основа любого численного прогноза – это система гидродинамических и физических уравнений, описывающих происходящие в атмосфере процессы и связывающих эти процессы между собой.

- 1) Гидродинамические уравнения движение воздушной среды описывают эволюцию процессов, происходящих в данной среде;
- 2) Физические уравнения служат для описания физических процессов в той же воздушной среде, сопутствующих гидродинамическим процессам.

Процедура прогноза на основе гидродинамических и физических уравнений заключается в следующих этапах:

- 1) Гидродинамические и физические уравнения аппроксимируются и представляются в виде конечно-разностных аналогов.
- 2) Задаются начальные и граничные условия, необходимые для начала расчета численной модели.
- 3) Затем происходит расчет конечно-разностных аналогов всех членов прогностических уравнений во всех узлах сетки.
- 4) Расчет зависимых переменных (метеорологических величин) за каждый шаг по времени, при использовании на следующем шаге по времени полученных значений в качестве начальных данных.
- 5) Расчет метеорологических величин, описанных физическими уравнениями.

- 6) При многократном проведении выше описанных этапов, на выходе получается прогноз метеорологических величин для заданного момента времени.

Выделяют следующие виды численных гидродинамических моделей атмосферы:

- 1) Крупномасштабные: предназначены для описания процессов с горизонтальной протяженностью порядка нескольких тысяч км, а именно для описания различных синоптических процессов (циклоническая, антициклоническая деятельность и т.д.) за период 5-7 суток.
- 2) Мезомасштабные: созданы для описания процессов с горизонтальными процессами порядка 10-100 км, за период до 3 суток. Используются для составления сверхкраткосрочных, краткосрочных прогнозов.

Также численные гидродинамические модели можно разделить на глобальные и региональные.

При производстве расчетов посредством глобальных численных гидродинамических моделей в качестве начальных данных используются данные фактических наблюдений.

В то время, как при использовании региональных численных гидродинамических моделей в качестве начальных данных принимаются исходные данные, получаемые из глобальных моделей. Такие данные называются материнскими.

В представленной работе для расчета численного прогноза грозовой активности используется мезомасштабная атмосферная модель погоды WRF-ARW, поэтому в дальнейшем речь пойдет о данной модели.

4.1. Мезомасштабная атмосферная модель погоды WRF-ARW

WRF – Weather Research and Forecasting

ARW — Advanced Research WRF.

Разработка мезомасштабная атмосферная модель погоды WRF-ARW началась в США во второй половине 1990-х годов.

В разработке участвовали следующие исследовательские центры:

- 1) Национальный центр атмосферных исследований (NCAR – National Center for Atmospheric Research)
- 2) Национальная администрация по океану и атмосфере (NOAA) BBC США (AFWA).

ARW является динамическим ядром модели WRF. Также существует модель WRF-NMM с динамическим ядром NMM (Nonhydrostatic Mesoscale Model).

Предполагается, что в будущем модели WRF- ARW и WRF-NMM одной единой прогностической системой.

Модель ARW является моделью общего пользования, что позволяет воспользоваться кодами модели, которые расположены на сайтах NCAR или NCEP.

В эксплуатацию модель WRF-ARW вошла в 2004 году.

В качестве начальных данных для произведения расчетов при использовании данной модели применяются выходные данные глобальной гидродинамической модели GFS. Однако могут быть использованные выходные параметры и других глобальных и региональных моделей.

К ним предъявляются следующие требования:

- 1) В выходных прогностических данных выбранной модели погоды обязательно должны содержаться переменные, необходимые для инициализации модели WRF-ARW.

- 2) Выходные прогностические данные должны быть представлены в кода GRIB.

4.1.1. Динамическое ядро WRF-ARW

Особенности динамического ядра модели WRF-ARW:

- 1) В основе модели лежат негидростатические уравнения для сжимаемой жидкости. Для записи горизонтальных координат используется декартова система координат.
- 2) В качестве орографической координаты используется координата η , которая зависит от гидростатического давления
- 3)

$$\eta = \frac{(P_h - P_{ht})}{\mu}, \quad (4.1)$$

где P_h , P_{ht} – гидростатическое давление на нижней и верхней границах.

- 4) В модели используется вертикальная координата π , которая позволяет привести уравнение сохранения массы в дивергентную форму, а также в итоге упростить уравнения движения в дивергентной форме.

Вертикальная координата π обладает такой же зависимостью от высоты, что и гидростатическое давление.

$$\frac{\partial \pi}{\partial z} = -\rho g \quad (4.2)$$

- 5) Все прогностические уравнения представлены в дивергентной форме. Единственным исключением является уравнение (6)

Система гидродинамических уравнений, используемых в модели WRF-ARW:

$$\begin{aligned} \frac{\partial U}{\partial t} + m \left[\frac{\partial}{\partial x}(Uu) + \frac{\partial}{\partial y}(Vu) \right] + \frac{\partial}{\partial \eta}(\Omega u) + \left(\mu_d \alpha \frac{\partial p'}{\partial x} + \mu_d \alpha' \frac{\partial \bar{p}}{\partial x} \right) + \\ + \left(\alpha / \alpha_d \right) \left(\mu_d \frac{\partial \Phi'}{\partial x} + \frac{\partial p'}{\partial \eta} \frac{\partial \Phi}{\partial x} - \mu'_d \frac{\partial \Phi}{\partial x} \right) = F_U, \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial V}{\partial t} + m \left[\frac{\partial}{\partial x}(Uv) + \frac{\partial}{\partial y}(Vv) \right] + \frac{\partial}{\partial \eta}(\Omega v) + \left(\mu_d \alpha \frac{\partial p'}{\partial y} + \mu_d \alpha' \frac{\partial \bar{p}}{\partial y} \right) + \\ + \left(\alpha / \alpha_d \right) \left(\mu_d \frac{\partial \Phi'}{\partial y} + \frac{\partial p'}{\partial \eta} \frac{\partial \Phi}{\partial y} - \mu'_d \frac{\partial \Phi}{\partial y} \right) = F_V, \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial W}{\partial t} + m \left[\frac{\partial}{\partial x}(Uw) + \frac{\partial}{\partial y}(Vw) \right] + \frac{\partial}{\partial \eta}(\Omega w) - \\ - \frac{g}{m} \left(\alpha / \alpha_d \right) \left[\frac{\partial p'}{\partial \eta} - \bar{\mu}_d (q_v + q_c + q_r) \right] + \frac{g}{m} \mu'_d = F_W, \end{aligned} \quad (5)$$

$$\frac{\partial \Phi'}{\partial t} + \frac{1}{\mu_d} \left[m^2 \left(U \frac{\partial \Phi}{\partial x} + V \frac{\partial \Phi}{\partial y} \right) + m \Omega \frac{\partial \Phi}{\partial \eta} - gW \right] = 0, \quad (6)$$

$$\frac{\partial \mu'_d}{\partial t} + m^2 \left[\frac{\partial U}{\partial x} + \frac{\partial V}{\partial y} \right] + m \frac{\partial \Omega}{\partial \eta} = 0, \quad (7)$$

$$\frac{\partial \Theta}{\partial t} + m^2 \left[\frac{\partial}{\partial x}(U\theta) + \frac{\partial}{\partial y}(V\theta) \right] + m \frac{\partial}{\partial \eta}(\Omega \theta) = F_\Theta, \quad (8)$$

$$\frac{\partial Q_m}{\partial t} + m^2 \left[\frac{\partial}{\partial x}(Uq_m) + \frac{\partial}{\partial y}(Vq_m) \right] + m \frac{\partial}{\partial \eta}(\Omega q_m) = F_{Q_m}. \quad (9)$$

Полный и подробный вывод выше написанных гидродинамических уравнений представлен в работах Скамароха и др. [32], Клемпа и др. [33].

Диагностические уравнения, дополняющие систему гидродинамических уравнений:

$$\frac{\partial \bar{\Phi}}{\partial \eta} = -\bar{\mu} \bar{\alpha}, \quad (10)$$

И уравнение для возмущений:

$$\frac{\partial \Phi'}{\partial \eta} = -\bar{\mu} \alpha' - \mu' \alpha, \quad (11)$$

4.1.2. Метод численного решения модели WRF-ARW

Расчет прогностических параметров модели WRF-ARW пространственно представлен параллелепипедом, основание которого касается Земли, а его горизонтальные оси (декартовы координаты) соответствуют долготным и широтным линиям.

Расчеты в модели WRF-ARW могут производиться на вложенных сетках исключительно горизонтально, поэтому вертикальные расчеты должны быть одинаковы для всех вложенных сеток. Также имеется возможность производить расчеты на подвижной сетке.

В данной модели используется подход с расщеплением по времени.

Для интегрирования низкочастотных или медленных мод (процессы переноса) используется метод Рунге-Кутты 3-го порядка, а интегрирование высокочастотных акустических мод (поля давления и скорости) происходит с меньшим шагом по времени.

Для пространства используется тип сетки «С» представленный в классификации Аракавы (рисунок 4.1.)

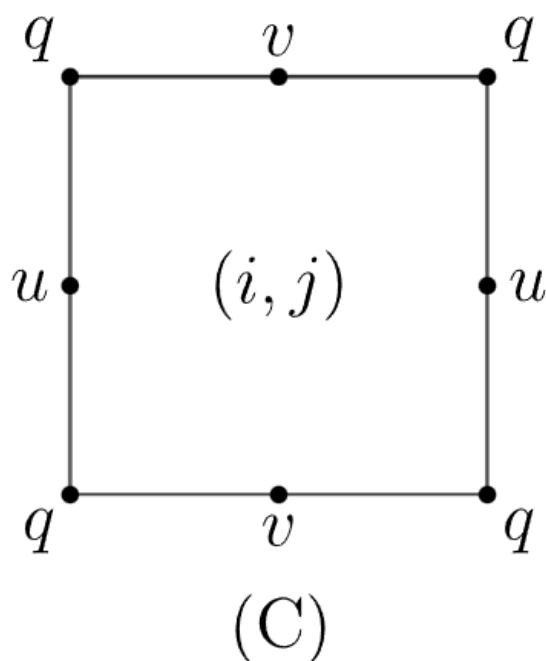


Рисунок 4.1 – Сетка С по классификации Аракавы

4.1.3. Параметризация физических процессов модели ARW

Параметризация физических процессов – крайне важный этап в проведении численного прогноза при использовании гидродинамической модели погоды. В атмосфере существуют процессы, которые невозможно описать посредством использования гидродинамических уравнений в силу быстроты их развития, и что самое главное, их относительно малых размеров. Такие процессы называются подсеточные и для их нахождения используют параметризацию.

Параметризация процессов, которые рассчитываются моделью WRF-ARW:

1. Параметризация подсеточной турбулентности
2. Параметризация микрофизических процессов
 - 1) Параметризация Кесслера
 - 2) Параметризация Линя
 - 3) Параметризации WSM3, WSM5 и WSM6
 - 4) Параметризация Ферьера
 - 5) Параметризация Томпсона
 - 6) Параметризация Центра им. Годдарда
 - 7) Параметризация Моррисона и др.
3. Расчет радиационных потоков

Длинноволновая радиация:

- 1) Схема RRTM
- 2) Схема GFDL
- 3) Схема CAM

Коротковолновая радиация

- 1) Схема Дудья
- 2) Схема Eta GFDL
- 3) Схема CAM

4. Параметризация пограничного слоя
 - 1) Параметризация MRF
 - 2) Параметризация университета Ёнсей (YSU)
 - 3) Параметризация Меллора-Ямады-Янича (MYJ)
 - 4) Параметризация ACM2
5. Параметризация приземного слоя
 - 1) Схема подобия MM5
 - 2) Схема подобия Eta (Янича)
 - 3) Схема подобия GFS
6. Параметризация процессов на поверхности и в почве
 - 1) Пятислоистая модель термической диффузии
 - 2) Унифицированная модель Noah
 - 3) Модель RUC
 - 4) Модель Плейма-Ксю
7. Параметризация конвекции
 - 1) Схема Беттса-Миллера-Янича
 - 2) Схема Каина-Фритша
 - 3) Ансамбль Грела-Дэвени
 - 4) Ансамбль Грела 3d

4.1.4. Структура прогностической системы гидродинамической модели погоды WRF-ARW

1. Предварительная обработка (WPS)
2. Инициализация
3. Модель WRF-ARW
4. Подготовка вывода расчетных данных модельной продукции [30].

