



МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ
ФЕДЕРАЦИИ

федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования

«РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Кафедра метеорологических прогнозов

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА
(бакалаврская работа)

На тему Суперячейки: идентификация и прогноз

Исполнитель Эршов Мардон Чори угли

(фамилия, имя, отчество)

Руководитель кандидат физико - математических наук, доцент

(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)

«25» мая 2021 г.

Санкт-Петербург

2021

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	3
1 Основные понятия о суперячейках.....	5
1.1 Суперячейка, структура и условие образования мезоциклона.	5
1.2 Условия формирования мезоциклона	6
1.3 Годограф	9
1.4 Динамика суперячеек	10
1.5 Механизм торнадо в суперячейке.....	11
1.6 Строение и элементы суперячейки.....	12
1.7. Механизм образования крупного града в суперячейке.	21
1.8 Изображение суперячейки на радаре	22
1.9 Классификация суперячеек.....	27
2 Обзор суперячейки, наблюдавшейся над Московским регионом	30
3 Моделирование суперячейки с помощью WRF-ARW	42
3.1 Результаты численных экспериментов с одной сеточной областью начальными условиями с разрешением сетки $0,25^\circ$	45
3.2 Результаты численных экспериментов с одной сеточной областью начальными условиями с разрешением сетки $2,5^\circ$	50
3.3 Результаты численных экспериментов с вложенными сетками ...	54
Заключение	58
Список использованных источников литературы	60
Приложения	61

Введение

В результате последствий изменения глобального климата, растут и аномальные явления в тех регионах, где они редко наблюдались. В связи с этим растет и необходимость изучения того или иного рода опасных явлений. Так, к примеру, летом 2016 года над территорией Москвы и Московской области наблюдалась такое опасное явление, как суперячейка, которая нанесла существенный ущерб инфраструктуре некоторых населенных пунктов западной части Московской области.

К сожалению, достаточной информации для точного прогнозирования суперячеек на территории России нет, поэтому изучение этого явления с помощью моделирования является актуальной темой на данный момент времени.

Новизной научной работы является то, что такого рода исследования в России ранее не проводились. В связи с этим растет и важность данного исследования для дальнейшего благополучного прогнозирования изучаемых явлений и своевременного предотвращения последствий после прохождения суперячеек над каким-либо регионом Российской Федерации.

Основной целью является исследование суперячейки, которая прошла над Москвой и Московской областью в ночь с 13 июля по 14 июля 2016 года.

Объектом исследования является суперячейка.

Предмет исследования – моделирование суперячейки с помощью мезомасштабной гидродинамической модели WRF-ARW для идентификации этого явления и его дальнейшего прогноза.

Основные задачи:

- Сбор теоретических данных о формировании суперячейки.
- Выбор одной из суперячеек, которые наблюдались над территорией России для её дальнейшего изучения.
- Проведение численных экспериментов по гидродинамическому моделированию суперячейки.

- Анализ результатов и формулировка выводов по проведённому исследованию.

Данная выпускная квалификационная работа бакалавра состоит из введения, трёх глав, заключения и 5 приложений. Список использованных источников содержит 31 наименование.

В первой главе описываются основные понятия теории о суперячейках, их строение и структура, мезоциклон, связанный с суперячейкой, а также рассмотрены типы суперячеек.

Во второй главе подробно рассмотрена суперячейка, которая наблюдалась в Московском регионе.

В третьей главе приводятся результаты моделирования суперячейки с использованием мезомасштабной гидродинамической модели WRF-ARW.

В заключение представлены выводы и предполагаемые дальнейшие направления исследований.

1 ОСНОВНЫЕ СВЕДЕНИЯ О СУПЕРЯЧЕЙКАХ

1.1. Суперячейка, структура и условия образования мезоциклона

Суперячейка – мощное грозовое облако с некоторыми отличиями от обычной грозы.

Суперячейки способны порождать смерчи, опасный град и мощные нисходящие потоки воздуха.

Дополнением к стандартным условиям возникновения грозы - (неустойчивость воздушной массы, влажность, восходящие потоки) для возникновения суперячейки требуется сильный ветер с правым вращением, что означает поворот ветра по часовой стрелке с высотой. Так, например, приземный ветер может быть юго-восточным, ветер на средних уровнях может быть юго-западным, а ветер на больших высотах будет северо-западными. Поворот ветра с высотой помогает грозе развить свой главный отличительный компонент – мезоциклон. Диаметр суперячейки может достигать 50 км и более, а её высота часто превышает 10 км. Скорость восходящих потоков внутри суперячейки достигает 50 м/с и даже больше (рисунок 1.1).

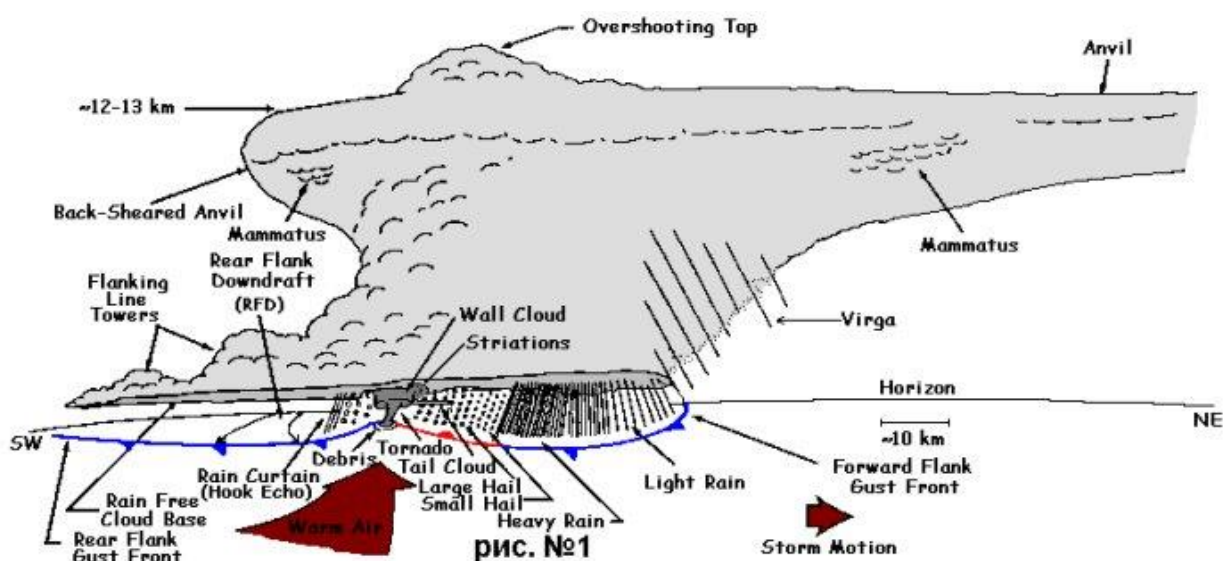


Рисунок 1.1 – Строение и структура суперячейки [1]

Overshooting top – пробой наковальни, anvil – наковальня, back-sheared anvil – наковальня со сдвигом назад, virga – полоса дождя, horizon – горизонт, mammatus – облака мамматусы, flanking line towers – фланговая линия башен, RFD и FFD – тыловой и передний нисходящие потоки, wall cloud – облако-навес, rain/hail – дождь, град, rain free cloud base – область без осадков, rear flank gust front – тыловой фланг порыва ветра, forward flank gust front – передний фланг порыва ветра, warm air – теплый воздух, storm motion – движение шторма.

1.2. Условия формирования мезоциклона

Основными факторами, необходимыми для образования суперячейки являются

сдвиг ветра (изменение скорости и направления ветра с высотой в слое 0 – 6 км),

наличие струйного течения,

сильная неустойчивость в атмосфере, когда наблюдается «взрывная конвекция».

Первоначально облако имеет характеристики отдельной ячейки с прямыми восходящими потоками тёплого и влажного воздуха, но затем на высоте (0 – 6 км) наблюдается сдвиг ветра и (или) струйное течение, которое начинает закручивать по спирали восходящий поток и немного его наклоняет от вертикальной оси.

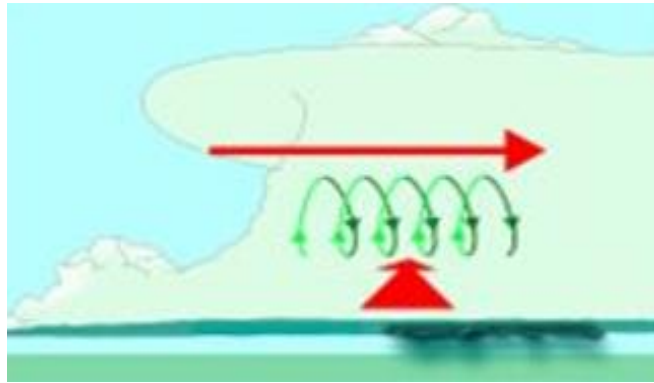
На рисунок 1.2 представлены стадии развития мезоциклона суперячейки. На рисунке 1.2а красной тонкой стрелкой показан сдвиг ветра (струйное течение), широкой стрелкой – восходящий поток. В результате соприкосновения восходящего потока со струйным течением, поток воздуха начинает закручиваться по спирали в горизонтальной плоскости.

Затем восходящий поток, вращаясь по спирали, постепенно из горизонтального преобразуется в более вертикальный. Схему этого можно наблюдать на рисунке 1.2б.

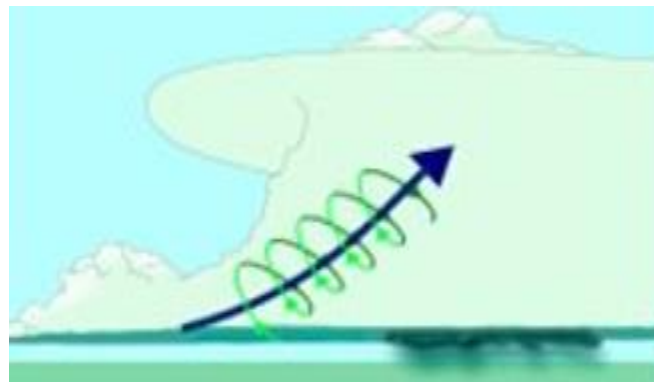
В конечном итоге восходящий поток приобретает почти вертикальную ось. При этом вращение продолжается, и оно настолько мощное, что в итоге пробивает наковальню, образуя над ней возвышающийся купол. Появление этого купола свидетельствует о мощных восходящих потоках, которые способны пробить инверсионный слой. Этот вращающийся поток является «сердцем» суперячейки и называется мезоциклоном. Его диаметр может составлять от 2 до 10 км. Возвышающийся купол как раз свидетельствует о наличии мезоциклона (рисунок 1.2в).

Большая продолжительность жизни и стабильность суперячейки связана со следующим. Благодаря мезоциклону выпадение осадков происходит чуть в стороне от восходящего потока, а следовательно, и нисходящие потоки также наблюдаются в стороне (в основном по обе стороны от мезоциклона). В таком случае оба потока (нисходящий и восходящий) сосуществуют между собой. Опускаясь вниз, первый вытесняет тёплый воздух вверх, а не блокирует его доступ в ячейку, тем самым ещё больше усиливая восходящий поток. А чем мощнее восходящий поток, тем сильнее и осадки, которые вызывают ещё большие нисходящие потоки, которые всё сильнее вытесняют приземный воздух вверх. И если ячейку уподобить колесу, получается, что осадки в такой ситуации, как бы, это колесо раскручивают. Именно в результате этого суперячейка способна существовать в течение многих часов, разрастаясь за это время на десятки км в ширину и длину, порождая крупный град, сильные ливни и часто торнадо.

а)



б)



в)



Рисунок 1.2 – Условия формирования мезоциклона суперячейки [1]

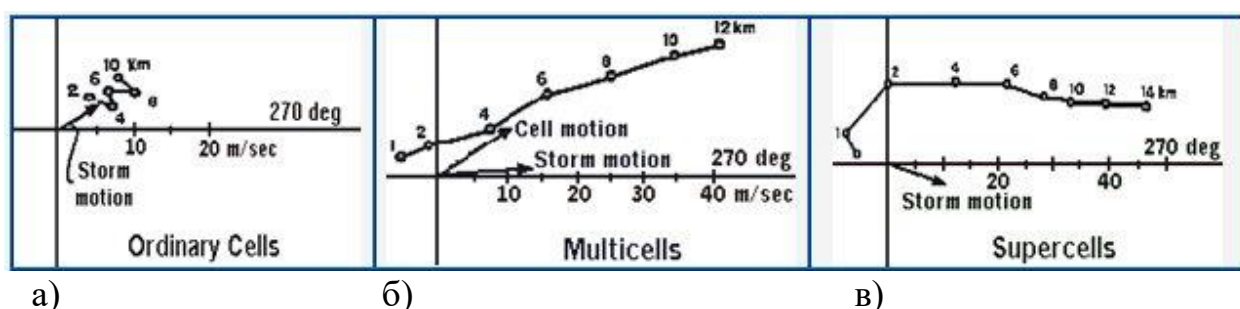
В это время у поверхности земли появляется 3 минифронта: 2 холодных в районе нисходящих потоков, и тёплый в районе восходящих потоков. То есть появляется миниатюрный циклон, «зародышем» которого как раз и является тот самый мезоциклон.