4.2. Прогноз грозовой активности при использовании численных экспериментов моделирования факта наличия и отсутствия гроз мезомасштабной гидродинамической модели WRF-ARW

Для осуществления прогноза гроз посредством использования численных экспериментов моделирования факта наличия и отсутствия явления была собрана база данных, включающая в себя:

- 83 случая, из которых: 43 – это факт прохождения грозы и 40 – факт наличия кучево-дождевой облачности без регистрирования грозовой деятельности;

С сайта flymeteo.ru была собрана информация по фактическому аэрологическому зондированию, а именно:

- 1) Информация о высоте верхней границы облачности;
- 2) Информация о высоте расположения нулевой изотермы;
- 3) Температуре верхней границы облачности;
- 4) Информация о предоставленных расчетных индексах неустойчивости на основе фактических данных аэрологического наблюдения: индексы неустойчивости атмосферы Vertical Totals, Cross Totals, Total Totals, CAPE.

4.2.1. Создание версии мезомасштабной гидродинамической модели WRF-ARW для Северо-Запада Европейской части России

Для проведения численных экспериментов для моделирования случаев факта наличия и отсутствия грозовой деятельности из созданного архива данных, была создана версия мезомасштабной гидродинамической модели WRF-ARW.

В качестве исследуемой территории был выбран Северо-Запад Европейской части России (подробнее в главе 1). Исследуемая область представлена на рисунке 4.2.

Как видно из рисунка, получившаяся модель охватывает следующих координатный диапазон: с юга на север с 57 до 68 градусов с.ш., с запада на восток с 22 до 68 градусов в.д.

В целом полученная версия мезомасштабной модели имеет следующие характеристики:

1. Количество узлов сетки по пространству:
 - 1) По широте: 200 точек;
 - 2) По долготе: 300 точек;
 - 3) По вертикале: 35 уровней;
2. Шаг по пространству: 6000 м;
3. Шаг по времени: 30 секунд;
4. Заблаговременность прогноза: от 24 до 72 часов в зависимости от конкретного случая.
5. Начальные данные поступают из расчетных прогностических данных глобальной модели погоды GFS. Каждые 6 часов.

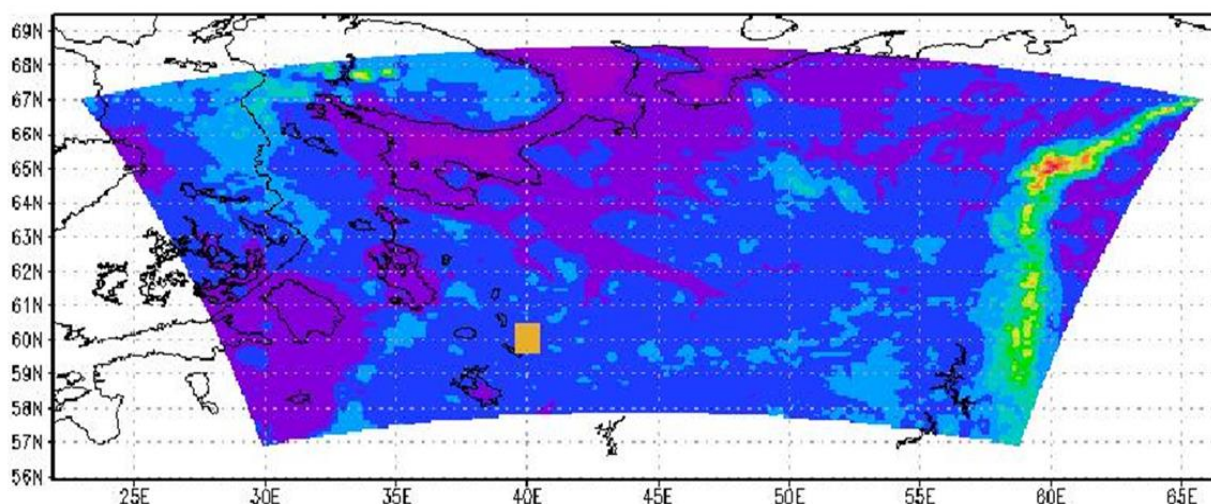


Рисунок 4.2 – Исследуемая территория для созданной версии модели WRF-ARW (поле орографии)

4.2.2. Моделирование полей метеорологических величин с использованием мезомасштабной гидродинамической модели WRF-ARW

В результате проведения численных экспериментов моделью было рассчитано 83 случая факта наличия и отсутствия грозовой активности.

Моделью были рассчитаны следующие параметры, для удобства представленные в таблице.

Таблица 4.1 – Выходные параметры модели.

Обозначение параметра	Количество уровней	Параметр
geopt	19	Geopotential (m ² /s ²)
height	19	Model height (km)
tc	19	Temperature (C)
theta	19	Potential Temperature (K)
td	19	Dewpoint Temperature (C)
td2	1	Dewpoint Temperature at 2m(C)
rh	19	Relative Humidity (%)
clflo	1	Low Cloud Fraction (%)
clfmi	1	Mid Cloud Fraction (%)
clfhi	1	High Cloud Fraction (%)
rh2	1	Relative Humidity at 2m (%)
wspd	19	Wind Speed (m s ⁻¹)
wdir	19	Wind Direction (Degrees)
u10m	19	Rotated wind component (m s ⁻¹)
v10m	1	Rotated wind component (m s ⁻¹)
slp	1	Sea Level Pressure (hPa)
cape	19	CAPE (J/kg)
mcape	1	MCAPE (J/kg)
lcl	1	LCL (meters AGL)
lfc	1	LFC (meters AGL)

Вся собранная и рассчитанная информация представлена в таблицах Приложения А.

Для визуализации полученных результатов была использована программа OpenGrADS.

Для осуществления анализа рассчитанных моделью данных и прогноза были написаны скрипты, позволяющие визуализировать следующие метеопараметры:

- 1) Поле приземного давления и ветра;
- 2) Поле температуры;

- 3) Относительную влажность воздуха;
- 4) Распределение 3 ярусов облачности (нижний, средний, верхний) в пространстве в заданные моменты времени;
- 5) Индекс неустойчивости CAPE;

Также для определения высоты верхней границы облачности, высоты нулевой изотермы были построены аэрологические диаграммы для всех случаев факта наличия и отсутствия явления.

4.2.3. Расчет индексов неустойчивости атмосферы для полученных численных экспериментов моделирования

В результате работы были рассчитаны следующие индексы неустойчивости, по которым был сделан прогноз о возможности возникновения гроз.

1. Vertical Totals индекс
2. Cross Totals индекс
3. Total Totals индекс

Расчет индексов осуществлялся по формулам (3.4), (3.5), (3.6), использование которых подробно описано в главе 3.

Результаты расчетов представлены в таблицах Б.1 и Б.2 Приложения Б и в таблицах В.1, В.2 Приложения В.

Полученные результаты прогноза предоставлены в следующих таблицах.

Таблица 4.2 – Прогноз грозы индексами неустойчивости при факте наличия грозы

Факт: Гроза	Vertical Totals	Cross Totals	Total Totals
Гроза	13	43	42
Грозы не ожидается	30	0	1

Таблица 4.3 – Прогноз грозы индексами неустойчивости при факте отсутствия грозы

Факт: Отсутствие грозы	Vertical Totals	Cross Totals	Total Totals
Гроза	3	37	31
Сб	37	3	9

Из 29 случаев факта грозы индексом неустойчивости VT было спрогнозировано 13 случаев, индексом СТ – 43, а индексом ТТ – 42.

В 40 случаях, когда наблюдались благоприятные условия для формирования грозы, но фактически грозы не наблюдалось, индексом VT было спрогнозировано 3 случая, индексом СТ – 37, а индексом ТТ – 31.

Затем для оценки качества полученных прогнозов гроз индексами неустойчивости при использовании численных данных модели ARW были построены матрицы сопряженности методического и случайного прогнозов для оценки успешности результатов.

1. Расчеты индекса неустойчивости Vertical Totals и оценка успешности прогноза, основанная на применении данного индекса.

Матрицы сопряженности методического и случайного прогноз представлены в таблице 4.4 и 4.5.

Таблица 4.4 – Матрица сопряженности методического прогноза для индекса неустойчивости Vertical Totals

Индекс	Прогноз явления			
		Ожидается	Не ожидается	Сумма
Vertical Totals	Гроза	$n_{11} = 13$	$n_{12} = 30$	43
	Отсутствие грозы	$n_{21} = 3$	$n_{22} = 37$	40
	Сумма	16	67	83

По полученной матрице видно, что число оправдавшихся прогнозов равно 50, а число неоправдавшихся – 33, из них 30 – это ошибка-пропуск, 3 – ошибка-страховка.

Таблица 4.5 – Матрица сопряженности случайного прогноза для индекса неустойчивости Vertical Totals

Индекс	Прогноз явления			
		Ожидается	Не ожидается	Сумма
Vertical Totals	Гроза	$n_{11} = 8$	$n_{12} = 35$	43
	Отсутствие грозы	$n_{21} = 8$	$n_{22} = 32$	40
	Сумма	16	67	83

Благодаря построенным матрицам сопряженности были рассчитаны критерии успешности прогноза индексом неустойчивости Vertical Totals по следующим формулам:

1. Общая оправдываемость прогноза

Для расчета общей оправдываемости P , оправдываемости прогноза факты наличия явления U и оправдываемости факта отсутствия явления $U_{оя}$ были использованы формулы 4.1, 4.2 и 4.3 соответственно.

$$P = \frac{n_{11} + n_{22}}{N} * 100\% \quad (4.1)$$

$$U = \frac{n_{11}}{n_{10}} * 100\% \quad (4.2)$$

$$U_{оя} = \frac{n_{22}}{n_{20}} * 100\% \quad (4.3)$$

2. Критерий точности прогноза по А.М. Обухову

Рассчитывался по формуле 4.4.

$$Q = 1 - \left(\frac{n_{12}}{n_{10}} + \frac{n_{21}}{n_{20}} \right) \quad (4.4)$$

3. Критерий надежности прогноза по Н.А. Багрову

Рассчитывался по формуле 4.5.

$$H = \frac{P - P_{сл}}{100\% - P_{сл}} \quad (4.5)$$

Для расчета данного критерия необходима общая оправдываемость случайного прогноза, расчет которой представлен в формуле 4.6.

$$P = \frac{95+44}{276} * 100\% = 51\% \quad (4.6)$$

Итоговые значения расчетов для индекса неустойчивости Vertical Totals представлены в таблице 4.6.

Таблица 4.6 – Результаты расчетов критериев успешности применительно к индексу неустойчивости Vertical Totals

Критерий	Значение критерия
Общая оправдываемость прогноза (P)	60%
Оправдываемость прогноза факта наличия явления (U)	30%
Предупрежденность факта наличия явления	81%
Оправдываемость прогноза факта отсутствия явления ($U_{о\bar{я}}$)	92%
Предупрежденность факта отсутствия явления	55%
Критерий надежности по Багрову (H)	0,2
Критерий точности по Обухову (Q)	0,2
Коэффициент связи Юла	0,7
Коэффициент сходства	0,3

Общая оправдываемость прогнозы при использовании данного индекса неустойчивости равна 60 %, что в целом является неплохим результатом.

Оправдываемость прогноза факта этим индексом значительно ниже, чем оправдываемость факта отсутствия явления.

Значения критериев надежности малы, что говорит о плохой успешности прогноза данным индексом.

1. Расчеты индекса неустойчивости Cross Totals и оценка успешности прогноза, основанного на применение данного индекса.

Данные результатов расчета индекса неустойчивости Cross Totals представлены в таблицах Б.1 и Б.2 Приложения Б, а также В.1, В.2 Приложения В.

Таблица 4.7 – Матрица сопряженности методического прогноза для индекса неустойчивости Cross Totals

Индекс	Прогноз явления			
Cross Totals		Ожидается	Не ожидается	Сумма
	Гроза	$n_{11} = 43$	$n_{12} = 0$	43
	Отсутствие грозы	$n_{21} = 37$	$n_{22} = 3$	40
	Сумма	80	3	83

По полученной матрице видно, что число оправдавшихся прогнозов равно 46, а число неоправдавшихся – 37, из них 0 – это ошибка-пропуск, 37 – ошибка-страховка.

Таблица 4.8 – Матрица сопряженности случайного прогноза для индекса неустойчивости Cross Totals

Индекс	Прогноз явления			
Cross Totals		Ожидается	Не ожидается	Сумма
	Гроза	$n_{11} = 41$	$n_{12} = 2$	43
	Отсутствие грозы	$n_{21} = 39$	$n_{22} = 1$	40
	Сумма	80	3	83

Благодаря построенным матрицам сопряженности были рассчитаны критерии успешности прогноза индексом неустойчивости Cross Totals (по формулам (4.1), (4.2), (4.3), (4.5), (4.6)).

Результаты расчетов представлены в таблице 4.9.

Таблица 4.9 – Результаты расчетов критериев успешности применительно к индексу неустойчивости Cross Totals

Критерий	Значение критерия
----------	-------------------

Общая оправдываемость прогноза (Р)	55%
Оправдываемость прогноза факта наличия явления (U)	100%
Предупрежденность факта наличия явления	54%
Оправдываемость прогноза факта отсутствия явления ($U_{оя}$)	8%
Предупрежденность факта отсутствия явления	100%
Критерий надежности по Багрову (Н)	0,1
Критерий точности по Обухову (Q)	0,1
Коэффициент связи Юла	1
Коэффициент схождения	0,2

Общая оправдываемость прогнозы при использовании данного индекса неустойчивости равна всего 55 %, что говорит о среднем результате.

Но оправдываемость прогноза факта этим индексом равно 100 % в сравнение с оправдываемостью факта отсутствия явления (8 %).

Значения критериев надежности очень малы, что говорит о плохой успешности прогноза данным индексом.

1. Расчеты индекса неустойчивости Total Totals и оценка успешности прогноза, основанного на применение данного индекса.

Данные результатов расчета индекса неустойчивости Total Totals представлены в таблицах Б.1 и Б.2 Приложения Б, а также В.1, В.2 Приложения В.

Данные для индекса неустойчивости Total Totals представлены в таблице 4.10 и 4.11.

Таблица 4.10 – Матрица сопряженности методического прогноза для индекса неустойчивости Total Totals

Индекс	Прогноз явления			
	Total Totals	Ожидается	Не ожидается	Сумма

	Гроза	$n_{11} = 42$	$n_{12} = 1$	43
	Отсутствие грозы	$n_{21} = 31$	$n_{22} = 9$	40
	Сумма	73	10	83

По полученной матрице видно, что число оправдавшихся прогнозов равно 51, а число неоправдавшихся – 32, из них 1 – это ошибка-пропуск, 31 – ошибка-страховка.

Таблица 4.11 – Матрица сопряженности случайного прогноза для индекса неустойчивости Total Totals

Индекс	Прогноз явления			
		Ожидается	Не ожидается	Сумма
Total Totals	Гроза	$n_{11} = 38$	$n_{12} = 5$	43
	Отсутствие грозы	$n_{21} = 35$	$n_{22} = 5$	40
	Сумма	73	10	83

Благодаря построенным матрицам сопряженности были рассчитаны критерии успешности прогноза индексом неустойчивости Total Totals (по формулам (4.1), (4.2), (4.3), (4.5), (4.6)).

Результаты расчетов представлены в таблице 4.12.

Таблица 4.12 – Результаты расчетов критериев успешности применительно к индексу неустойчивости Total Totals

Критерий	Значение критерия
Общая оправдываемость прогноза (Р)	61%
Оправдываемость прогноза факта наличия явления (U)	98%
Предупрежденность факта наличия явления	58%
Оправдываемость прогноза факта отсутствия явления ($U_{Oя}$)	23%
Предупрежденность факта отсутствия явления	90%
Критерий надежности по Багрову (Н)	0,2

Критерий точности по Обухову (Q)	0,2
Коэффициент связи Юла	0,8
Коэффициент сходства	0,3

Общая оправдываемость прогнозы при использовании данного индекса неустойчивости равна 61 %, что в целом является неплохим результатом.

Оправдываемость прогноза факта этим индексом значительно выше, чем оправдываемость факта отсутствия явления.

Значения критериев надежности малы, что говорит о плохой успешности прогноза данным индексом.

В целом можно сделать вывод, что выбранные для анализа индексы хорошо прогнозируют факт наличия грозы, но в случае факта отсутствия результаты значительно хуже.

4.2.5. Прогноз гроз методом Г.Д. Решетова по численным экспериментам моделирования

Для оценки качества получаемых результатов был использован метод прогноза грозовой активности Г.Д. Решетова. Подробное описание данного метода можно найти в главе 3.

Для прогноза данным методом были построены аэрологические диаграммы на основе результатов численных экспериментов. Пример построенной диаграммы приведен на рисунке 4.3.

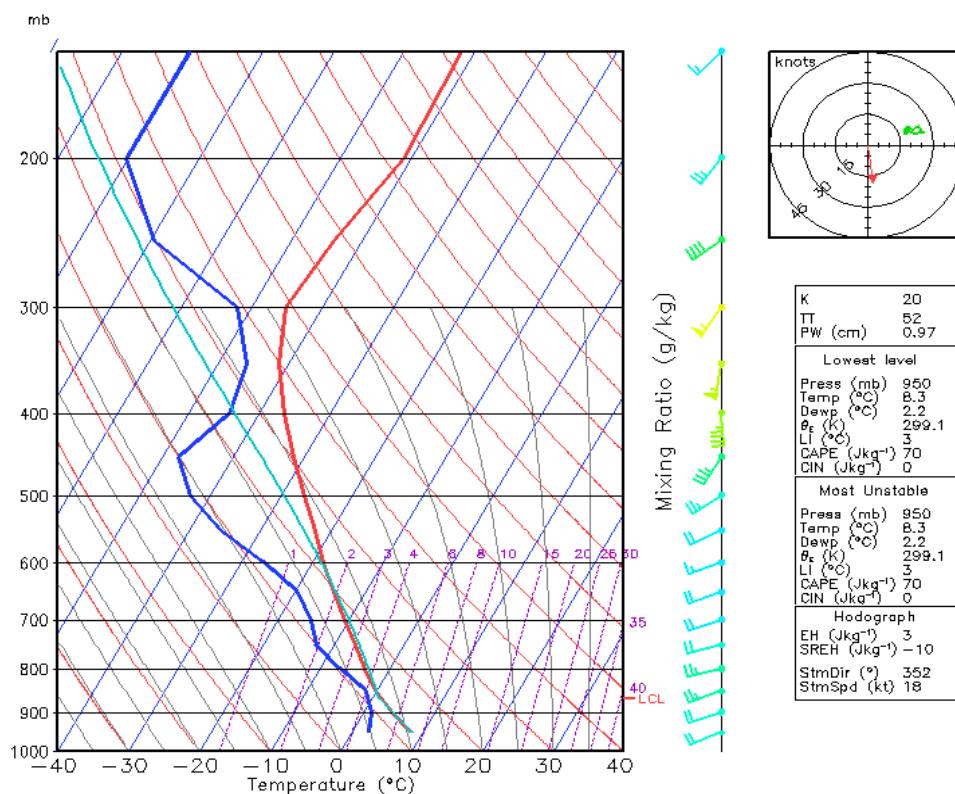


Рисунок 4.3 – Аэрологическая диаграмма модельных данных для города Сыктывкар за 12 часов 10.06.2015.

На аэрологической диаграмме находилась высота верхней границы облачности, значение температуры воздуха на этой высоте, а также высота нулевой изотермы.

Затем вычислялась мощность облака в зоне отрицательных температур по формуле (3.5).

Данные действия проводились для всего архива данных фактического наличия явления. Данные представлены в таблице Г.1 Приложения Г.

Для сравнения в качестве фактических данных были использованы результаты бакалаврской работы на тему прогноза гроз методом Г.Д. Решетова на территории Европейской части России [32].

Ниже приведены два примера полученных результатов: для города Сыктывкар 03.07.16 и 04.07.16 за срок 12 часов.

4.2.6. Визуализация численных экспериментов моделирования для города Сыктывкар за 03.07.16 и 04.07.16.

Для примера визуализации модельных данных было выбрано два случая грозовой активности, наблюдаемой в городе Сыктывкар 3 и 4 июля 2016 года. Каждый случай был зафиксирован метеорологом-техником в срок 12 часов.

- 1) Распределение атмосферного давления в конкретные моменты времени представлено на следующих рисунках:

По полученным результатам моделирования атмосферного давления и компонент ветра видно, что в начале первых суток над областью исследования, а именно над городом Сыктывкар, наблюдается область повышенного давления (1018 гПа), которая затем смещается в сторону СВ, к последнему сроку моделирования давление понижается до значения 1012 гПа.