Однако существует главное различие между суперячейкой и мезоциклоном: в суперячейке осадки и торнадо наблюдаются одновременно,

а в отдельных ячейках и в группе ячеек – сначала смерч, а потом осадки, причём в том районе, где наблюдался смерч. Это связано с отсутствием явного сдвига ветра в пространстве верхней «кристаллогенной» части облака, и нижней в которую втекает тёплый воздух. Кроме того, в суперячейках обычно над вершиной имеется струйное течение, которое выносит вытесненный воздух прочь от облака, в результате чего наблюдается очень вытянутая наковальня (рисунок 1.1), тогда как в обычной конвективной ячейке вытесненный тёплым холодный воздух опускается по краям и тем самым дополнительно блокирует «питание», поэтому смерчи в таких ячейках кратковременны, слабые, и редко бывают на стадии большей, чем воронка. (воронкообразное облако).

1.3. Годограф

На рисунке – 1.3 показано сравнение трёх видов штормов с помощью годографа. Годограф скорости – это кривая, которая соединяет концы векторов скорости за разные промежутки времени, отсчитанные от одной точки.



проведённые из точки (0,0) (пересечение осей абсцисс и ординат), которые показывают скорость и направление ветра на конкретной высоте (в км). Например, для годографа суперячейки на высоте 1 км ветер юго-восточный, на 2 км высоты он усилился (вектор длиннее) и стал южным, а на большей высоте он постепенно переходит на юго-западный, становясь всё сильнее. Таким образом, чем длиннее годограф, тем сильнее сдвиг ветра. Но не только длина, но и форма годографа очень важна, т.к. указывает на изменение направления ветра с высотой. Также изогнутый годограф указывает на присутствие на нижних уровнях атмосферы струйного течения, которое увеличивает потенциал для развития шторма. Как видно из рисунка 1.3, отдельные ячейки имеют незначительный сдвиг ветра, поэтому они не опасны, хотя если в атмосфере присутствует сильная неустойчивость, то может произойти пульсация шторма до мощного с образованием града и (или) сильных шквалов.

1.4. Динамика суперячеек

Нужно отметить, что суперячейки бывают и большие и маленькие, с низкой или высоким возвышающимся куполом и могут образовываться, где угодно, но в основном они наблюдаются в центральных штатах США – на Великих равнинах, очень страдает от суперячеек Бангладеш. В Европе и России они крайне редки и встречаются только одного вида – суперячейки типа HP (high precipitation) – с обильными осадками. Суперячейки всегда связаны со значительным сдвигом ветра и высокими значениями индекса CAPE потенциальная энергия конвективной неустойчивости. Для суперячеек предел вертикального сдвига ветра начинается с 20 м/с в слое 0-6 км.

Мощный сдвиг ветра в слое 0-6 км вызывает высокий потенциал для развития суперячейки и мезоциклона, но не обязательно торнадо. Развитие торнадо зависит от динамической структуры шторма. Сила мезоциклона также зависит от плавучести (явление, когда отдельный объём воздуха

поднимается и остаётся на некоторой высоте свободно «подвешенным»). Как правило, суперячейка, существующая в среде с присутствием струйного течения на низком уровне, способна породить торнадо в большинстве случаев. Вертикальный сдвиг ветра вызывает развитие динамических процессов в шторме, которые затрагивают развитие, силу, продолжительность и движение суперячейки. Моделирование показывает, что вращение вокруг вертикальной оси (восходящий поток) должно быть уравновешено силой барического градиента, направленной к центру вращения, вызывая понижение давления в среднем слое шторма, где вращение наибольшее. Это вертикальное колебание давления приводит к еще более сильному восходящему потоку в среднем слое ячейки, который в свою очередь вызывает большее вращение (из-за вертикального протяжения). Скорость восходящего потока увеличивается с высотой, поэтому чем больше сдвиг ветра, тем сильнее происходит вращение.

Благодаря динамическим процессам, суперячейка может «всасывать» воздух и благоприятно существовать в ночное время, несмотря на уменьшение потоков тепла и неустойчивости. Динамические процессы приводят к тому, что суперячейка начинает двигаться правее от среднего (ведущего) потока. Динамические процессы, в конечном счете, могут заставить главный восходящий поток разделиться на 2 отдельных восходящих потока, то есть, каждая суперячейка может развить оба циклонических (на правой стороне) и антициклонических (на левой стороне) вращения в среднем слое. Это может разделить суперячейку на 2 отдельные ячейки, при этом одна будет двигаться вправо, а другая влево от ведущего потока.

1.5. Механизм торнадо в суперячейке

Все суперячейки вызывают суровые погодные условия (град, шквалы, ливни), но только 30% или меньше из них генерируют торнадо, поэтому надо

попытаться различить суперячейки, генерирующие торнадо, от более «спокойных».

Мощный сдвиг ветра в слое 0-6 км (длинный годограф) и достаточная плавучесть необходимы для образования мощного мезоциклона. Образование суперячейки в условии существенного искривления годографа в слое 0-2 км способствует развитию торнадо. Однако развитие торнадо зависит от динамической структуры шторма. Должен присутствовать сильный восходящий поток и вертикальное вращения для сильного мезоциклона и развития торнадо. Горизонтальное завихрение, вызванное вертикальным сдвигом, является решающим в формировании мезоциклона.

1.6. Строение и элементы суперячейки

Главным элементом суперячейки, как было сказано выше, является мезоциклон, визуальным признаком которого является возвышающийся купол (overshooting top) над наковальней и вращающееся (но не всегда) облако-навес (wall cloud) в основании суперячейки. Это облако округлой или овальной формы показывает зону главного восходящего потока (рисунок 1.4).

а)



б)



Рисунок 1.4 – Строение облаков суперячейки [1]

Диаметр облако-навеса обычно составляет 1 – 4 км. В редких случаях в верхней части этого облака наблюдается так называемое «облако-воротник» (collar cloud), имеющее вид кольца. От облако-навеса (wall cloud) часто в северном направлении отходит некий «отросток» - облако-хвост (tail cloud) (рисунок 1.11). Это облако в виде узкой и длинной полосы одним краем примыкает к облаку-навесу и тянется от него обычно от зоны выпадения осадков в северном направлении. Иногда можно наблюдать другой вид облака-хвоста – «хвост бобра» (beaver tail) (рисунок 1.10). Оно имеет вид относительно широкой и плоской полосы, похожей на хвост бобра, от чего и получило своё название. Оно примыкает к главному восходящему потоку и располагается примерно параллельно к тёплому фронту суперячейки и простирается обычно с запада на восток. Часто наблюдается одновременно облако-хвост, отходящее от облака-навеса и хвост бобра. Последний более длинный и образуется на большей высоте. Часто от облака-навеса развивается направленный вниз облачный отросток – воронкообразное облако (funnel cloud). Если эта воронка достигает поверхности земли, то в этом случае она называется торнадо. В этом случае на месте соприкосновения торнадо с землёй образуется вращающееся облако пыли и мусора (debris cloud). Раньше это образование называли каскадом.

В суперячейке почти всегда существует 2 основных нисходящих потока:

1. Тыловой нисходящий поток (Rear flank downdraft). Это область оседания сухого воздуха на тыловой стороне мезоциклона, как бы обёртывая его вокруг, за исключением область вовлечения (притока inflow). Визуальным признаком тылового нисходящего потока является «чистая щель» (clear slot) – небольшая область менее плотной и более светлой облачности указывает на нисходящий поток. Этот поток формирует у земной поверхности тыловой холодный фронт, над которым развиваются кучевые облака в виде башен (towers), т.к. их высота значительно превышает ширину, соединённые между собой в цепочку или линию (flanking line towers). Эта линия обычно располагается на юго-западной стороне от мезоциклона. Линия кучевых облаков имеет ступенчатый характер, когда наивысшее облако (главная башня – main tower) (рисунок 1.5) располагается вплотную к мезоциклону, постепенно сливаясь с ним, увеличивая суперячейку в размере. В районе слияния выделяют узкую область с интенсивными осадками и градом – занавес дождя (rain curtain).

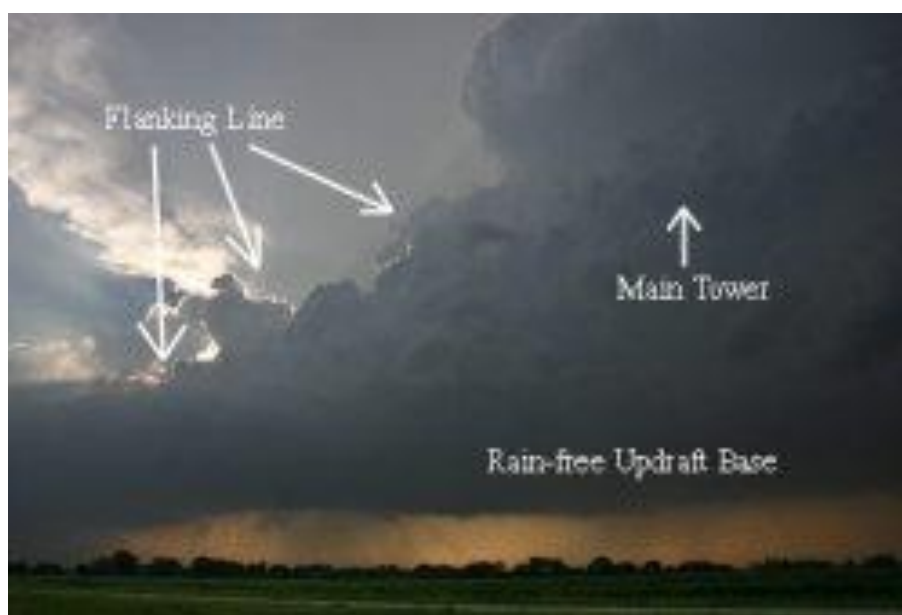


Рисунок 1.5 – Строение суперячейки [1]

2. Передний нисходящий поток (Forward flank downdraft). Это главная область нисходящих потоков в передней части суперячейки, где выпадают самые сильные осадки на обширной территории (рисунок 1.6).



Рисунок 1.6 – передний фланг нисходящего потока [1]

Эти потоки создают передний холодный фронт. Передний фланг нисходящего потока идентичен с тыловым нисходящим потоком, только наблюдается с противоположной стороны мезоциклона и более обширный. Как раз вдоль переднего холодного фронта развивается облако-полка (shelf cloud) – разновидность шквального ворота. Шквальный ворот имеет вид горизонтального клина или плоского выступа, нижняя часть которого обычно имеет клочковатый или разорванный вид из-за сильных ветров. Наряду с двумя холодными фронтами, в суперячейке у поверхности земли существует один тёплый фронт – граница между областью притока тёплого воздуха и передним нисходящим потоком, следовательно, он простирается от мезоциклона к востоку – юго-востоку от него и обычно стационарный или медленно движется в северо-восточном направлении, переходя на некотором расстоянии в передний холодный фронт.

Часто в суперячейках нисходящие потоки достигают чрезвычайной мощности. В этом случае они называются downburst («нисходящий порыв»).

Достигая земли, этот поток распространяется во всех направлениях, причиняя сильные разрушения. У нас это явление называется шквалом, однако его скорость всё же уступает нисходящему порыву. Различают микропорывы и макропорывы. Микропорыв – это маленький нисходящий порыв, распространяющийся на расстояние до 4 км от места соприкосновения с поверхностью (рисунок 1.7). Продолжительность микропорывов обычно около 5 мин. Макропорывы распространяются на расстояние более 4 км и существуют гораздо дольше.



Рисунок 1.7 – Микропорыв [1]

Среди нисходящих порывов различают также сухие и влажные как микро-, так и макропорывы. Сухие сопровождаются слабыми осадками или вовсе не сопровождаются ими. Они в основном возникают в суперячейках типа LP (low precipitation) – со слабыми осадками. Влажные сопровождаются интенсивными осадками и наблюдаются соответственно в суперячейках типа HP (high precipitation) – с обильными осадками.

Скорость ветра в нисходящем порыве может достигать 240 км/ч. Формирование нисходящего порыва начинается при прохождении больших капель или града через сухой воздух. При этом град начинает таять, а капли

испаряться. Этот процесс требует затрат тепла, поэтому окружающий воздух охлаждается. Плотность холодного воздуха, как известно, выше тёплого, поэтому охладившийся воздух в суперячейке резко «падает» на землю в виде нисходящего порыва. Интенсивность этого падения, а следовательно, и скорость ветра, напрямую зависят от скорости охлаждения воздуха. Визуальным признаком влажного микропорыва служит такое явление, как «нога дождя» (rain foot)— это горизонтальный выступ около земной поверхности части полос падения осадков (рисунок 1.8). То есть микропорыв сносит осадки в сторону.