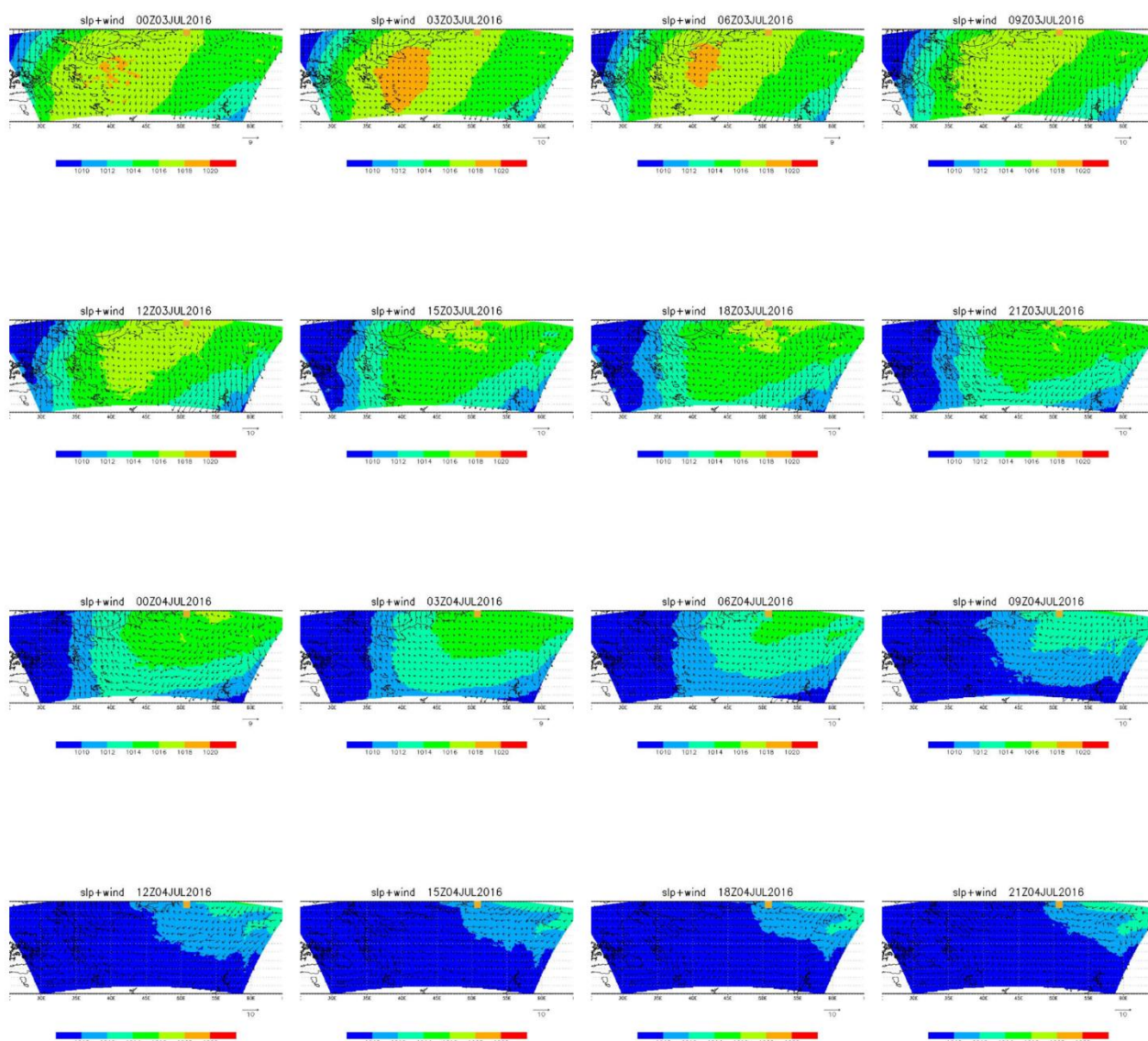


Рисунок 4.4 – Распределение атмосферного давления с 03.07.16 по 04.07.16 за каждые 3 часа.

В целом изменение давления незначительно, но наблюдается ярко выраженное смещение изменения значений с ЮЗ на СВ.

2) Распределение индекса неустойчивости CAPE в конкретные моменты времени представлено на следующих рисунках:

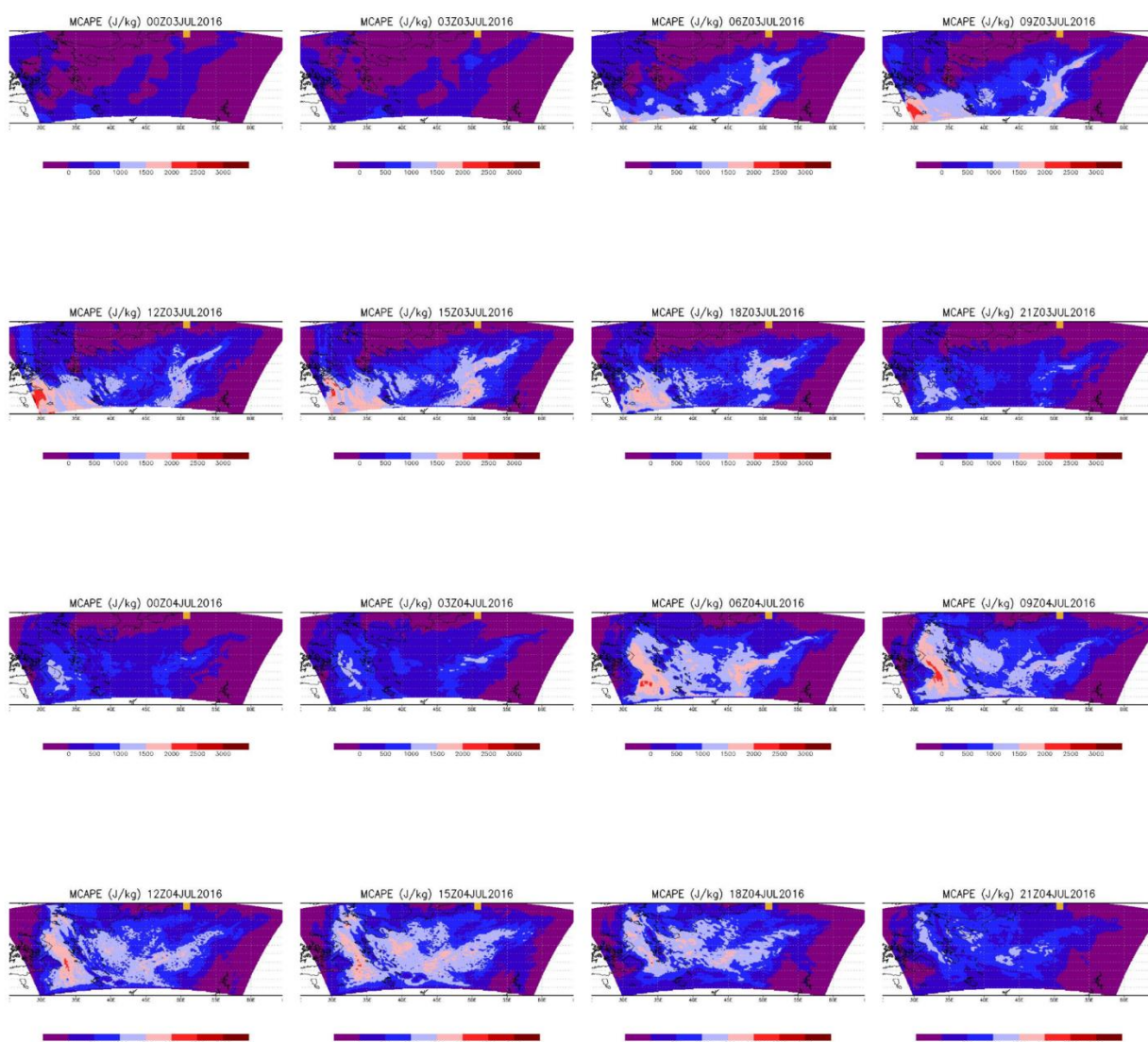


Рисунок 4.5 – Распределение индекса CAPE с 03.07.16 по 04.07.16 за каждые 3 часа.

По расположенным выше рисункам видно распределение энергии неустойчивости по исследуемой территории.

В сроки фактического наблюдения грозы заметно увеличение энергии неустойчивости над городом Сыктывкар, однако для того, чтобы сделать вывод о прохождении грозы, значения энергии слишком малы.

3) Распределение нижнего яруса облачности в конкретные моменты времени представлено на следующих рисунках:

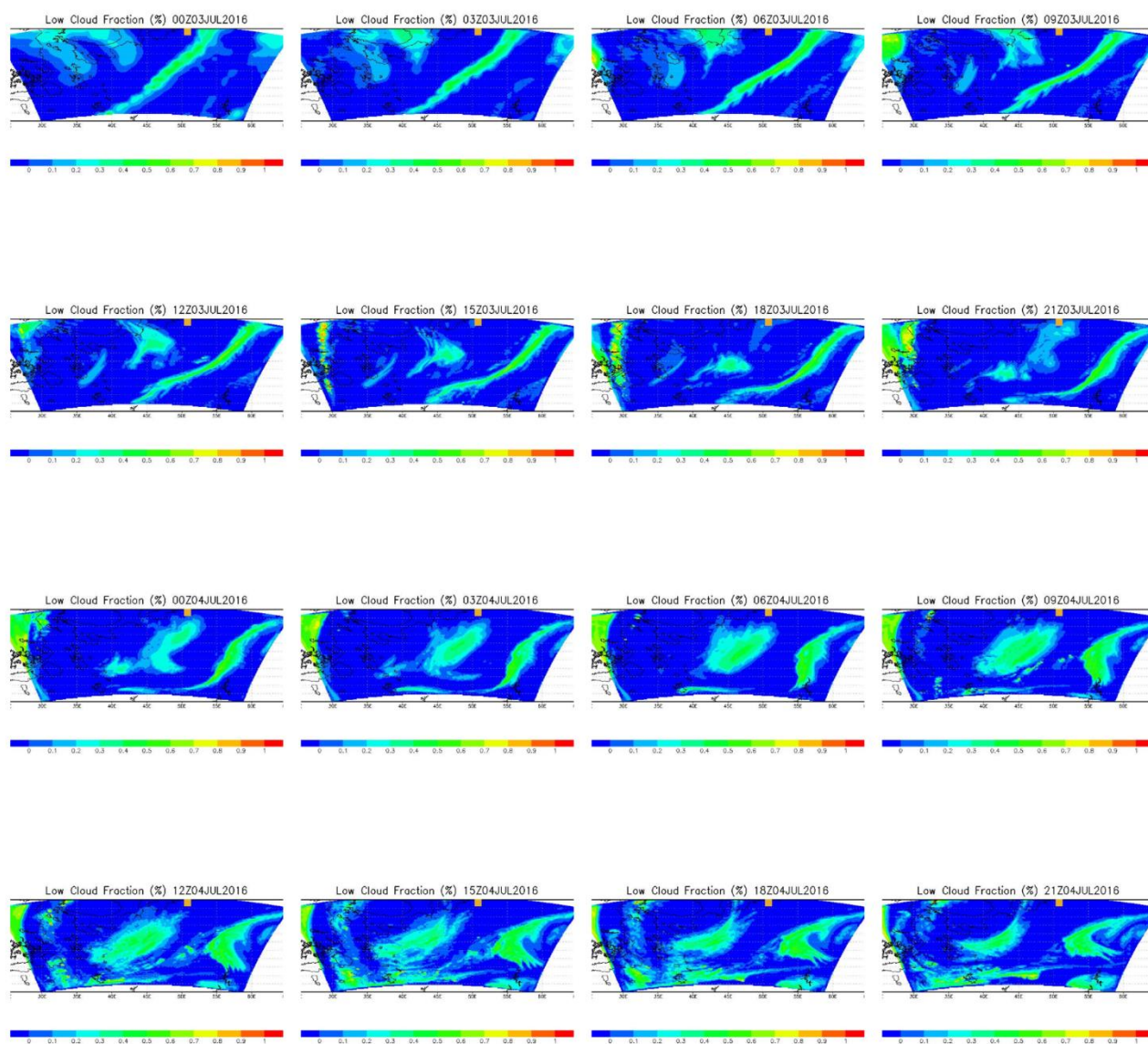


Рисунок 4.6 – Распределение нижнего яруса облачности с 03.07.16 по 03.04.16 за каждые 3 часа.

По данным рисункам можно наблюдать распределение нижнего яруса облачности в процентах.