Рисунок 1.8 – «Нога дождя» (rain foot) [1]

Наряду с нисходящими потоками в суперячейке присутствует один главный восходящий поток (updraft) (рисунок 1.9), расположенный между двумя нисходящими. О его присутствии свидетельствует облако-навес и зона, свободная от осадков (precipitation free base). Эта зона представляет собой тёмное и плоское основание главной башни (рисунок 1.5), которое в отличие от облака-навеса не вращается. Несмотря на это, торнадо могут развиваться не только из облако-навеса, но и от зоны, свободной от осадков,

особенно, когда она расположена на южной или юго-западной стороне от главной области выпадения осадков.



Рисунок 1.9 – Восходящий поток (updraft) и нисходящий поток (downdraft) [1]

Между областью восходящих потоков и передним нисходящим потоком нередко наблюдается просвет в облаках («чистая зона»). Этот район называется «свод» (vault) (рисунок 1.11). Обычно он наблюдается с северной части от облака-навеса. В районе свода часто наблюдается выпадение града и сильно повышена грозовая активность.

Ещё одной особенностью суперячеек являются, так называемые, полосы притока (inflow bands) (рисунок 1.10). Они являются облаками нижнего яруса, наблюдающимися параллельно воздушным потокам на нижнем уровне. Они располагаются полосами и между ними существуют, так называемые, «борозды» (striations) – углубления или канавы, которые также расположены параллельно воздушным потокам. И борозды, и полосы притока показывают направление воздушных потоков относительно материнского облака, а их изогнутость в виде дуг указывает на присутствие мезоциклона.



Рисунок 1.10 – Полосы притока (inflow bands) и облака-хвоста – «хвост бобра» (beaver tail) [1]

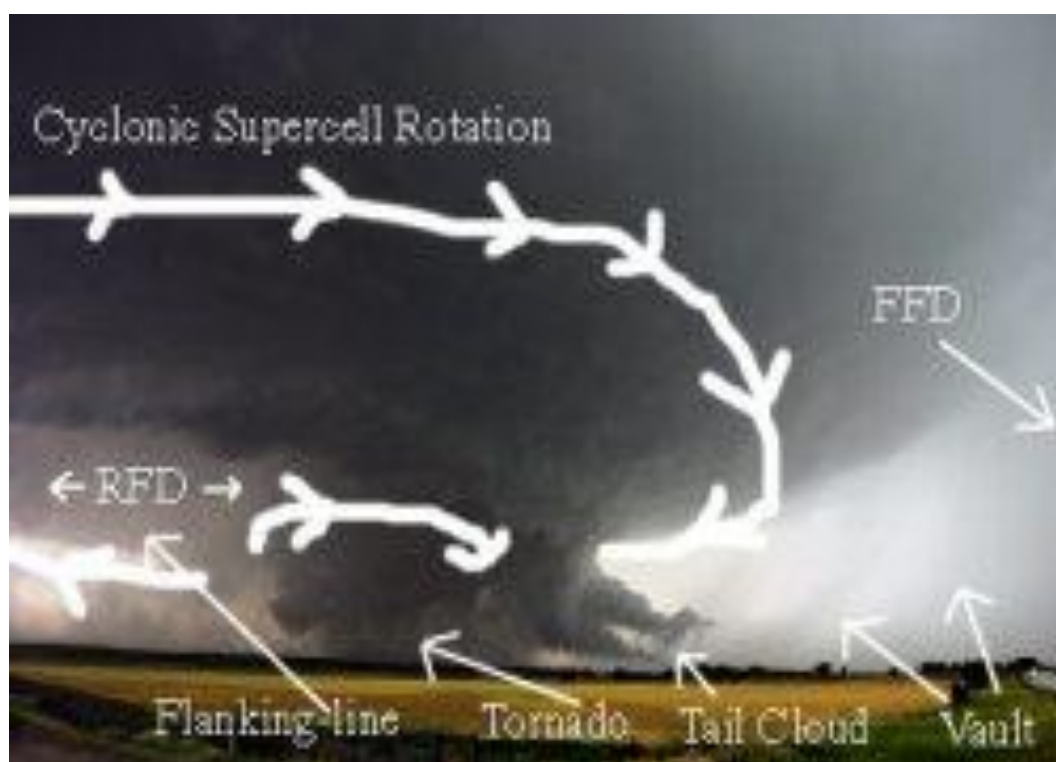


Рисунок 1.11 – Направление циклонического вращения суперячейки, «отросток» - облако-хвост (tail cloud) и чистая зона «свод» (vault) [1]

Наковальню суперячейки условно можно разделить на две части – переднюю и заднюю. Передняя часть намного больше задней и сильно вытянута по направлению движения ячейки. Большой интерес представляет задняя её часть, которая называется «back-sheared anvil», что дословно переводится как «наковальня со сдвигом назад». Благодаря интенсивным восходящим потокам в суперячейке эта часть наковальни может распространяться против ветра, а скорость ветра на высоте её формирования, 13-14 км, как видно из годографа, составляет более 40 м/с (рисунок 1.3).

Неотъемлемой частью суперячейки являются вымеобразные облака – *mammatus* или *mammatocumulus* (рисунок 1.12), которые имеют вид округлений (выпячиваний), свисающие с основания наковальни (как передней, так и задней), часто в виде полос или гряд. Эти облака могут находиться в десятках километрах от мезоциклона, на краю суперячейки.



Рисунок 1.12 – Вымеобразные облака «mammatus» [1]

Продолжительность существования вымеобразных облаков зависит от размеров капель (или ледяных кристаллов) и колеблется от нескольких минут

до нескольких часов. Чем крупнее капельки и кристаллы, тем дольше существуют облака, так как необходимо затратить больше энергии на их испарение. Условием для их образования является соседство влажной и неустойчиво стратифицированной воздушной массы в средней и верхней частях тропосферы над сухой воздушной массой, занимающей нижнюю часть тропосферы. В таких условиях под опускающимися кристаллами льда наковальни суперячейки возникает система небольших восходящих и нисходящих воздушных потоков на фоне общего нисходящего потока воздуха. Эти потоки и приводят к образованию характерной формы облаков. Иными словами, эти облака являются открытыми конвективными ячейками с нисходящим потоком в центре каждой и восходящим между ними. Именно тот факт, что они образуются на нисходящих движениях воздуха, делает их уникальными.

1.7. Механизм образования крупного града в суперячейке

При перемещении суперячейки сильнейший восходящий поток образует в ней область, называемую «ниша». В этой области капли и кристаллы не успевают вырасти до размеров, при которых могли бы выпадать и выносятся потоком в наковальню. Падая вниз, они снова затягиваются внутрь восходящего потока (рисунок 1.13). Такая многократная рециркуляция частичек осадков и является механизмом, способствующим образованию в суперячейках особенно больших градин (иногда более 10 см в диаметре). Для образования градины размером с шар для гольфа, она должна находиться в облаке как минимум 5 – 10 минут. За это время она испытывает более 10 миллиардов столкновений с переохлаждёнными каплями, приобретая слоистую структуру с чередующимися слоями прозрачного и мутного льда (рисунок 1.14). При падении градины такого размера развивают скорость более 150 км/ч, причиняя серьёзный ущерб и травмы. Таким образом, чем сильнее восходящий поток, тем дольше градины остаются в

облаке, и тем крупнее они становятся. А так как столь мощные восходящие потоки наблюдаются только в суперячейках, то и градины подобных размеров образуются только в них.

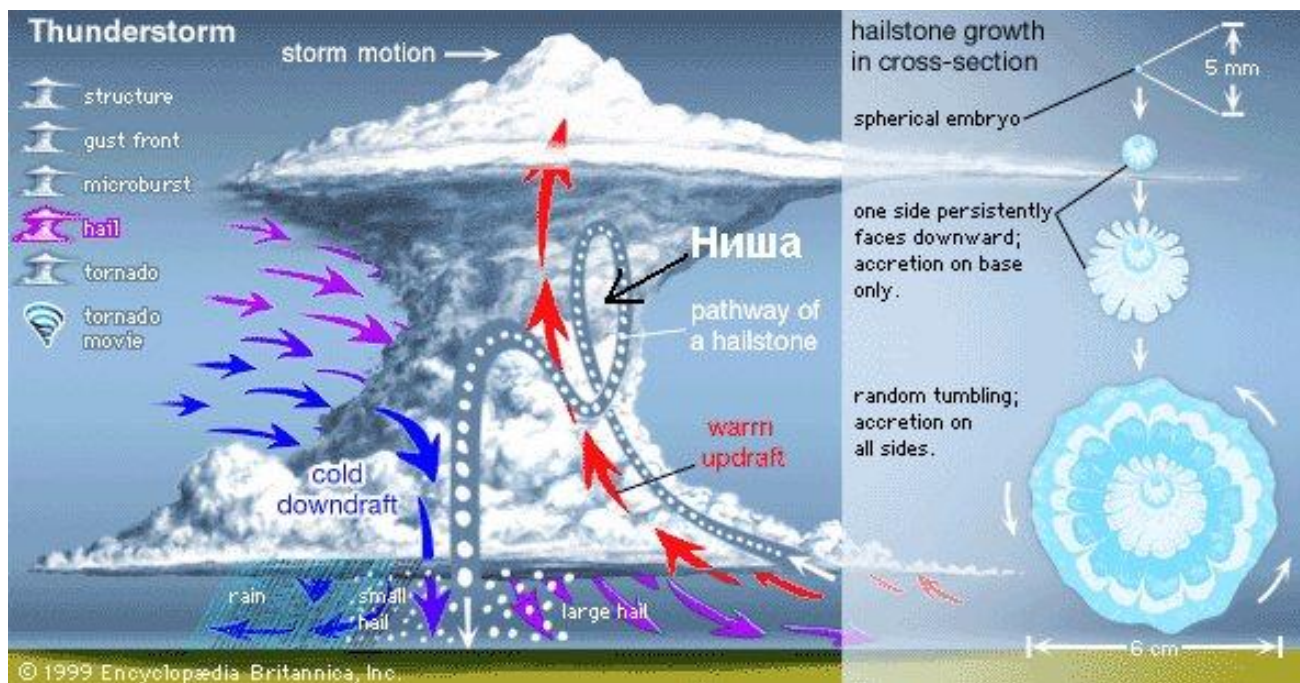


Рисунок 1.13 – Механизм образования града в суперячейке [1]



Рисунок 1.14 – Суперячейковая градина [1]

1.8. Изображение суперячейки на радаре

На доплеровской локаторе, который используется для наблюдения за опасными явлениями погоды, классическая суперячейка имеет вид

гигантской запятой или «крюка», поэтому её отражение на радаре называют «Hook echo» - эхо в виде крючка (вид сверху). Правильнее сказать, что крючок – это элемент суперячейки, указывающий на присутствие мощного мезоциклона и следовательно, торнадо. На рисунке 1.15 зона, свободная от радиоэхо (вогнутая часть) соответствует зоне мощного восходящего потока и поэтому не прослеживается выпадение осадков. Район, окрашенный в красный цвет, соответствует сильному дождю, граду и торнадо. Поэтому появление на радаре крючкообразного эхо свидетельствует о высокой вероятности формирования торнадо. Данное изображение было получено 3 мая 1999 года в Оклахоме. Эта суперячейка породила торнадо F5, которое обрушилось на Оклахома-Сити.

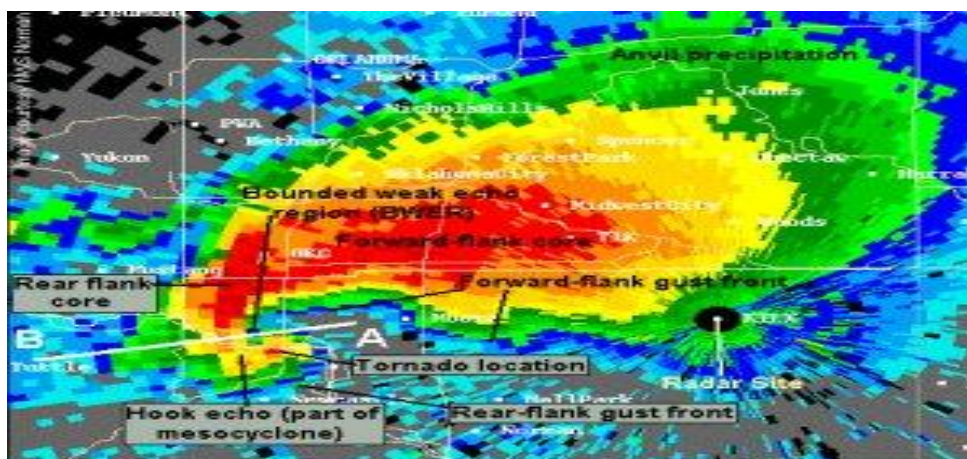


Рисунок 1.15 – Отражение на радаре классической суперячейки «Hook echo» [1]

Но далеко не всегда в суперячейках эхо крючка имеет столь чёткий вид. В южных штатах США чаще всего встречаются суперячейки типа НР (high precipitation) – с обильными осадками, не имеющие отчётливой формы крючка. Вместо этого область, соответствующая восходящим потокам и мезоциклона в ней имеет форму боба (фасолины), т.к. осадки наблюдаются и под восходящими потоками.