4) Распределение верхнего яруса облачности в конкретные моменты времени представлено на следующих рисунках:

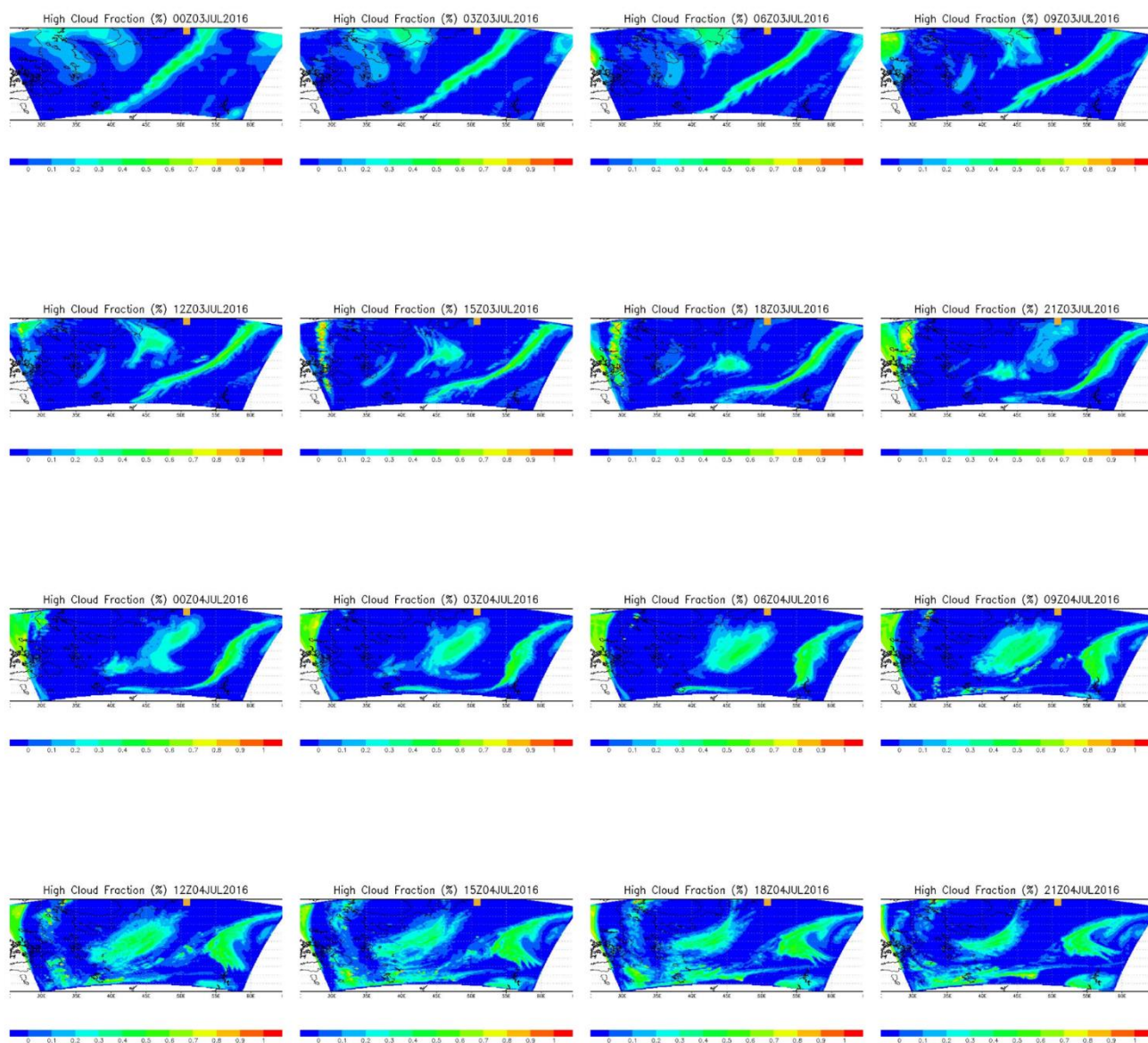


Рисунок 4.7 – Распределение верхнего яруса облачности с 03.07.16 по 04.07.16 за каждые 3 часа.

По данным рисунков можно наблюдать распределение верхнего яруса облачности в процентах.

На рисунках 4.8 и 4.9 представлены аэрологические диаграммы построенные на основе фактических данных радиозондирования атмосферы за 03.07.2016 и 04.07.2016 соответственно.

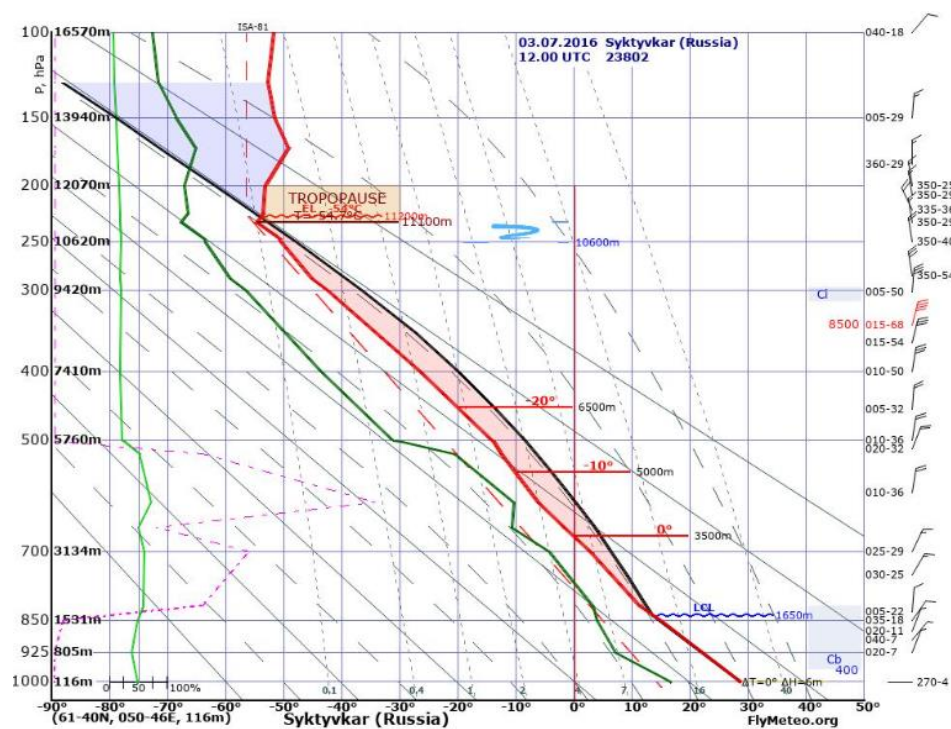


Рисунок 4.8 – аэрологическая диаграмма (данные радиозондирования атмосферы) для города Сыктывкар за 03.07.16 12 часов.

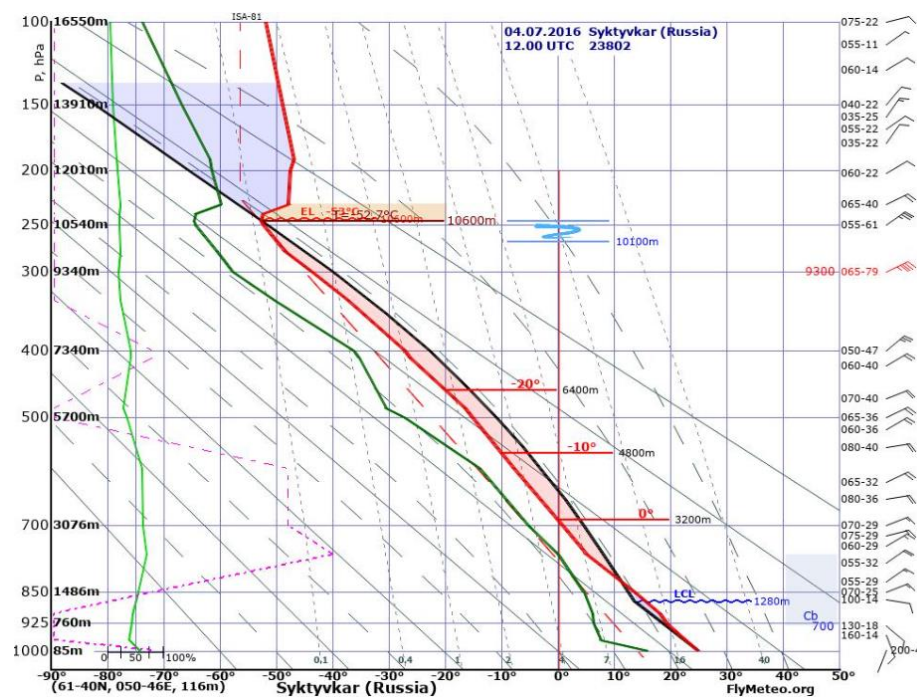


Рисунок 4.9 – аэрологическая диаграмма (данные радиозондирования атмосферы) для города Сыктывкар за 04.07.16 12 часов.

Также на рисунках 4.10 и 4.11 представлены аэрологические диаграммы построенные на основе выходных модельных данных за 03.07.2016 и 04.07.2016 соответственно.

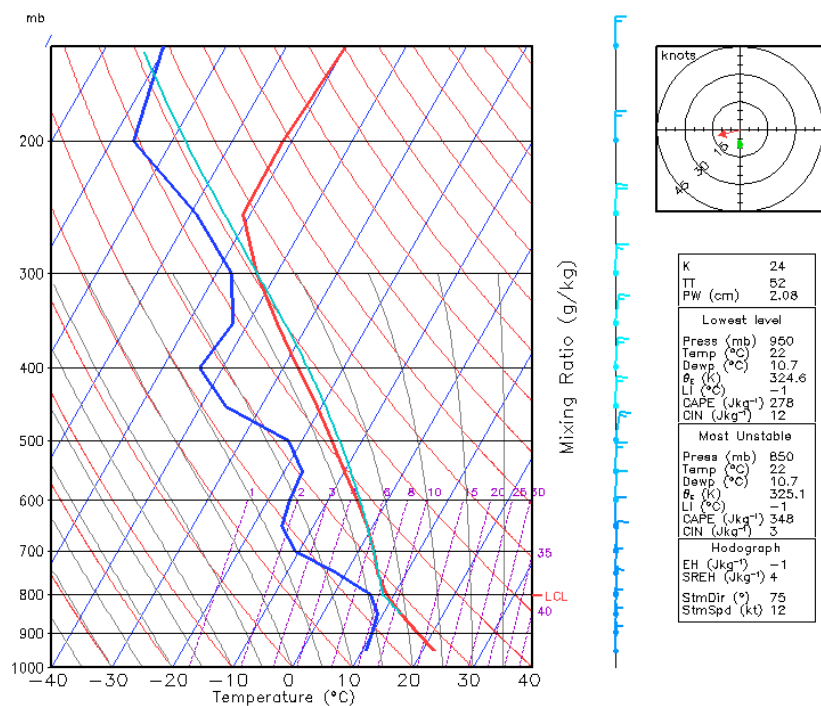


Рисунок 4.10 – аэрологическая диаграмма (выходные модельные данные) для города Сыктывкар за 03.07.16 12 часов.

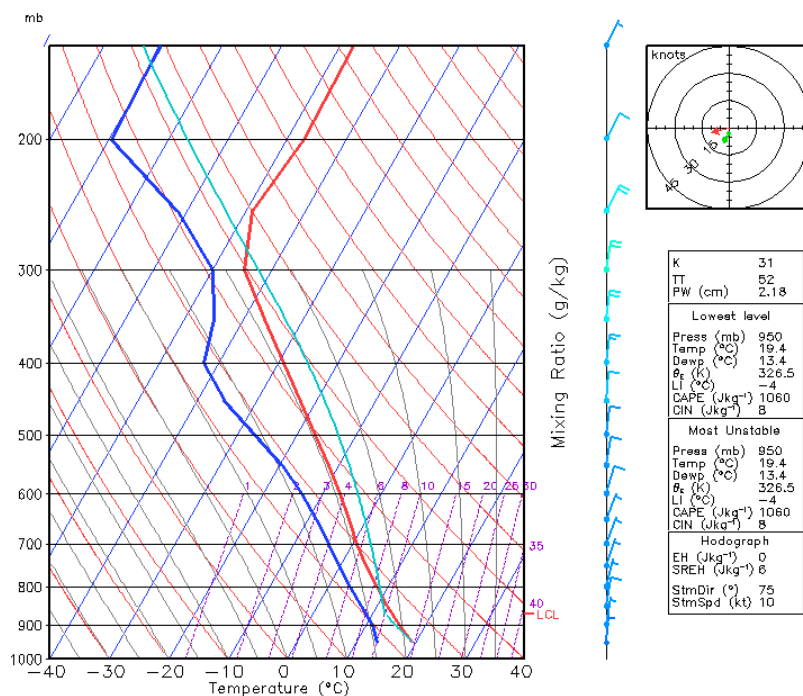


Рисунок 4.11 – аэрологическая диаграмма (выходные модельные данные) для города Сыктывкар за 04.07.16 12 часов.