На рисунке 1.16 предоставлен разрез на радаре суперячейки. На полученном вертикальном профиле видно ещё одна особенность развитой суперячейки – ограниченная область слабого радиоэхо (bounded weak echo region – BWER). Это особенность радиоэхо, при котором наблюдается его частичное или полное отсутствие в среднем и нижнем слое атмосферы (weak echo region – WER) и присутствие в верхнем. Эта особенность связана с интенсивным восходящим потоком и почти всегда находится в области притока. Формирование ограниченной области слабого радиоэхо объясняется тем, что восходящий поток настолько мощный, что выносит частицы (гидрометеоры) в верхние слои, прежде чем они увеличатся до таких размеров, когда станут видимыми на радаре. Ограниченная область слабого радиоэхо обычно прослеживаются на высотах от 3 до 10 км и имеет несколько км в поперечнике. Выше области ограниченного слабого радиоэхо находится зона интенсивного радиоэха, называемая «нависание» (overhang), которая как-бы нависает над «пустой» зоной. Обнаружение ограниченной области слабого радиоэхо очень важно, поскольку его наличие свидетельствует о суровых явлениях погоды.

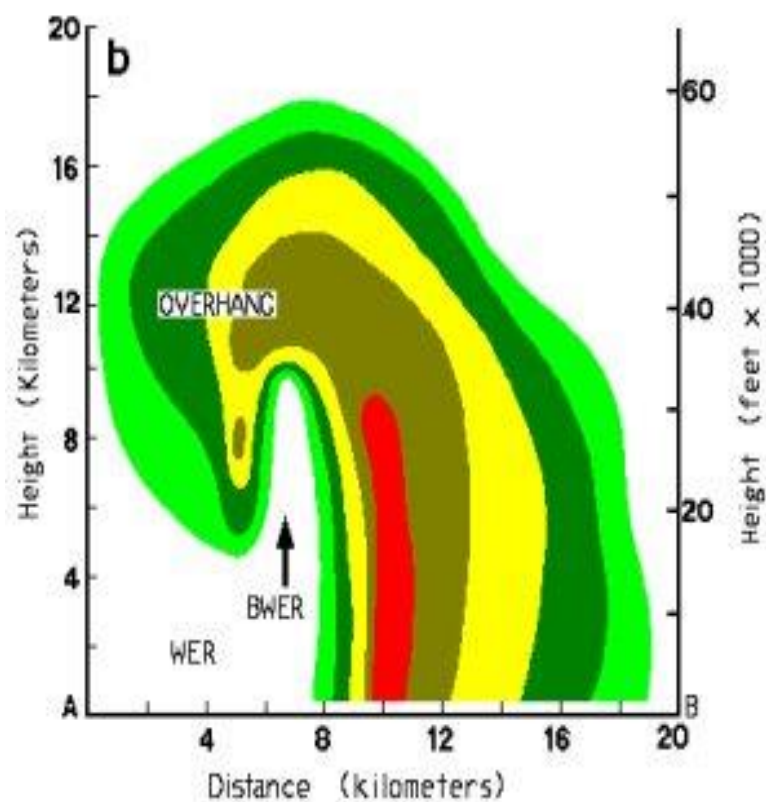


Рисунок 1.16 – Вертикальный разрез отражения суперячейки на радаре [1]

На схеме, приведённой на рисунке 1.17, представлена эволюция суперячейки типа НР (high precipitation) – с обильными осадками (А) в вид «лука» (оружие) «bow echo» (D). На рисунке 1.17 «А» изображена типичная ячейка типа НР. Затем у неё начинает развиваться тыловой приток воздуха («В»), который со временем усиливается («С») и выгибает ячейку в обратном направлении в виде bow echo («D»)

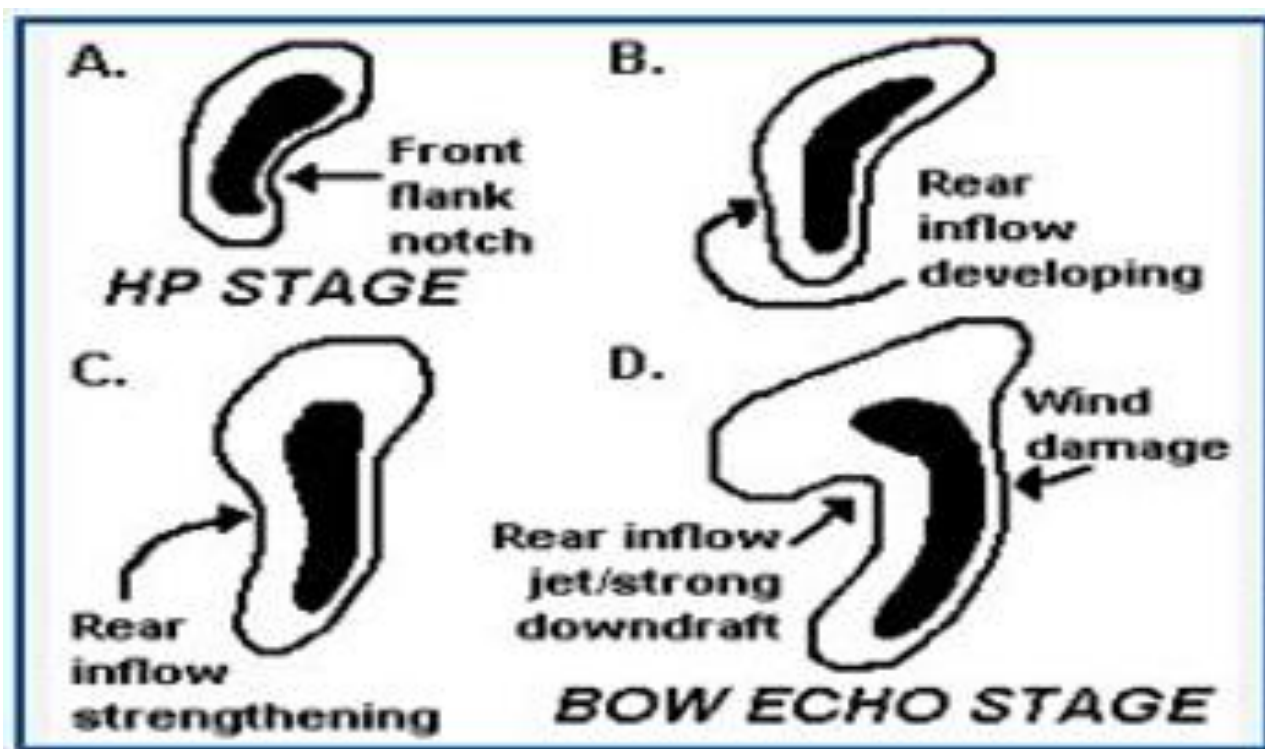


Рисунок 1.17 – Эволюция суперячейки типа HP [1]

Классические и суперячейки типа HP при определённых условиях на радаре могут принимать вид «лука» (оружие) «bow echo». Это происходит, когда тыловой нисходящий поток или тыловой приток воздуха, усиливаясь, заставляет суперячейку выгибаться в обратном направлении. В результате, она принимает вид лука на радаре и начинает перемещаться в другом направлении, формируя разрушительные ветры на своём пути. В этом случае, мощные торнадо, которые присутствуют в области «крюка», разрушаются.

Иногда на радаре можно увидеть ещё один элемент суперячейки – V-выемка (V-notch) (рисунок 1.18). Он имеет вид V-образной выемки в передней части суперячейки. Это явление свидетельствует о расхождении потоков вокруг мощного восходящего потока.

Также иногда на радаре можно увидеть «выемку притока» (inflow notch), в виде вогнутого радиоэхо в области притока (тёплый фронт) суперячейки и обычно совпадают с правым сектором классической суперячейки, а в суперячейке типа HP располагается обычно с восточной части.

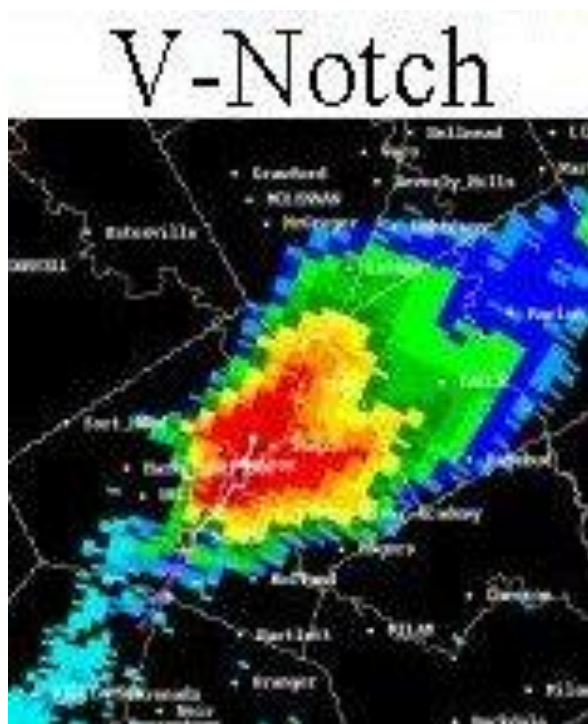


Рисунок 1.18 – Отражение на радаре V-образной выемки суперячейки
[1]

1.9. Классификация суперячеек

Суперячейки обычно классифицируют на три вида. Но не все суперячейки чётко соответствуют конкретному виду и часто переходят с одного вида в другой в процессе своей эволюции. Все типы ячеек порождают суровые погодные условия.

Классическая суперячейка (Classic supercell) – суперячейка, представленная на рисунке 1.1. Это идеальная суперячейка, в которой присутствуют почти все вышеперечисленные элементы как на радаре, так и визуальные. Показатели неустойчивости для этого типа, следующие:

Индекс CAPE, который характеризует потенциальную энергию конвективной неустойчивости, 1500 – 3500 Дж/кг,

Индекс Li, который характеризует термическую стратификацию атмосферы по отношению к вертикальным перемещениям воздуха, от -4 до -10.

Но в природе такие ячейки встречаются довольно редко, чаще наблюдаются два остальных типа.

Суперячейка типа LP (Low Precipitation) – со слабыми осадками. Этот класс суперячеек имеет небольшую область со слабыми осадками (дождь, град), отделённую от восходящего потока. Этот тип может быть легко опознаваемым за счёт облачных борозд. Они формируются вдоль, так называемых, сухих линий – когда у поверхности наблюдается тёплый и влажный воздух, который вклинивается, подобно холодному фронту, под более жаркий и сухой воздух, т.к. последний менее плотный, имея мало доступной влаги для своего развития, несмотря на сильный сдвиг ветра. Такие ячейки обычно быстро разрушаются, не переходя в другие типы. Как правило, они генерируют слабые торнадо и град, размером менее 1 дюйма (2,54 см). Из-за отсутствия сильных осадков, этот тип ячеек имеет слабое отражение на радаре без чёткого крючка «hook echo» несмотря на то, что в это время на самом деле наблюдается торнадо. Грозовая активность такой ячейки значительно ниже по сравнению с другими типами и молнии преимущественно внутриоблачные, а не между облаком и землёй. Эти суперячейки формируются при:

Индекс CAPE: 500 – 3500 Дж/кг

Индекс Li: -2 – (-8).

Такие ячейки встречаются преимущественно в центральных штатах США в весенние и летние месяцы. Также они наблюдались в Австралии.

Суперячейка типа HP (High Precipitation) с обильными осадками. Этот тип суперячеек имеет гораздо более сильные осадки, чем остальные виды. Осадки могут полностью окружать мезоциклон. Такая ячейка особо опасна, поскольку может содержать мощный торнадо, который визуально скрыт за стеной осадков. Суперячейки этого типа часто вызывают наводнения и сильные нисходящие порывы, но по сравнению с другими типами имеют меньшую вероятность формирования крупного града. Было отмечено [1], что

эти суперячейки генерируют большее количество внутриоблачных и разрядов между облаком и землей, чем остальные типы.

Показатель CAPE для этих суперячеек составляет 2000 – 7000 Дж/кг и более, а индекс Li должен быть ниже -6. Перемещаются такие ячейки относительно медленно [1].

2 ОБЗОР СУПЕРЯЧЕЙКИ, НАБЛЮДАВШЕЙСЯ НАД МОСКОВСКИМ РЕГИОНОМ

Днем 13 июля и в ночь на 14 июля 2016 года в Белоруссии, ряде областей Центрального и Приволжского федеральных округов наблюдался комплекс опасных явлений погоды редкой интенсивности. Отмечались сильные ливни, крупный град диаметром 30-50 мм и более, шквалы 20-25 м/с (в отдельных районах, судя по разрушениям, скорость ветра при шквалах была выше), и весьма интенсивные смерчи.

Был зафиксирован торнадо в Минской области в районе населенного пункта Прилуки, где вывалил лес на значительной площади. Также поступали сведения о смерчах в Смоленской области.

Но наиболее сильный смерч прошел через Можайский и Рузский районы Московской области. Длина пути этого смерча составила 49 км, а максимальная ширина полосы разрушений до 570 м.

В результате этого смерча в различной степени пострадало несколько населенных пунктов и сотни строений. В деревне Прудня и поселке Колюбакино ряд частных жилых домов были полностью разрушены. Имелись человеческие жертвы (по разным данным, погибли 1 или 2 человека) и пострадавшие (не менее 17 человек получили травмы только в Рузском районе).

Все эти опасные явления погоды были связаны с одним процессом, точнее с прохождением одного долгоживущего мезомасштабного конвективного комплекса.

Комплекс сформировался над территорией Беларуси вблизи центра циклона, перемещавшегося с высокой скоростью по потоку с запада-юго-запада на север-северо-восток.

Циклон возник на полярном фронте, в его теплом секторе распространялась теплая и влажная воздушная масса с температурой на АТ850 +17..+18° и значительным влагосодержанием.

Температурный контраст на фронте составлял 7-8°. Траектория волнового циклона пролегла через Минск, далее немного севернее Смоленска и Москвы (рисунок 2.1).

Восточнее Москвы, в связи с изменением ведущего потока в средней тропосфере, направление смещения волнового циклона изменилось на восточное-юго-восточное.

Постепенно замедляя свое движение, циклон прошел через Нижний Новгород и Казань, а вечером 14 июля окончательно заполнился над территорией Башкортостана, войдя в систему малоподвижного высокого циклона с центром над Зауральем.

В зоне сходимости вблизи центра волнового циклона интегральное влагосодержание воздуха достигало 40-45 мм, что стало одним из важных факторов, способствовавших развитию мезомасштабного конвективного комплекса (рисунок 2.2).

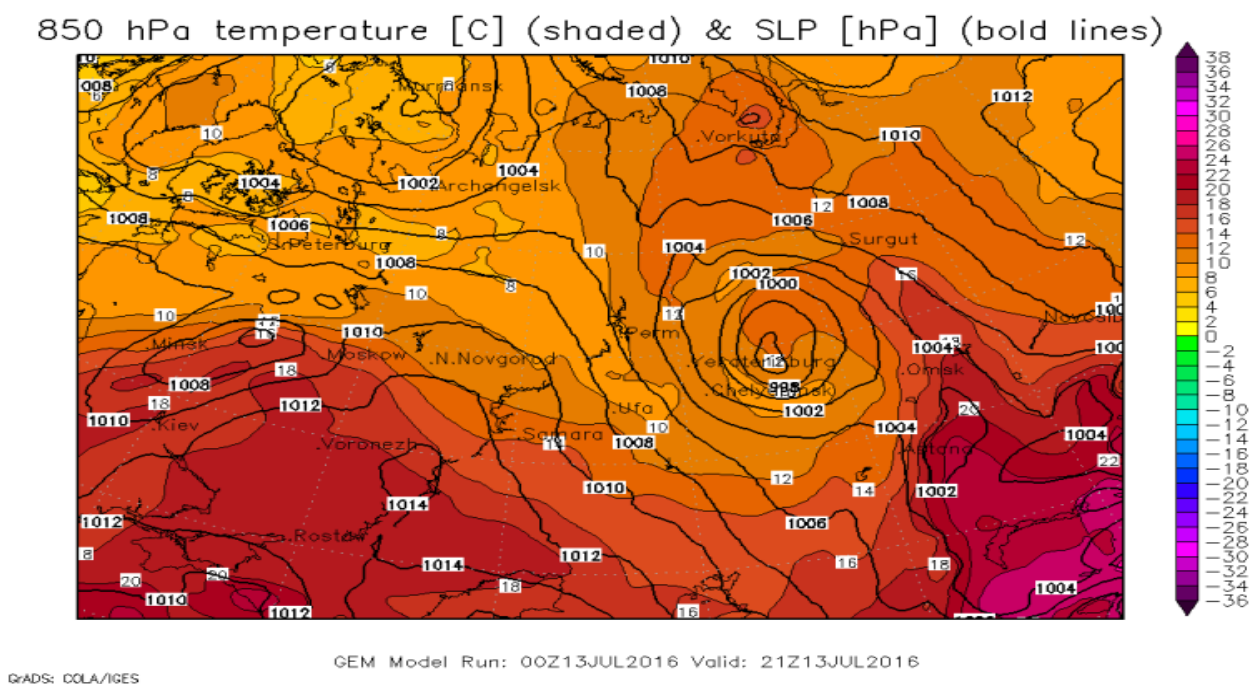
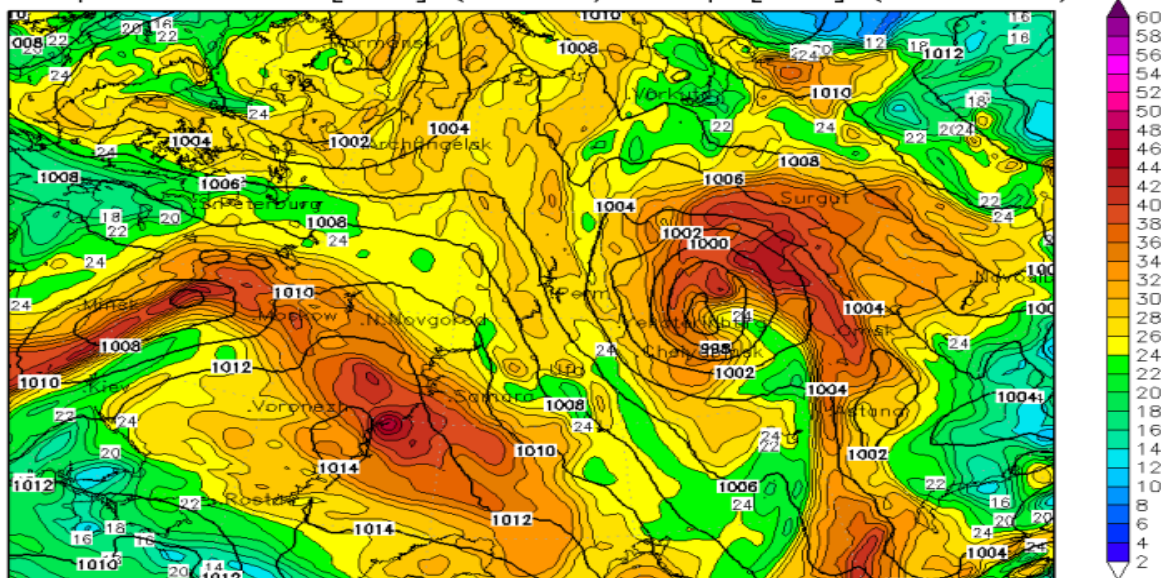


Рисунок 2.1 – Поле температуры на изобарической поверхности AT850 13.07.2016 в 21.00 ВСВ по данным канадской модели GEM [2]

precipitable water [mm] (shaded) & slp [hPa] (bold lines)



GRADS: COLA/IGES

GEM Model Run: 00Z13JUL2016 Valid: 21Z13JUL2016

Рисунок 2.2 – Количество осадков 13.07.2016, в 21.00 ВСВ по данным канадской модели GEM [2]

Вторым, не менее важным фактором, был вертикальный сдвиг ветра по скорости (увеличение скорости ветра с высотой) и по направлению (у земли ветер имел юго-западное направление, а в средней тропосфере - западное).

По данным дневного радиозондирования атмосферы на территории Минска, скорость ветра в средней тропосфере достигала 20-25 м/с, а на уровне АТ-300 увеличивалась до 28 м/с.

Таким образом, наблюдались идеальные условия для формирования мощных кучево-дождевых облаков с мезоциклонами.

Такие условия способствовали также высокой скорости перемещения сформировавшегося комплекса, его устойчивости и очень большой продолжительности существования.

Такие условия идентифицируются, в частности, по очень высокому значению индекса мезомасштабных конвективных систем MCS (данный индекс специально разработан для прогнозирования возникновения мезомасштабных конвективных систем) (рисунок 2.3).

$$MCS = \frac{MULI_{PBL,0-180} + 4.4}{3.3} + \frac{LLS_{0-255}}{5} + \frac{TA_{700} + 4.5 \times 10^{-5}}{7.3 \times 10^{-5}}.$$

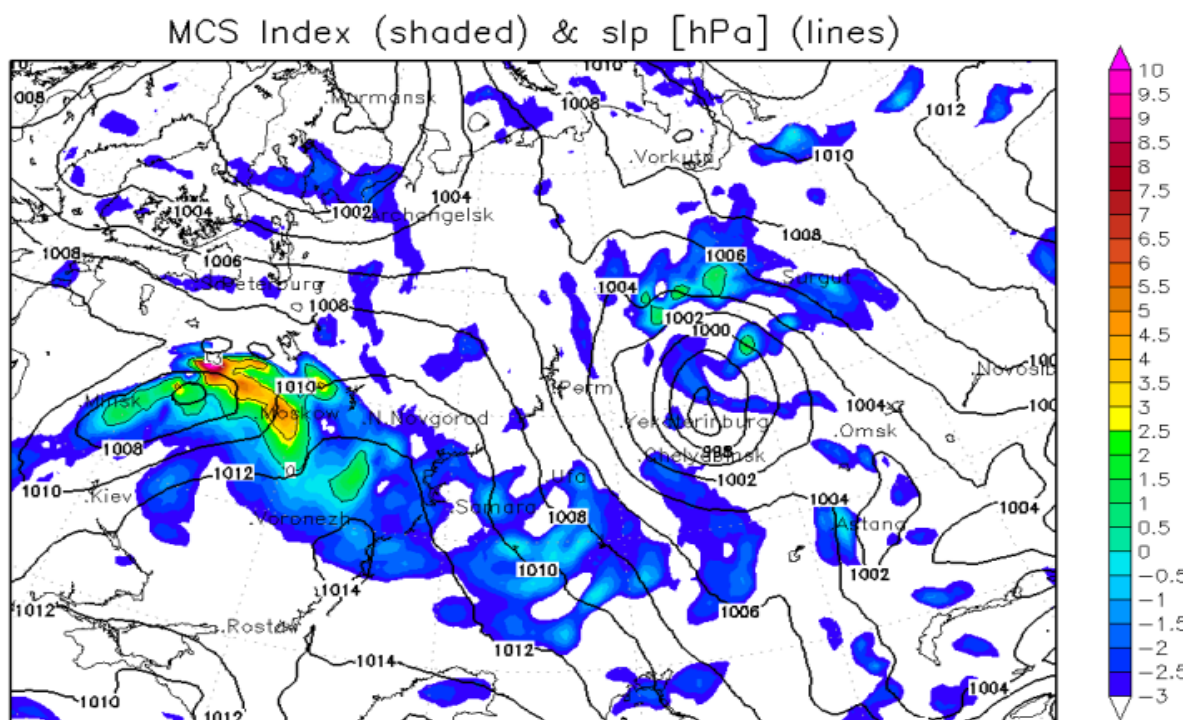


Рисунок 2.3 – индекс мезомасштабных конвективных систем MCS 13.07.2014 в 21.00 ВСВ по данным канадской модели GEM [2]

В течение дня мезомасштабный конвективный комплекс перемещался через территорию Беларуси, где вызвал сильные ливни, разрушительные шквалы, крупный град и смерч (наблюдался южнее г. Минск). Особенно интенсивный ливень и шквал наблюдались в районе аэропорта г. Минск, где максимальная дальность видимости снижалась до 50 м. Высота верхней границы облаков, по данным метеорологических радиолокаторов, повсеместно достигала 14 км.

Затем мезомасштабный конвективный комплекс сместился на Смоленскую область. Судя по данным метеорологических радиолокаторов, в это время его интенсивность несколько уменьшилась. Наиболее интенсивная конвекция, как это обычно бывает, наблюдалась на южном и юго-восточном

фланге комплекса. Именно здесь южнее г. Гагарин Смоленской области, около 21.00 по местному времени сформировалась конвективная ячейка, которая и вызвала смерч в Московской области. Высота верхней границы облачности в данной ячейке также превышала 14 км. Дополнительным признаком наличия мезоциклона в ней является отклонение направления ее движения вправо от ведущего потока. Вследствие этого, суперячейка далее сместилась на Москву, где вызвала сильный шквал с сильным ливнем и крупным градом. Если бы она перемещалась по потоку, то ее траектория прошла бы несколько севернее города. Судя по имеющимся фотографиям, это была суперячейка типа НР.

В момент, когда суперячейка достигла Москвы, она имела квазиокруглую форму с диаметром более 300 км и температурой верхней границы облаков до -60° и ниже.

Высота верхней границы облачности достигала 14 км, отмечался пробой тропопаузы. Москва оказалась в южной части суперячейки, где интенсивность осадков и скорость ветра была выше.