Сравнивая аэрологические диаграммы, построенные для одних и тех же дат и сроков, но на основе разных данных, можно заметить следующие различия:

- 1) Высота верхней границы облачности в случае модельных данных наблюдается выше, нежели фактических.

Фактически высота верхней границы облаков 3 июля наблюдалась на высоте 11100 м, по модельным данным на высоте приблизительно 13 км. 4 июля облака развивались до высоты 10600 м, по модельным данным – 13400 м. Можно заметить, что модель завышает значения высоты верхней границы облачности.

- 2) Также следует обратить внимание на температуру верхней границы облачности. По результатам моделирования температуры на верхней границе облаков были равны -43 и -46 градуса Цельсия 3 и 4 июля соответственно. В то время, как фактически эти значения были равны -54 и -53 градуса Цельсия. В случае температуры верхней границы облачности можно заметить занижение значений моделью.

3) Высота нулевой изотермы в случае модельных данных 3 и 4 июля: 3700 и 3500 м соответственно. Фактически нулевая изотерма располагалась на высоте 3500 м – 3 июля и 3200 м – 4 июля. В данном случае также наблюдается завышение моделью значений высоты расположения нулевой изотермы.

4) Мощность облака в зоне отрицательных температур

В силу завышения модельных значений высоты верхней границы облачности, в данном случае также наблюдаются большие значения по сравнению с фактическими данными. 3 июля фактически мощность облака в зоне отрицательных температур была равна 7600 м, по модельным – 9400 м. 4 июля фактически мощность облака в зоне отрицательных температур была равна 7400 м, по модельным – 9900 м.

В целом при использовании метода Решетова, как в случае фактических данных, так и в случае модельных, дается прогноз на грозу.

На основе 34 подобранных случаев, представленных в таблице Г.1 Приложения Г, был составлен прогноз методом Г.Д. Решетова, во всех 34 случаях гроз дается прогноз на грозу.

Также для сравнения были использованы расчетные значения индексов неустойчивости на основе выходных модельных данных и значения индексов неустойчивости на основе фактических данных, взятые с сайта flymeteo.ru.

Все значения представлены ниже.

VT	Прогноз по VT	СТ	Прогноз по СТ	ТТ	Прогноз по ТТ
Модельные данные					
29	гроза	24	гроза	53	гроза
29	гроза	24	гроза	53	гроза
Фактические данные					
29,1	гроза	18,1	гроза	47,2	гроза
28,7	гроза	19,7	гроза	48,4	гроза

Как и в случае прогноза по методу Г.Д. Решетова, по всем 3 индексам неустойчивости во всех случаях дается прогноз на грозу. Однако следует отметить завышение показаний по индексу СТ и как следствие по индексу ТТ.

При расчете индекса СТ используются значения температуры на уровне 500 гПа и температуры точки росы на уровне 850 гПа.

Как ранее говорилось, модель занижает значения температуры воздуха, поэтому данные различия можно объяснить тем же.

Заключение

В результате проделанной работы было изучено: климатические особенности Северо-Запада Европейской части России условия, распределение грозовой активности на территории Северо-Запада ЕЧР, условия формирования конвективной и грозовой облачности, различные методы применяемые для прогноза гроз.

Был создан архив данных включающий в себя факт наличия грозовой активности и факт наличия кучево-дождевой облачности.

Была создана версия мезомасштабной гидродинамической негидростатической модели WRF-ARW и произведен расчет численных экспериментов для последующей обработки и визуализации.

Проведен анализ качества численных экспериментов для использования в качестве данных для прогноза грозовой активности.

Также проведено сравнение полученных результатов численного моделирования с фактическими данными аэрологических наблюдений.

Проводя анализ проделанной работы, можно сделать следующие выводы:

- Общая оправдываемость прогнозов по индексам неустойчивости сделанных на основе модельных данных колеблется от 55 до 61 % (индекс неустойчивости Vertical Totals – 60%, индекс неустойчивости Cross Totals – 55%, индекс неустойчивости Total Totals – 61%).
- Оправдываемость прогноза гроз на основе модельных данных наиболее успешна при использовании индексов неустойчивости СТ и ТТ: 100 % и 98% соответственно (при VT – 30 %).

- Оправдываемость прогноза кучево-дождевой облачности на основе модельных данных наиболее успешна при использовании индекса неустойчивости VT: 92% (при СТ – 8 %, ТТ – 23%).
- В целом наиболее успешными являются прогнозы гроз индексами неустойчивости Cross Totals и Total Totals.
- Однако на основе критериев успешности можно сделать вывод, что прогнозы, составленные при помощи индексов неустойчивости при использовании выходных модельных данных неуспешны.
- При сравнении выходных модельных и фактических данных (при использовании метода Г.Д. Решетова) можно сделать вывод, что модель завышает и занижает некоторые рассчитанные метеопараметры (завышает значения высоты верхней границы облачности и занижает значения температуры).

На основе поставленных задач и цели были сформулированы следующие выводы:

- Был создан архив данных о грозах на Северо-Западе ЕЧР;
- Были подобраны 29 случаев фактического наблюдения грозовой деятельности и 40 случая кучевого-дождевой облачности;
- Создана версия мезомасштабной гидродинамической модели WRF-ARW;
- Проанализированы результаты моделирования;
- А также проведен сравнительный анализ при использовании метода Г.Д. Решетова и индексов неустойчивости СТ, VT и ТТ.

Следует понимать, что в настоящее время мезомасштабные гидродинамические модели неспособны давать точный прогноз местоположения относительно небольших конвективных (и др.) явлений, т.к. данные процессы являются подсеточными. О возможном появлении такого

объекта на прогностической карте, можно судить лишь по экстремальным прогностическим значениям, интерпретация которых может давать разный прогностический результат.

Однако использование всевозможных моделей для прогноза увеличивает общую картину и позволяет более точно понять природу процессов, происходящих в атмосфере.

Список использованных источников

1. Электронный ресурс: <https://www.google.com/maps>
2. Электронный ресурс: <http://bigcountry.ru>
3. Электронный ресурс: <https://studbooks.net>
4. Андреев А.О., Дукальская М.В., Головина Е.Г. Облака: происхождение, классификация, распознавание/ Под ред. д-ра геогр. наук А.И. Угрюмова. Учебное пособие. СПб., изд. РГГМУ, 2007.- 228 с.
5. Рыбакова Ж.В., Облака и их трансформация / науч. ред. И.В. Кужевская. – Томск: Издательский Дом Томского государственного университета, 2020. – 234 с.
6. Кашлева Л.В. Атмосферное электричество. Учебное пособие. - СПб.: изд. РГГМУ, 2008. - 116 с.
7. Электронный ресурс: <https://studbooks.net/>
8. Ермаков Е.И., Стожков Ю.И. Физика грозových облаков /краткие сообщения по физике. – М.: ФИАН, 2004. – 438 с.
9. Милликен Р., Электроны (+ и -), протоны, фотоны, нейтроны и космические лучи, пер. с англ., М-Л: ГОНТИ, 1939, 311 с.
10. Русанов А.И. К термодинамике нуклеации на заряженных центрах. // ДАН СССР, 1978, т. 238, № 4, 831-834.
11. Богаткин О. Г. Основы авиационной метеорологии. - СПб.: РГГМУ. 2009.
12. file:///C:/Users/%D0%90%D0%BD%D0%B0%D1%81%D1%82%D0%B0%D1%81%D0%B8%D1%8F/Downloads/3_66_Grozyi_tekst.pdf

13. Мазин И.П., Шмистер С.М. Облака, строение и физика образования. Л.: Гидрометеиздат, 1983. 279 с.
14. Электронный ресурс: <https://commons.wikimedia.org/>, автор: Pierre cb
15. Богаткин О.Г., Еникеева В.Д. Анализ и прогноз погоды для авиации. – Л.: Гидрометеиздат, 1985. – 230 с.
16. Практикум по синоптической метеорологии. Руководство к лабораторным работам по синоптической метеорологии и атлас учебных синоптических материалов. Под ред. проф. В.И. Воробьева. Издание 2-е, перераб. и доп. – СПб.: изд. РГГМУ, 2005 – 304 с.
17. Электронный ресурс: <http://autotaf.me/>
18. Электронный ресурс <https://flymeteo.org/>
19. Дробжева Я.В., Волобуева О.В. Метеорологические прогнозы и их экономическая полезность.: учебное пособие /Дробжева, Волобуева. – СПб.: Адмирал, 2016. – 116 с.
20. Электронный ресурс: <https://meteoinfo.ru/>
- 21.. Аджиева, В. А. Шаповалов, Математическое моделирование в проблеме обнаружения опасных явлений погоды, Итоги науки и техн. Сер. Соврем. мат. и ее прил. Темат. обз., 2018, том 154, 10–21
22. Л.И. Кижнер, Н.К. Барашкова, А.С. Ахметшина, А.А. Барт, Д.В. Поляков, ОЦЕНКА ТОЧНОСТИ ЧИСЛЕННЫХ ПРОГНОЗОВ МЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИХ УСЛОВИЙ В РАЙОНЕ г. ТОМСКА С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МОДЕЛИ WRF, Вестник Томского государственного университета. 2013. № 374. С. 174–178
23. А.Н. Шихов, А.В. Быков, Оценка качества прогноза мезомасштабных конвективных систем на Западном Урале с

помощью модели WRF и спутниковых данных MODIS, Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2016. Т. 13. № 1. С. 137–148

- 24.Алексеева А.А., Лосев В.М., Песков Б.Е., Васильев Е.В., Никифорова А.Е. Прогноз развития зон активной конвекции с особо опасными явлениями на основе региональной модели Гидрометцентра России. М., Триада ЛТД, 2010, с. 147-159.
- 25.Вельтищев Н.Ф. Теория мезомасштабных конвективных систем в атмосфере, наблюдаемых с искусственных спутников Земли. Дисс. на соиск. уч. степ. д-ра физ.-мат. наук. М.: Гидрометцентр СССР, 1979.
- 26.Временные методические указания по использованию грозопенгационных данных в синоптической практике Росгидромета. Спб, 2015 г.
- 27.Инструкция для оперативно-прогностических и авиаметподразделений Росгидромета по использованию информации ДМРЛ в синоптической практике. М, 2016
- 28.Матвеев Л.Т. Курс общей метеорологии. Физика атмосферы. - Ленинград, Гидрометеиздат, 1984
- 29.Б. А. Ашабоков, А. В.Шаповалов, Д. Д. Кулиев, К. А. Продан, В. А.Шаповалов, ИСЛЕННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИХ, МИКРОСТРУКТУРНЫХ И ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ХАРАКТЕРИСТИК КОНВЕКТИВНЫХ ОБЛАКОВ НА СТАДИИ РОСТА И МАКСИМАЛЬНОГО РАЗВИТИЯ, Известия вузов. Радиофизика, Том LVI, № 11–12, с. 900-907.

- 30.Н.Ф. Вельтищев, В.Д. Жупанов, Численные прогнозы погоды по негидростатическим моделям общего пользования WRF-ARW и WRF-NMM, Гидрометцентр России, с. 94-135.
- 31.В.И. Лукьянов, Е.В. Васильев, Т.Г. Дмитриева, В.Д. Жупанов, Б.Е. Песков, А.А. Васильев. Разработка прогнозов текущей погоды и сверхкраткосрочных прогнозов с использованием современных систем наблюдения за атмосферой и продукции численных моделей. Методическое пособие. 2018 г., 96 с.
- 32.Skamarock W.C. et al. A description of the Advanced Research WRF Version 3. // NCAR Techn. Note –475 + STR, June 2008, 125 pp
- 33.Klemp J.B., Skamarock W.C., Dudhia J. Conservative split-explicit time integration methods for the compressible nonhydrostatic equations. Draft manuscript. WRF Eulerian prototype model equations height and mass vertical coordinates // NCAR, Boulder, Colorado, 24 October 2000, 14 pp

Приложение А

Таблица А.1 – Факт наличия гроз в СЗ ЕЧР				
Дата	Пункт	T850	Td850	T500
10.06.2015	Сыктывкар	0	-1	-26
13.06.2015	Кандалакша	2	-1	-29
21.06.2015	Вологда	15	12	-13
23.06.2015	Вологда	12	10	-14
24.07.2015	Каргополь	9	6	-18
31.07.2015	Вологда	5	4	-22
02.08.2015	Печора	6	2	-17
09.06.2016	Печора	4	1	-26
03.07.2016	Сыктывкар	14	9	-15
04.07.2016	Сыктывкар	12	7	-17
05.07.2016	Кандалакша	12	10	-14
22.06.2017	Сыктывкар	4	3	-24
25.07.2017	Печора	14	7	-16
26.07.2017	Сыктывкар	13	7	-15
26.07.2017	Печора	13	10	-16
27.07.2017	Печора	12	9	-16
18.08.2017	Печора	6	4	-20
22.08.2017	Печора	14	6	-15
24.08.2017	Вологда	8	8	-18
13.08.2018	Печора	12	13	-15
01.06.2019	Сыктывкар	6	4	-20
08.06.2019	Каргополь	15	10	-15
08.06.2019	Вологда	15	10	-14
08.06.2019	Кандалакша	14	10	-14
08.06.2019	Мурманск	15	8	-14
09.06.2019	Каргополь	15	8	-15
09.06.2019	Сыктывкар	14	10	-15
18.06.2019	Каргополь	10	8	-18
22.06.2019	Вологда	14	12	-11
22.06.2019	Каргополь	14	11	-13
15.07.2019	Архангельск	5	2	-25
20.07.2019	Вологда	7	7	-19
21.07.2019	Сыктывкар	11	8	-16
22.08.2019	Мурманск	5	3	-23
06.06.2020	Архангельск	7	6	-20
06.06.2020	Сыктывкар	10	8	-14
09.06.2020	Архангельск	13	12	-14
09.06.2020	Петрозаводск	14	12	-13
02.07.2020	Архангельск	7	6	-20
21.07.2020	Вологда	11	10	-14
23.07.2020	Вологда	7	7	-20
24.08.2020	Архангельск	8	3	-19
25.08.2020	Сыктывкар	8	7	-20

Таблица А.2 – Кучево-дождевая облачность в СЗ ЕЧР

Дата	Пункт	T850	Td850	T500
10.06.2015	Нарьян-Мар	0	-1	-25
	Мурманск	-1	-4	-27
	Вологда	1	-1	-23
	Кандалакша	0	-1	-26
13.06.2015	Архангельск	3	1	-24
	Мурманск	0	-3	-30
	Вологда	8	4	-17
21.06.2015	Архангельск	6	4	-14
23.06.2015	Каргополь	11	10	-15
	Печора	8	6	-14
	Петрозаводск	10	6	-17
24.07.2015	Мурманск	5	4	-20
	Вологда	9	9	-17
	Кандалакша	5	5	20
31.07.2015	Нарьян-Мар	7	6	-17
	Архангельск	7	4	-18
	Кандалакша	6	6	-17
02.08.2015	Нарьян-Мар	7	3	-20
	Сыктывкар	6	4	-20
03.07.2016	Мурманск	13	8	-12
04.07.2016	Каргополь	14	10	-14
	Кандалакша	5	4	-13
22.08.2017	Петрозаводск	14	8	-16
	Мурманск	4	4	-22
24.08.2017	Мурманск	4	3	-16
	Кандалакша	5	5	-16
08.06.2019	Печора	5	0	-16
09.06.2019	Печора	12	7	-14
	Мурманск	8	8	-14
	Кандалакша	11	10	-14
18.06.2019	Сыктывкар	6	2	-19
15.07.2019	Петрозаводск	3	-2	-25
	Вологда	6	5	-22
	Кандалакша	1	1	-25
20.07.2019	Каргополь	7	6	-18
21.07.2019	Мурманск	9	3	-17
	Кандалакша	8	1	-17
22.08.2019	Каргополь	6	4	-16
	Печора	6	5	-17
	Кандалакша	5	2	-24
10.06.2015	Нарьян-Мар	0	-1	-25
	Мурманск	-1	-4	-27
	Вологда	1	-1	-23

Приложение Б

Таблица Б.2 – Прогноз индексами неустойчивости на основе модельных данных (Грозы)							
Дата	Пункт	VT	Прогноз по VT	CT	Прогноз по CT	TT	Прогноз по TT
10.06.2015	Сыктывкар	26	грозы не ожидается	25	гроза	51	гроза
13.06.2015	Кандалакша	31	гроза	28	гроза	59	гроза
21.06.2015	Вологда	28	грозы не ожидается	25	гроза	53	гроза
23.06.2015	Вологда	26	грозы не ожидается	24	гроза	50	гроза
24.07.2015	Каргополь	27	грозы не ожидается	24	гроза	51	гроза
31.07.2015	Вологда	27	грозы не ожидается	26	гроза	53	гроза
02.08.2015	Печора	23	грозы не ожидается	19	гроза	42	грозы не ожидается
09.06.2016	Печора	30	гроза	27	гроза	57	гроза
03.07.2016	Сыктывкар	29	гроза	24	гроза	53	гроза
04.07.2016	Сыктывкар	29	гроза	24	гроза	53	гроза
05.07.2016	Кандалакша	26	грозы не ожидается	24	гроза	50	гроза
22.06.2017	Сыктывкар	28	грозы не ожидается	27	гроза	55	гроза
25.07.2017	Печора	30	гроза	23	гроза	53	гроза
26.07.2017	Сыктывкар	28	грозы не ожидается	22	гроза	50	гроза
26.07.2017	Печора	29	гроза	26	гроза	55	гроза
27.07.2017	Печора	28	грозы не ожидается	25	гроза	53	гроза
18.08.2017	Печора	26	грозы не ожидается	24	гроза	50	гроза
22.08.2017	Печора	29	гроза	21	гроза	50	гроза
24.08.2017	Вологда	26	грозы не ожидается	26	гроза	52	гроза
13.08.2018	Печора	27	грозы не ожидается	28	гроза	55	гроза
01.06.2019	Сыктывкар	26	грозы не ожидается	24	гроза	50	гроза
08.06.2019	Каргополь	30	гроза	25	гроза	55	гроза
08.06.2019	Вологда	29	гроза	24	гроза	53	гроза
08.06.2019	Кандалакша	28	грозы не ожидается	24	гроза	52	гроза
08.06.2019	Мурманск	29	гроза	22	гроза	51	гроза
09.06.2019	Каргополь	30	гроза	23	гроза	53	гроза
09.06.2019	Сыктывкар	29	гроза	25	гроза	54	гроза
18.06.2019	Каргополь	28	грозы не ожидается	26	гроза	54	гроза

22.06.2019	Вологда	25	грозы не ожидается	23	гроза	48	гроза
22.06.2019	Каргополь	27	грозы не ожидается	24	гроза	51	гроза
15.07.2019	Архангельск	30	гроза	27	гроза	57	гроза
20.07.2019	Вологда	26	грозы не ожидается	26	гроза	52	гроза
21.07.2019	Сыктывкар	27	грозы не ожидается	24	гроза	51	гроза
22.08.2019	Мурманск	28	грозы не ожидается	26	гроза	54	гроза
06.06.2020	Архангельск	27	грозы не ожидается	26	гроза	53	гроза
06.06.2020	Сыктывкар	24	грозы не ожидается	22	гроза	46	гроза
09.06.2020	Архангельск	27	грозы не ожидается	26	гроза	53	гроза
09.06.2020	Петрозаводск	27	грозы не ожидается	25	гроза	52	гроза
02.07.2020	Архангельск	27	грозы не ожидается	26	гроза	53	гроза
21.07.2020	Вологда	25	грозы не ожидается	24	гроза	49	гроза
23.07.2020	Вологда	27	грозы не ожидается	27	гроза	54	гроза
24.08.2020	Архангельск	27	грозы не ожидается	22	гроза	49	гроза
25.08.2020	Сыктывкар	28	грозы не ожидается	27	гроза	55	гроза

Таблица Б.2 – Прогноз индексами неустойчивости на основе фактических данных (Грозы)

Дата	Пункт	VT	Прогноз по VT	СТ	Прогноз по СТ	ТТ	Прогноз по ТТ
10.06.2015	Сыктывкар	26	грозы не ожидается	20	гроза	46	гроза
13.06.2015	Кандалакша	28,7	гроза	23,8	гроза	52,5	гроза
21.06.2015	Вологда	26,1	грозы не ожидается	22,9	гроза	49	гроза
23.06.2015	Вологда	26,1	грозы не ожидается	21,7	гроза	47,8	гроза
24.07.2015	Каргополь	25,9	грозы не ожидается	21,8	гроза	47,7	гроза
31.07.2015	Вологда	27,7	грозы не ожидается	25,3	гроза	53	гроза
02.08.2015	Печора	26,5	грозы не ожидается	24,4	гроза	50,9	гроза
09.06.2016	Печора	25,5	грозы не ожидается	21	гроза	46,5	гроза
03.07.2016	Сыктывкар	29,1	гроза	18,1	гроза	47,2	гроза
04.07.2016	Сыктывкар	28,7	гроза	19,7	гроза	48,4	гроза
05.07.2016	Кандалакша	27,7	грозы не ожидается	21,7	гроза	49,4	гроза
22.06.2017	Сыктывкар	27,9	грозы не ожидается	23,5	гроза	51,4	гроза
25.07.2017	Печора	28,7	гроза	22,7	гроза	51,4	гроза
26.07.2017	Сыктывкар	26,3	грозы не ожидается	19,3	гроза	45,6	гроза
26.07.2017	Печора	27,9	грозы не ожидается	19,9	гроза	47,8	гроза
27.07.2017	Печора	29,7	гроза	23,7	гроза	53,4	гроза
18.08.2017	Печора	28,1	гроза	22,1	гроза	50,2	гроза

22.08.2017	Печора	26,1	грозы не ожидается	21,2	гроза	47,3	гроза
24.08.2017	Вологда	25,7	грозы не ожидается	23,2	гроза	48,9	гроза
13.08.2018	Печора	27,1	грозы не ожидается	19,1	гроза	46,2	гроза
01.06.2019	Сыктывкар	25,1	грозы не ожидается	21,9	гроза	47	гроза
08.06.2019	Каргополь	30,9	гроза	22,9	гроза	53,8	гроза
08.06.2019	Вологда	29,1	гроза	17,1	грозы не ождается	46,2	гроза
08.06.2019	Кандалакша	28,9	гроза	19,9	гроза	48,8	гроза
08.06.2019	Мурманск	27,3	грозы не ожидается	20,3	гроза	47,6	гроза
09.06.2019	Каргополь	28,9	гроза	19,9	гроза	48,8	гроза
09.06.2019	Сыктывкар	29,3	гроза	21,3	гроза	50,6	гроза
18.06.2019	Каргополь	28,5	гроза	20,5	гроза	49	гроза
22.06.2019	Вологда	23,5	грозы не ожидается	21,5	гроза	45	гроза
22.06.2019	Каргополь	24,5	грозы не ожидается	23,6	гроза	48,1	гроза
15.07.2019	Архангельск	27,7	грозы не ожидается	23,5	гроза	51,2	гроза
20.07.2019	Вологда	25,5	грозы не ожидается	22,9	гроза	48,4	гроза
21.07.2019	Сыктывкар	27,9	грозы не ожидается	23,1	гроза	51	гроза
22.08.2019	Мурманск	28,7	гроза	24,6	гроза	53,3	гроза
06.06.2020	Архангельск	29,1	гроза	18,1	гроза	47,2	гроза
06.06.2020	Сыктывкар	23,9	грозы не ожидается	19,3	гроза	43,2	грозы не ождается
09.06.2020	Архангельск	26,7	грозы не ожидается	22,7	гроза	49,4	гроза
09.06.2020	Петрозаводс к	28,3	гроза	21,3	гроза	49,6	гроза
02.07.2020	Архангельск	24,7	грозы не ожидается	22,4	гроза	47,1	гроза
21.07.2020	Вологда	24,3	грозы не ожидается	22,6	гроза	46,9	гроза
23.07.2020	Вологда	25,1	грозы не ожидается	24,1	гроза	49,2	гроза
24.08.2020	Архангельск	25,7	грозы не ожидается	22,5	гроза	48,2	гроза
25.08.2020	Сыктывкар	23,1	грозы не ожидается	20,3	гроза	43,4	грозы не ождается