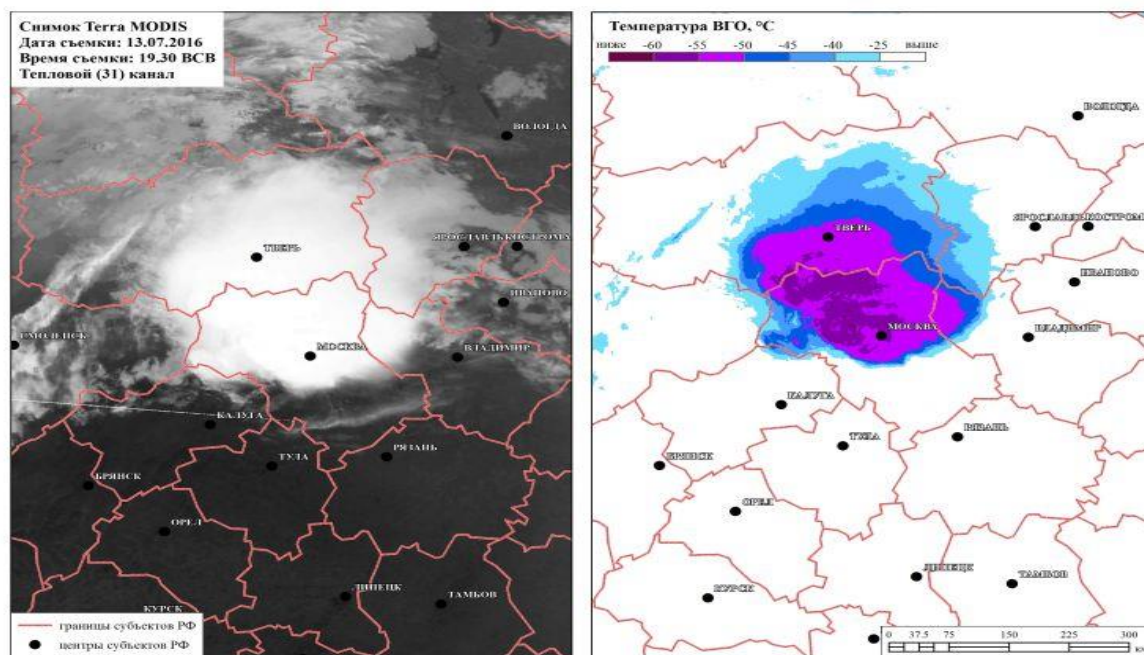


Рисунок 2.4 – Снимок Terra MODIS и температура верхней границы облаков за 19.30 ВСВ 13.07.2016 [2]

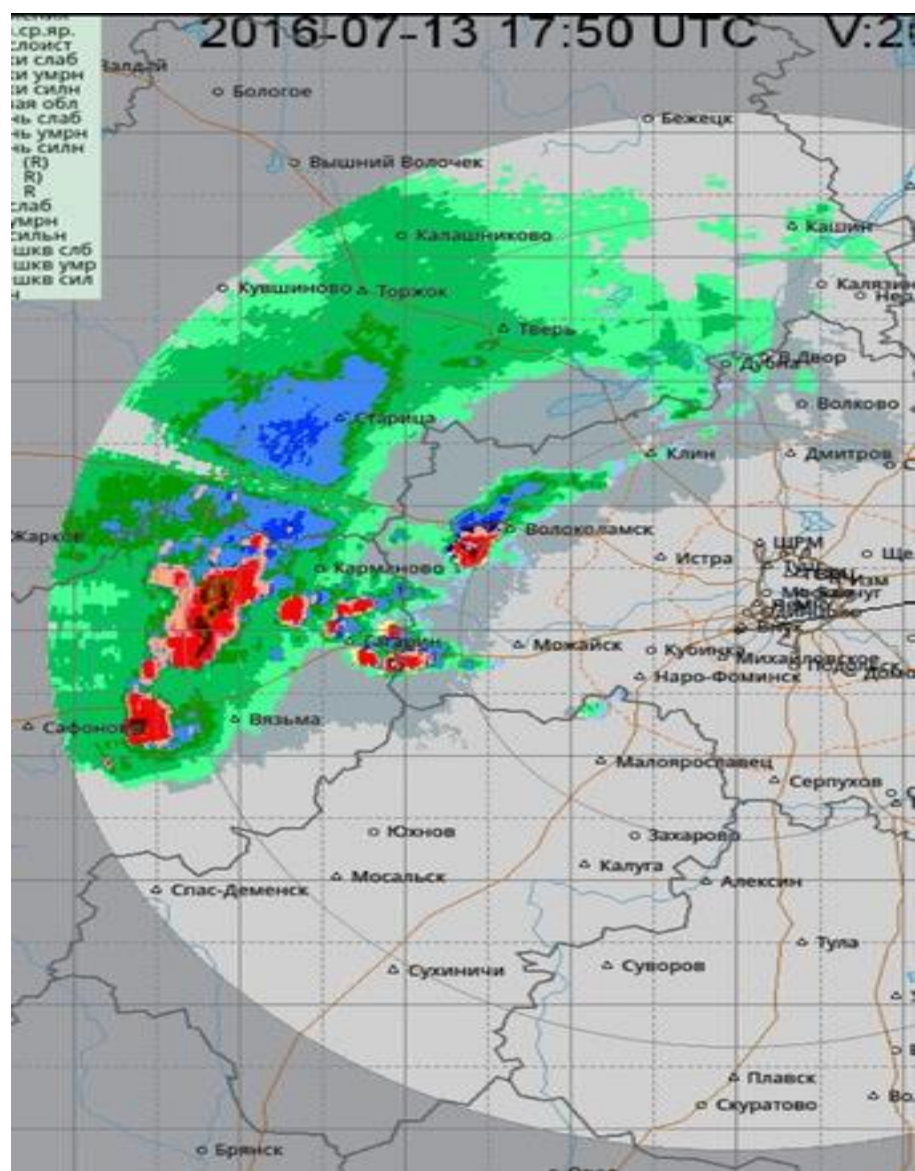


Рисунок 2.5 – Данные радара за 20:50 по местному времени 13.07.2016

[3]

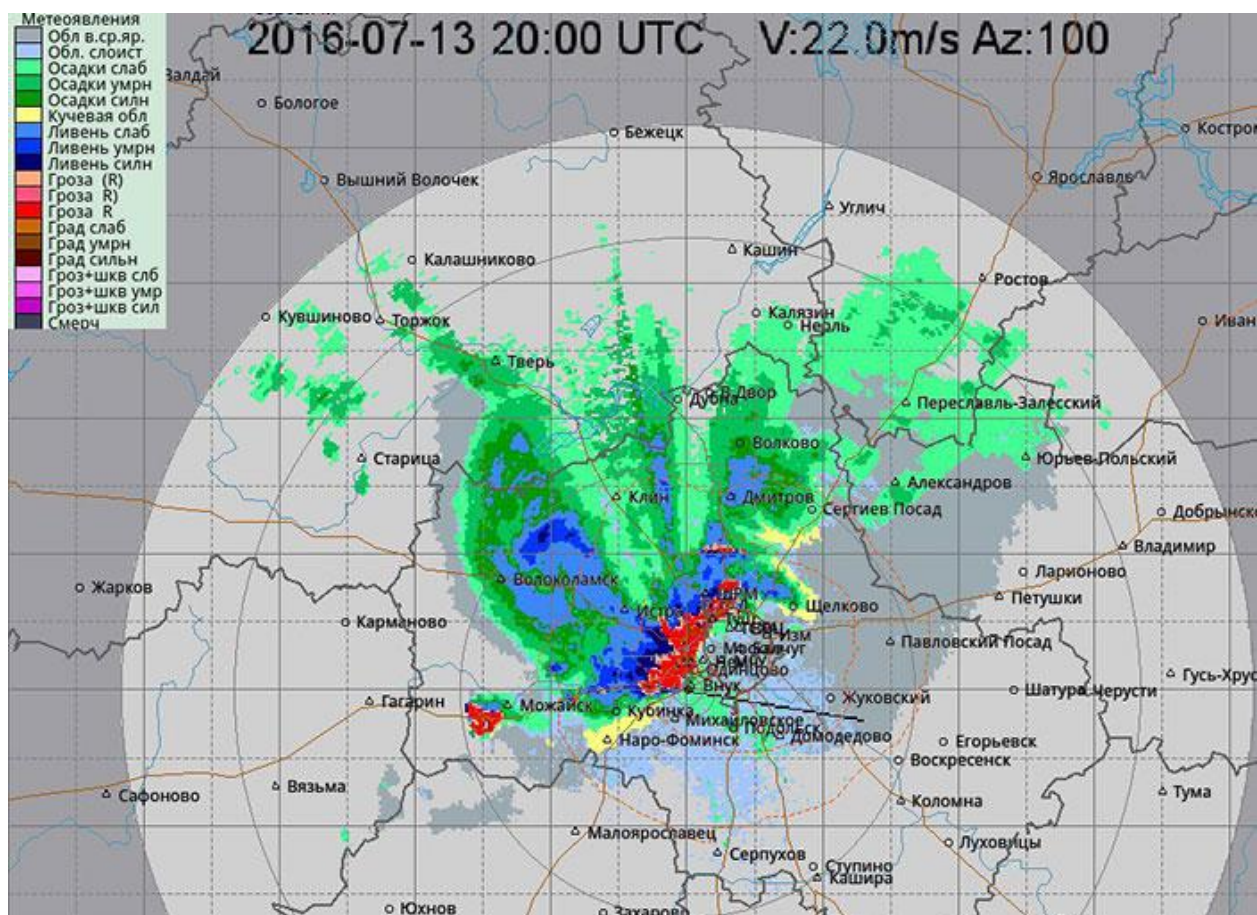


Рисунок 2.6 – Данные радара за 23:00 мск 13.07.2016 [3]

Комплекс неблагоприятных и опасных явлений, который в основном встречается летом, на обширной территории Московского региона носил крайне неоднородный характер. За одну ночь, прошли все опасные и неблагоприятные явления летнего сезона. Передвигаясь с одной области на другую, далее в Москве можно было увидеть частые зарницы и грозу с очень высокой электрической активностью что предвещало о приближении опасного явления.

Молнии – плоские и линейные – били без перерыва. Жители Московской области были напуганы сильным ветром, ливнем тропического характера, довольно сильным градом (до 5 см в диаметре). А по области пронесли как минимум три торнадо категории от EF2 до EF4, что для средней полосы России является редкостью.

В Москве – и то не везде прошли дожди. Кое-где их и вовсе не наблюдалось, а где-то выпало от трети до половины месячной нормы осадков июля.

Интенсивность выпадения осадков достигала (в пике) 122 мм/час, что характерно для тропического ливня. Скорость ветра – 18,2 м/с в порыве.

Траектория смерча, прошедшего через Можайский, и Рузский районы Московской области, устанавливалась на основе сравнения безоблачных спутниковых снимков LANDSAT (США). Поскольку смерч прошел через территорию, более чем на 50% покрытую лесом, то его траектория надежно определяется на основе данных о вызванных смерчем ветровалах. Для выявления ветровалов в данном случае было достаточно сравнения яркостей в шестом (среднем инфракрасном) канале снимка. Они достаточно надежно отделяются от вырубок, поскольку последние имеют правильные геометрические формы (рисунок 2.5) .

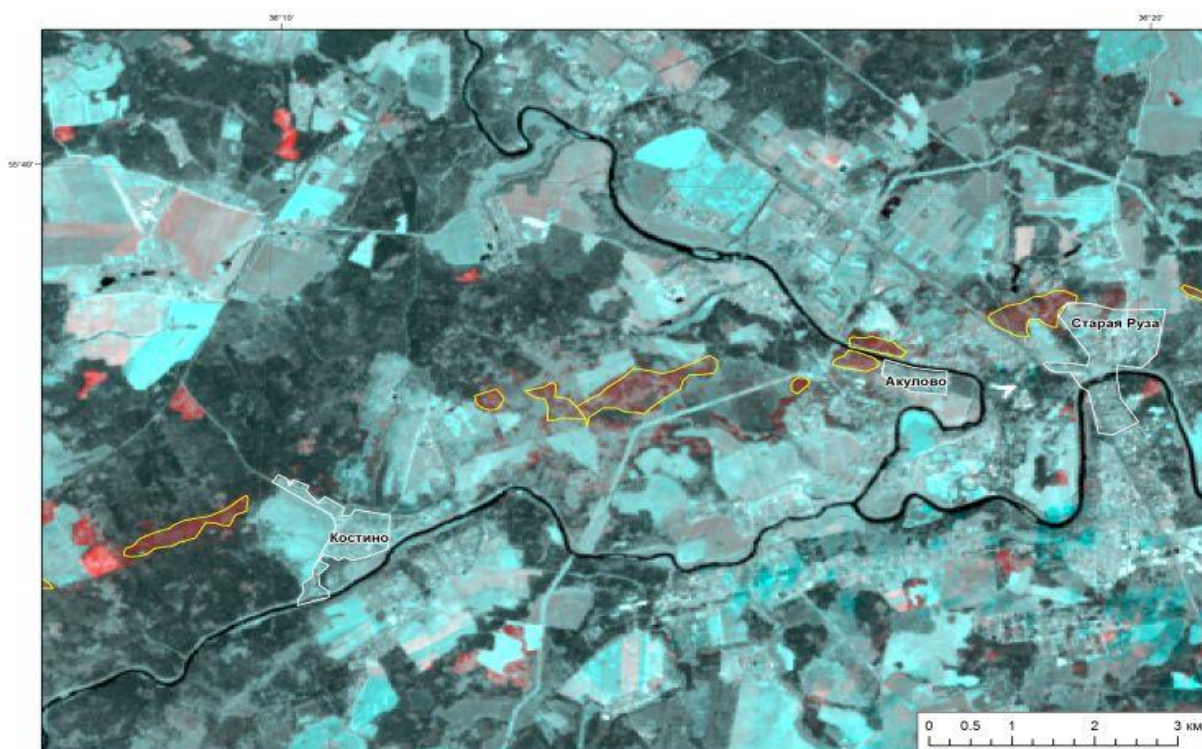


Рисунок 2.5 – Выявление ветровала. Область повреждения лесного покрова отображается в оттенках красного цвета канал 6 — ближний ИК (Short Wavelength Infrared, SWIR 2), длина волн – 1,560—1,660 мкм [2]

Ранее на основе информации, полученной от очевидцев явления и его последствий, уже было известно, что смерч возник неподалеку от Можайского водохранилища, прошел через населенные пункты Прудня, Ратчино, Пуршево, Старая Руза и Колюбакино, и разрушился, не доходя до г. Звенигород. По снимку трек был изучен более подробно.



Рисунок 2.6 – Трек смерча, прошедшего вечером 13.07.2016, через Можайский и Рузский районы Московской области [2]

Общая протяженность пути смерча составляет 49 км, максимальная ширина пути 570 м. Среднюю ширину определить сложнее, так как около половины пути смерч шел по нелесным землям. Общая площадь вызванного смерчем ветровала превышает 400 га. Смерч сформировался, по всей видимости, над Можайским водохранилищем или на его берегу, где появляются первые ветровалы. Первые километры пути смерч был

достаточно узким (200 м и менее). Однако его интенсивность в деревне Прудня оказалась достаточной, чтобы до основания разрушить около 10 домов. Некоторые дома были сорваны с фундамента.

Следующим населенным пунктом, пострадавшим от смерча, стала деревня Пуршево. За ней смерч прошел через участки смешанного леса, вызвав масштабный ветровал. Ширина ветровала между населенными пунктами Пуршево, Костино, Акулово и Старая Руза достигает 300 – 570 м. В завершении пути смерч прошел через поселок Колюбакино, где вызвал наиболее масштабные разрушения. По предварительным данным, ущерб от смерча в пос. Колюбакино составляет 150 млн. руб. Интенсивность смерча в поселке определить сложно: наряду с незначительно пострадавшими участками (где были только повреждены кровли на дачных домах), есть участки с очень сильными разрушениями. Несколько домов восточнее поселка были полностью уничтожены, также смерч перенес на некоторое расстояние грузовой автомобиль.

Смерч, прошедший через Можайский и Рузский районы, стал, по всей видимости, одним из самых сильных в России за последние годы. По протяженности, ширине пути и масштабу нанесенного ущерба он сопоставим со смерчем, наблюдавшимся 29 августа 2014 г. на севере Башкирии. В результате того смерча погибли 2 человека, 76 человек получили травмы, не менее 80 домов были полностью разрушены, уничтожено более 140 га леса, материальный ущерб составил 600 млн. руб. в ценах 2014 г. Длина пути башкирского смерча 29.08.2014 г. составила около 50 км, а ширина полосы разрушений также достигала 500 м. Смерчи с длиной пути 50 км и более наблюдались также в 2001 г. в Костромской области (Нейский, Кологривский и Мантуровский районы), 07.06.2009 г. в Пермском крае (Гайнский район), 07-08.08.2012 г. в Ленинградской области (Бокситогорский район), 17-18.06.2013 г. в Кировской области (Нагорский район). Крайне интересно отметить, что два последних смерча в этом списке также наблюдались ночью.

Что же касается Московской области, то здесь смерч стал одним из самых сильных за всю историю наблюдений. До этого, смерчи в Московской области наблюдались в 1984 г. в районе аэропорта Шереметьево (длина пути смерча составила 13 км, а ширина до 500 м), в 2007 г. в Красногорске, 03.06.2009 г. в Краснозаводске, а также в мае 2013 г. в Наро-Фоминском районе. Краснозаводский смерч 03.06.2009 г. достигал третьей категории интенсивности по шкале Фуджиты, но существовал всего 5 минут. В сравнении с ним, смерч возникший вечером 13 июля, отличался значительно большей длиной и шириной полосы разрушений, однако их интенсивность сопоставить сложно [2].

Прогноз шторма от Европейский эксперимента по прогнозированию штормов

Действителен: с 06:00 13 июля 2016 г. по 06:00 UTC 14 июля 2016 г.

Выпущено: Вт, 12 июля 2016, 21:52

Синоптик: PUCIK

Беларусь, запад России.

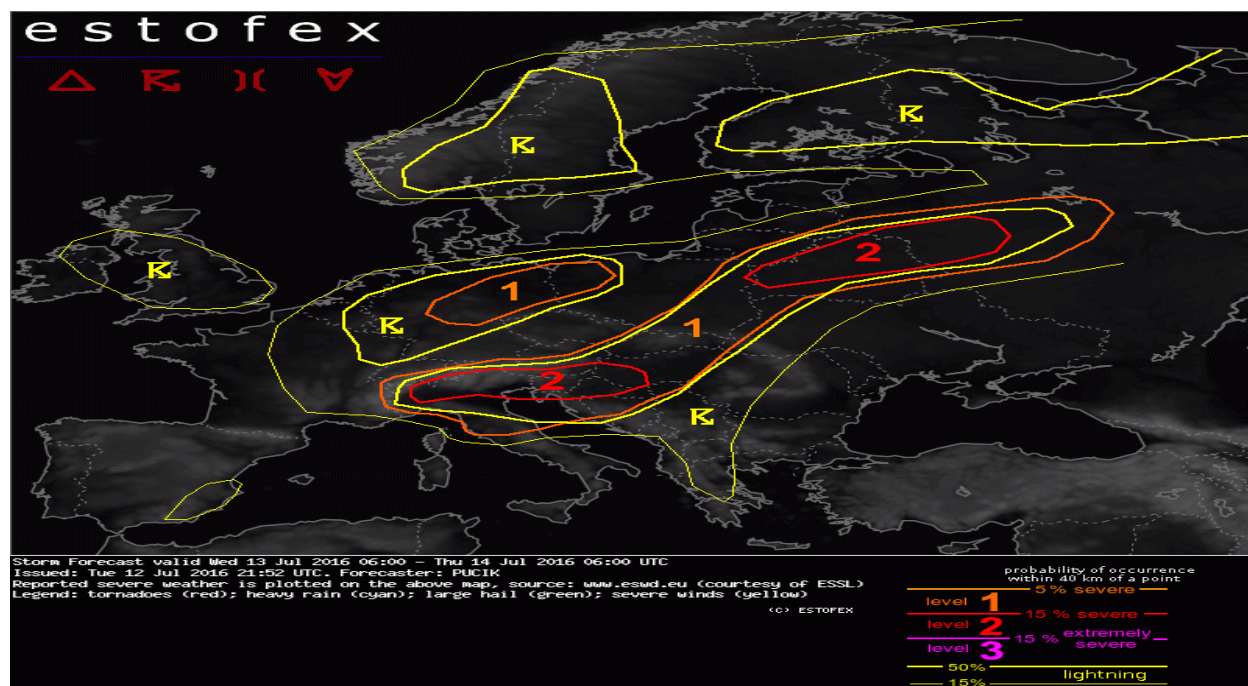


Рисунок 2.7 – прогноз опасных явления из сайта «Европейский эксперимент по прогнозированию штормов» ESTOFEX

Все гидродинамические модели атмосферы согласовано дали прогноз перемещения комплекса от восточной Польши на запад территории России.

Прогнозировался сильный режим вертикальных потоков вдоль теплого фронта, что будет способствовать созданию длинных и изогнутых годографов с высокими значениями относительной спиральности, локально значительно превышающими $300 \text{ м}^2/\text{с}^2$.

Также модели показывали увеличивающийся к 18 UTC сдвиг ветра на нижних уровнях в атмосфере и скорость ветра на изобарической уровне 850 гПа до 20 м/с к югу от теплого фронта.

Вдоль и к югу от тёплого фронта прогнозировались умеренные значения индекса CAPE – около 1000 Дж/кг.

Комбинация этих факторов создаёт среду, поддерживающую сильные суперячейки, способные генерировать сильный град, сильные порывы ветра и сильные торнадо.

Конвективный режим оценивался, как неопределенный, поскольку большинство штормов формируются и группируются к северу от теплого фронта с основной угрозой сильных порывов ветра.

Более низкая уверенность присутствовала в прогнозах в отношении развития конвективных явлений к югу и/или вдоль теплого фронта, что было связано с довольно узкой полосой более высоких значений CAPE, которая исключала конвективные явления.

3 МОДЕЛИРОВАНИЕ СУПЕРЯЧЕЙКИ С ПОМОЩЬЮ WRF-ARW

Для исследования, описанной в главе 2 суперячейки, использовалась мезомасштабная гидродинамическая модель WRF, которую широко используют для исследований, а также для оперативной практики. В данном исследовании используется динамическое ядро Advanced Research WRF (ARW).

В исследовании была использована первая часть программного блока – WRF Preprocessing System (WPS) – которая занимается предварительной обработкой (подготовкой), приведением данных к нужному формату. В работе были использованы WPS который состоит из трех блоков:

- Geogrid – происходит определение размеров рабочих областей, интерполяция географических и статических данных в узлы сетки;
- Ungrib – происходит извлечение метеорологических данных из формата GRIB (GRIB2);
- Metgrid – происходит интерполяция извлеченных метеорологических полей в заданную сетку;
- Модель позволяет проводить расчеты с реальными данными – за что отвечает блок Real.

Данный блок инициализирует начальные данные, производит вертикальную интерполяцию, «заготавливает» граничные условия для материнской сетки на срок прогноза.

Далее следует собственно динамическое ядро модели – ARW, осуществляющее все вычисления и подключающее указанные на входе необходимые параметры.

После успешного выполнения программы динамического ядра формировались выходные файлы, которые были визуализированы при помощи ARWpost и программы, разработанной в лаборатории по атмосферному моделированию кафедры метеорологических прогнозов. Для визуализации результатов использовался программный комплект обработки и визуализации сеточных данных GrADS.

В первом цикле численных экспериментов для моделирования была выбрана область, находящаяся в пределах 52.5° - 57.5° с. ш., 34.5° - 39.5° в. д., момент в которой, когда суперячейка достигла Москвы и имела квазиокруглую форму. Шаг по времени составил 20 секунд, а шаг по пространству 3км (рисунок 3.1).

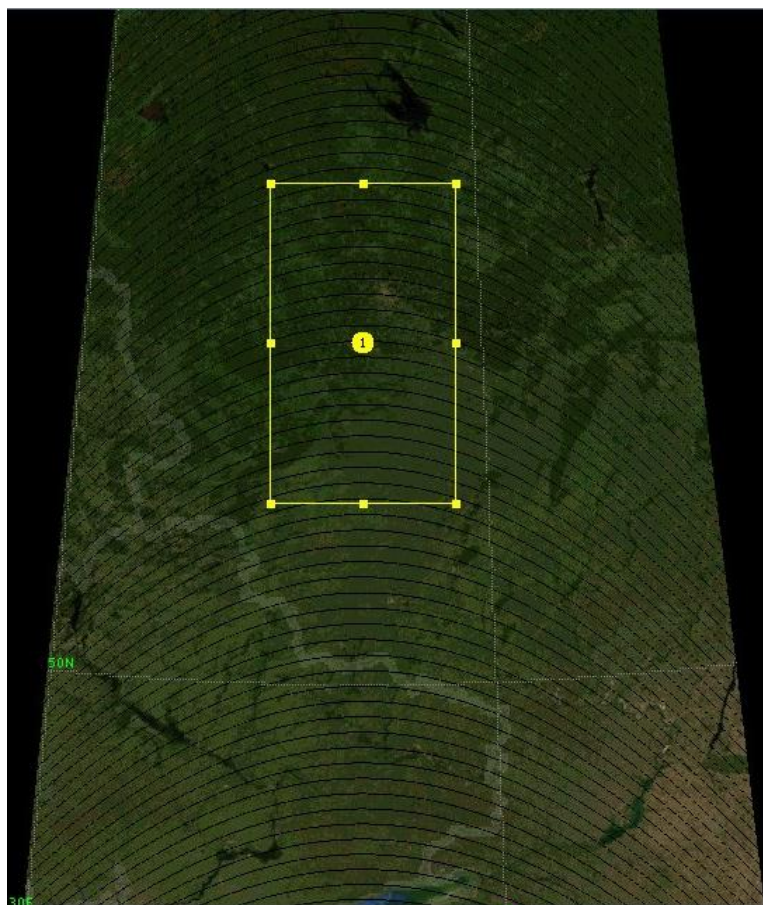


Рисунок 3.1 – Область моделирования, использованная в численных экспериментах

На втором этапе исследований для более точного и детального моделирования были использованы вложенные сетки, где выбрана область, находящаяся в таких же пределах, как и в первом случае, но шаги по времени составили 30 секунд, 10 секунд и 3,3 секунды, а шаги по пространству 5 км, 1666 м и 555 м (рисунок 3.2).