Приложение В

Таблица В.2 – Прогноз индексами неустойчивости на основе модельных данных (Кучево-дождевая облачность)							
Дата	Пункт	VT	Прогноз по VT	СТ	Прогноз по СТ	ТТ	Прогноз по ТТ
10.06.2015	Нарьян-Мар	18,2	грозы не ождается	16,4	грозы не ождается	34,6	грозы не ождается
	Мурманск	-					
	Вологда	20,7	грозы не ождается	13,7	грозы не ождается	34,4	грозы не ождается
	Кандалакша	26,1	грозы не ождается	22,7	гроза	48,8	гроза
13.06.2015	Архангельск	28,9	гроза	22,9	гроза	51,8	гроза
	Мурманск						
	Вологда	25,1	грозы не ождается	17,1	грозы не ождается	42,2	грозы не ождается
21.06.2015	Архангельск	19,5	грозы не ождается	15,9	грозы не ождается	35,4	грозы не ождается
23.06.2015	Каргополь	26,7	грозы не ождается	19,7	гроза	46,4	гроза
	Печора	19,1	грозы не ождается	17,2	грозы не ождается	36,3	грозы не ождается
	Петрозаводск	25,5	грозы не ождается	23,9	гроза	49,4	гроза
24.07.2015	Мурманск	-					
	Вологда	26,5	грозы не ождается	25	гроза	51,5	гроза
	Кандалакша	23,9	грозы не ождается	21,6	гроза	45,5	гроза
31.07.2015	Нарьян-Мар	23,5	грозы не ождается	19,1	гроза	42,6	грозы не ождается
	Архангельск	24,7	грозы не ождается	21,3	гроза	46	гроза
	Кандалакша	21,9	грозы не ождается	19,5	гроза	41,4	грозы не ождается
02.08.2015	Нарьян-Мар	28,1	гроза	22,1	гроза	50,2	гроза
	Сыктывкар	26,3	грозы не ождается	22,9	гроза	49,2	гроза
03.07.2016	Мурманск	-					
04.07.2016	Каргополь	27,9	грозы не ождается	17,9	грозы не ождается	45,8	гроза
	Кандалакша	25,7	грозы не ождается	17,7	грозы не ождается	43,4	грозы не ождается
22.08.2017	Петрозаводск	27,7	грозы не ождается	22,7	гроза	50,4	гроза
	Мурманск	-					
24.08.2017	Мурманск	-					
	Кандалакша	21,3	грозы не ождается	19,3	гроза	40,6	грозы не ождается
08.06.2019	Печора	20,9	грозы не	6,9	грозы не	27,8	грозы не

			ождается		ождается		ождается
09.06.2019	Печора	27,5	грозы не ождается	19,5	гроза	47	гроза
	Мурманск	19,5	грозы не ождается	17,5	грозы не ождается	37	грозы не ождается
	Кандалакша	24,9	грозы не ождается	20,9	гроза	45,8	гроза
18.06.2019	Сыктывкар	25,9	грозы не ождается	16,9	грозы не ождается	42,8	грозы не ождается
15.07.2019	Петрозаводск	26,9	грозы не ождается	19,9	гроза	46,8	гроза
	Вологда	27,3	грозы не ождается	20,3	гроза	47,6	гроза
	Кандалакша	24,3	грозы не ождается	22,2	гроза	46,5	гроза
20.07.2019	Каргополь	25,7	грозы не ождается	18,7	гроза	44,4	гроза
21.07.2019	Мурманск	26,1	грозы не ождается	18,1	гроза	44,2	гроза
	Кандалакша	26,7	грозы не ождается	17,7	грозы не ождается	44,4	гроза
22.08.2019	Каргополь	24,9	грозы не ождается	16,9	грозы не ождается	41,8	грозы не ождается
	Печора	-					
	Кандалакша	26,5	грозы не ождается	16,5	грозы не ождается	43	грозы не ождается

Таблица В.2 – Прогноз индексами неустойчивости на основе фактических данных
(Кучево-дождевая облачность)

Дата	Пункт	VT	Прогноз по VT	СТ	Прогноз по СТ	ТТ	Прогноз по ТТ
10.06.2015	Нарьян-Мар	25	грозы не ожидается	24	гроза	49	гроза
	Мурманск	26	грозы не ожидается	23	гроза	49	гроза
	Вологда	24	грозы не ожидается	22	гроза	46	гроза
	Кандалакша	26	грозы не ожидается	25	гроза	51	гроза
13.06.2015	Архангельск	27	грозы не ожидается	25	гроза	52	гроза
	Мурманск	30	гроза	27	гроза	57	гроза
	Вологда	25	грозы не ожидается	21	гроза	46	гроза
21.06.2015	Архангельск	20	грозы не ожидается	18	гроза	38	грозы не ождается
23.06.2015	Каргополь	26	грозы не ожидается	25	гроза	51	гроза
	Печора	22	грозы не ожидается	20	гроза	42	грозы не ождается
	Петрозаводск	27	грозы не ожидается	23	гроза	50	гроза
24.07.2015	Мурманск	25	грозы не ожидается	24	гроза	49	гроза
	Вологда	26	грозы не ожидается	26	гроза	52	гроза
	Кандалакша	-15	грозы не ожидается	-15	грозы не ождается	-30	грозы не ождается
31.07.2015	Нарьян-Мар	24	грозы не ожидается	23	гроза	47	гроза
	Архангельск	25	грозы не ожидается	22	гроза	47	гроза
	Кандалакша	23	грозы не ожидается	23	гроза	46	гроза

02.08.2015	Нарьян-Мар	27	грозы не ожидается	23	гроза	50	гроза
	Сыктывкар	26	грозы не ожидается	24	гроза	50	гроза
03.07.2016	Мурманск	25	грозы не ожидается	20	гроза	45	гроза
04.07.2016	Каргополь	28	грозы не ожидается	24	гроза	52	гроза
	Кандалакша	18	грозы не ожидается	17	грозы не ождается	35	грозы не ождается
22.08.2017	Петрозаводск	30	гроза	24	гроза	54	гроза
	Мурманск	26	грозы не ожидается	26	гроза	52	гроза
24.08.2017	Мурманск	20	грозы не ожидается	19	гроза	39	грозы не ождается
	Кандалакша	21	грозы не ожидается	21	гроза	42	грозы не ождается
08.06.2019	Печора	21	грозы не ожидается	16	грозы не ождается	37	грозы не ождается
09.06.2019	Печора	26	грозы не ожидается	21	гроза	47	гроза
	Мурманск	22	грозы не ожидается	22	гроза	44	гроза
	Кандалакша	25	грозы не ожидается	24	гроза	49	гроза
18.06.2019	Сыктывкар	25	грозы не ожидается	21	гроза	46	гроза
15.07.2019	Петрозаводск	28	грозы не ожидается	23	гроза	51	гроза
	Вологда	28	грозы не ожидается	27	гроза	55	гроза
	Кандалакша	26	грозы не ожидается	26	гроза	52	гроза
20.07.2019	Каргополь	25	грозы не ожидается	24	гроза	49	гроза
21.07.2019	Мурманск	26	грозы не ожидается	20	гроза	46	гроза
	Кандалакша	25	грозы не ожидается	18	гроза	43	грозы не ождается
22.08.2019	Каргополь	22	грозы не ожидается	20	гроза	42	грозы не ождается
	Печора	23	грозы не ожидается	22	гроза	45	гроза
	Кандалакша	29	гроза	26	гроза	55	гроза

Приложение Г

Таблица Г.1 – Прогноз методом Г.Д. Решетова на основе фактических данных (Грозы)								
№	Станция	Дата	Срок	H_B	H_0	Δh	T_B	Прогноз
1	10.06.2015	Сыктывкар	12 ч	7200	1400	5800	-36	Ожидается
2	13.06.2015	Кандалакша	12 ч	10800	1500	9300	-40,5	Ожидается
3	21.06.2015	Вологда	12 ч	14500	3800	10700	-51	Ожидается
4	23.06.2015	Вологда	12 ч	13600	3450	10150	-47	Ожидается
5	24.07.2015	Каргополь	12 ч	13200	2800	10400	-47	Ожидается
6	31.07.2015	Вологда	12 ч	12600	2400	10200	-40	Ожидается
7	02.08.2015	Печора	12 ч	12800	2500	10300	-41	Ожидается
8	09.06.2016	Печора	12 ч	11600	1800	9800	-47	Ожидается
9	03.07.2016	Сыктывкар	12 ч	13100	3700	9400	-51	Ожидается
10	04.07.2016	Сыктывкар	12 ч	13400	3500	9900	-47	Ожидается
11	18.08.2017	Печора	12 ч	12300	2700	9600	-50	Ожидается
12	22.08.2017	Печора	12 ч	12800	3200	9600	-56	Ожидается
13	24.08.2017	Вологда	12 ч	13100	2900	10200	-46	Ожидается
14	13.08.2018	Печора	12 ч	13100	3400	9700	-48	Ожидается
15	08.06.2019	Каргополь	12 ч	13900	3700	10200	-52	Ожидается
16	08.06.2019	Вологда	12 ч	13500	3700	9800	-53	Ожидается
17	08.06.2019	Кандалакша	12 ч	13100	3600	9500	-52	Ожидается
18	08.06.2019	Мурманск	12 ч	11400	3600	7800	-53	Ожидается
19	09.06.2019	Каргополь	12 ч	13800	3600	10200	-52	Ожидается
20	09.06.2019	Сыктывкар	12 ч	13400	3600	9800	-53	Ожидается
21	18.06.2019	Каргополь	12 ч	12800	3000	9800	-50	Ожидается
22	22.06.2019	Вологда	12 ч	14000	3700	10300	-51	Ожидается
23	22.06.2019	Каргополь	12 ч	14000	3700	10300	-50	Ожидается
24	15.07.2019	Архангельск	12 ч	12100	200	11900	-40	Ожидается
25	20.07.2019	Вологда	12 ч	13000	2750	10250	-42	Ожидается
26	21.07.2019	Сыктывкар	12 ч	13300	3100	10200	-44	Ожидается
27	22.08.2019	Мурманск	12 ч	12200	2250	9950	-43,2	Ожидается
28	06.06.2020	Архангельск	12 ч	13000	2700	10300	-47	Ожидается
29	06.06.2020	Сыктывкар	12 ч	12400	3100	9300	-55	Ожидается
30	09.06.2020	Петрозаводск	12 ч	14000	3700	10300	-54	Ожидается
31	02.07.2020	Архангельск	12 ч	12500	2600	9900	-44	Ожидается
32	21.07.2020	Вологда	12 ч	13400	3400	10000	-47	Ожидается
33	23.07.2020	Вологда	12 ч	12400	2700	9700	-46	Ожидается
34	24.08.2020	Архангельск	12 ч	12000	2700	9300	-48	Ожидается