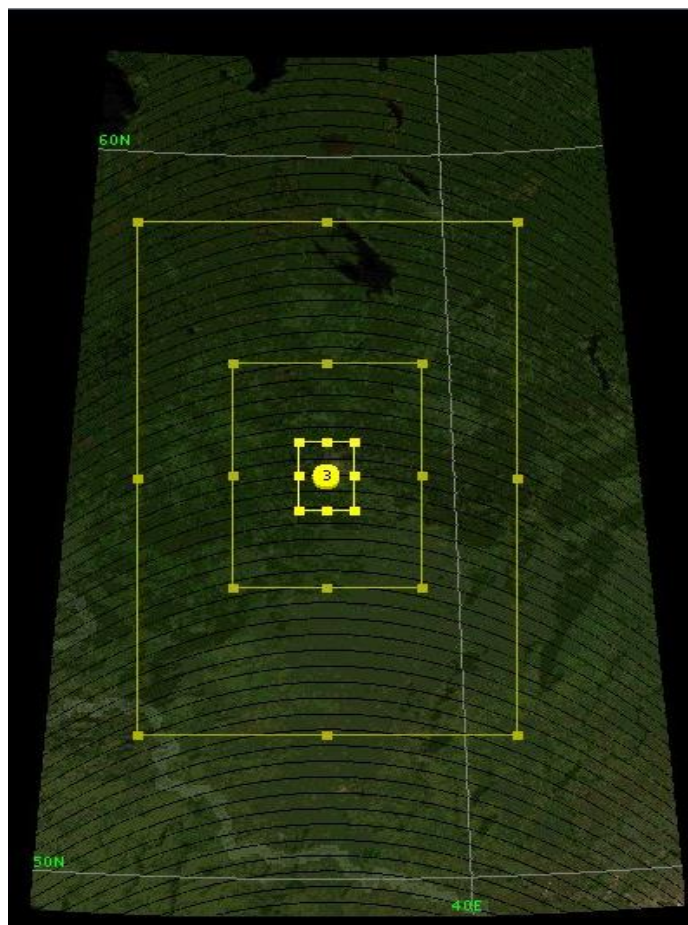


Рисунок 3.2 – Область, использованная при моделировании

В исследовании использовались начальные данные, которые были получены из архива данных исследований, Национального центра атмосферных исследований в Боулдере, штат Колорадо (NCAR):

Также проводились численные эксперименты с разным разрешением начальных данных. Использовались

- Данные анализа модели GFS с шагом сетки $2,5^\circ$ за период с 13 июля 2016 года по 14 июля 2016 года для моделирования суперячейки;

- Данные анализа модели GFS с шагом сетки $0,25^\circ$ за период с 13 июля 2016 года по 14 июля 2016 года для моделирования суперячейки.

В исследовании изучалось пространственно-временное распределение следующих метеорологических величин:

- массовая доля водяного пара на уровне 2 метра;
- температура воздуха на уровне 2 метра;
- скорость и направление ветра на высоте 10 метров;
- количество осадков;
- давление на уровне моря.

Ниже показаны результаты моделирования, полученные по начальным данным модели GFS с шагом сетки $2,5^\circ$ и $0,25^\circ$ (рисунок 3.1), а также областью с вложенной тройной сеткой с шагом сетки $0,25^\circ$, шаг по пространству 555м (рисунок 3.2). Полученные поля метеорологических величин представлены за 20:00 по UTC, так как именно этот момент времени наблюдалось значительное изменение метеорологических параметров в выбранной области исследования.

3.1 Результаты численных экспериментов с одной сеточной областью начальными условиями с разрешением сетки $0,25^\circ$

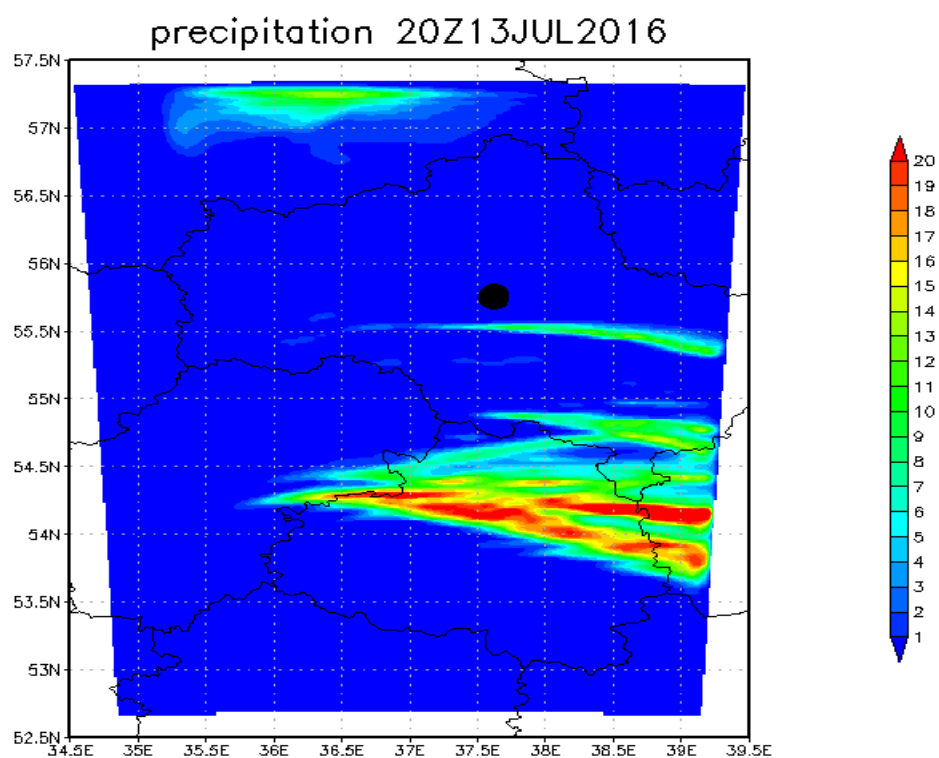


Рисунок 3.1 – Количество осадков, мм

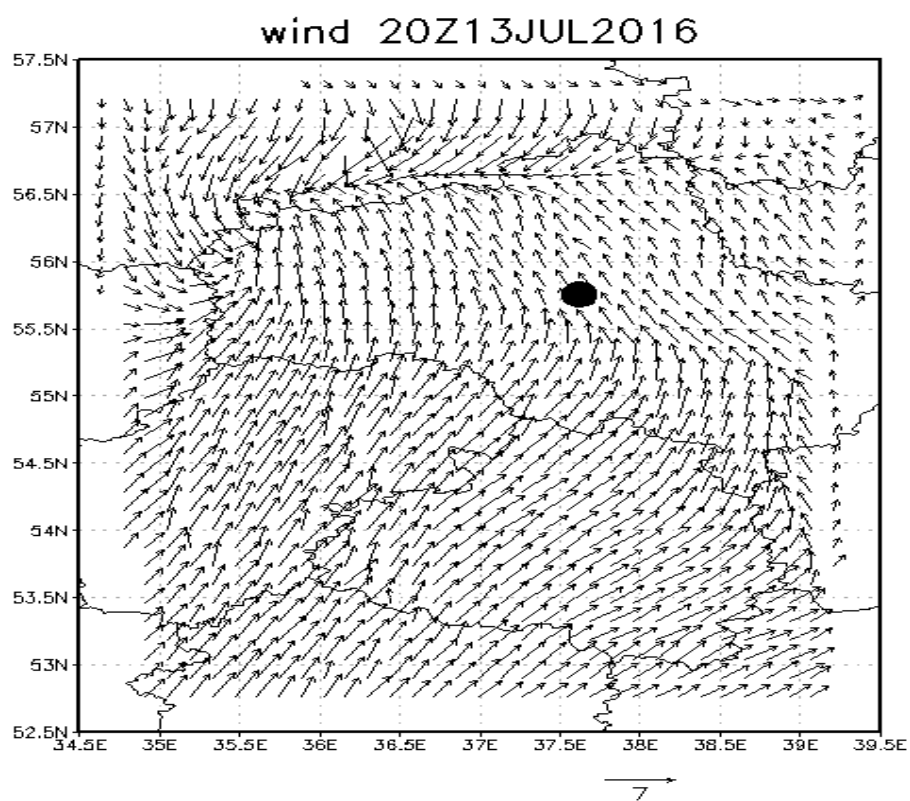


Рисунок 3.2 – Скорость и направление ветра, м/с

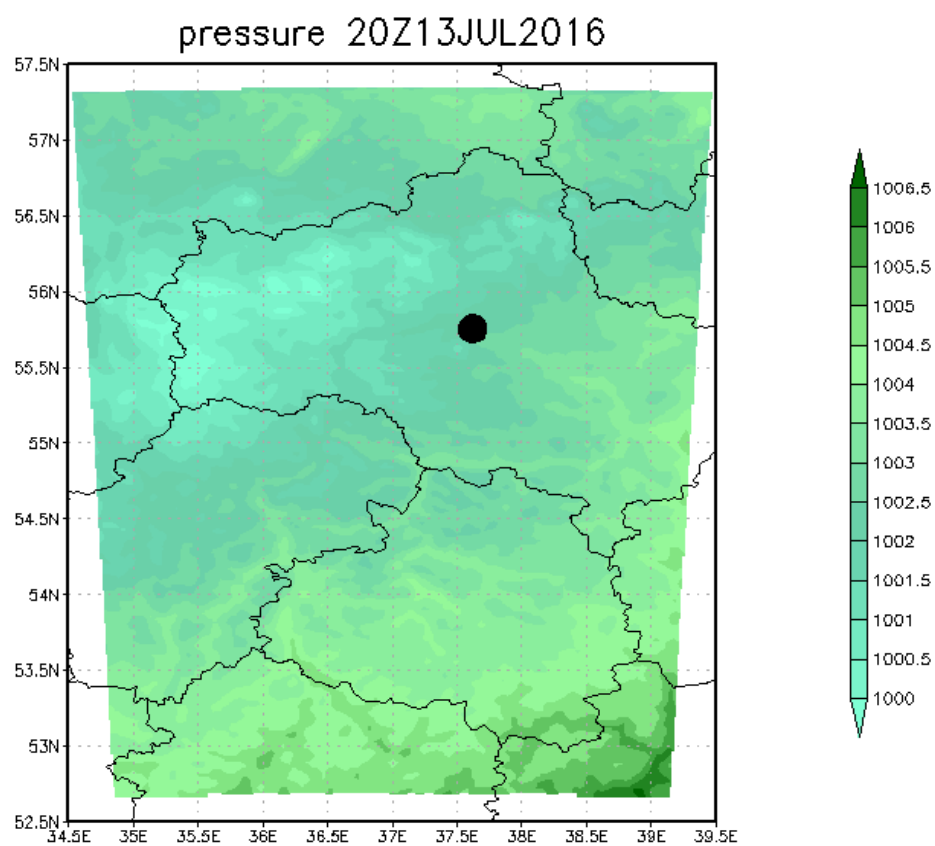


Рисунок 3.3 – Атмосферное давление, гПа

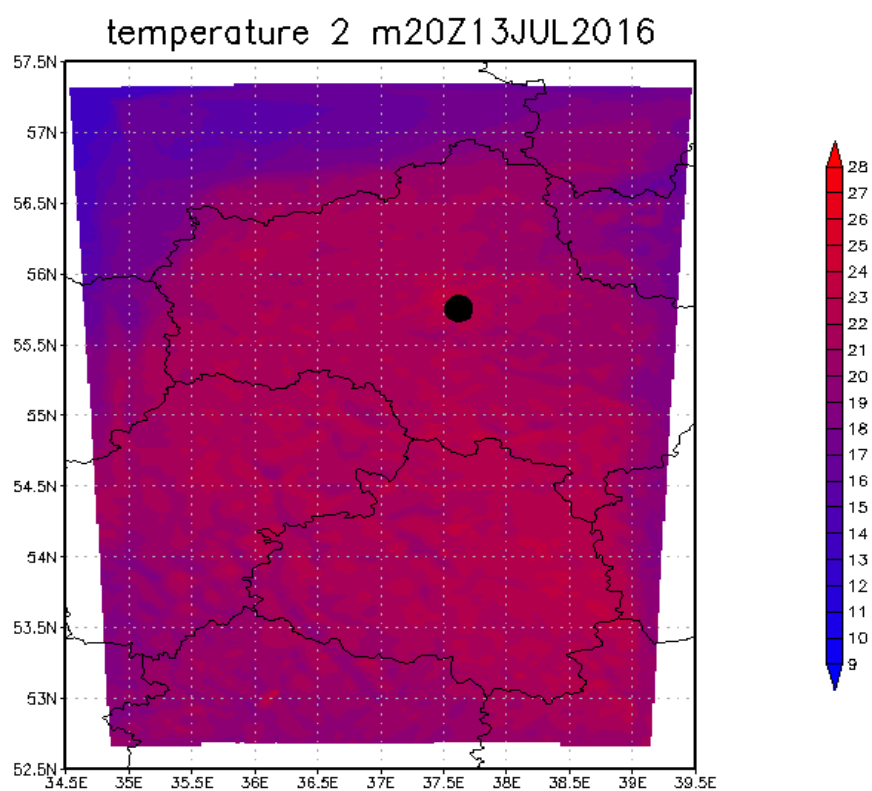


Рисунок 3.4 – Температура, °C

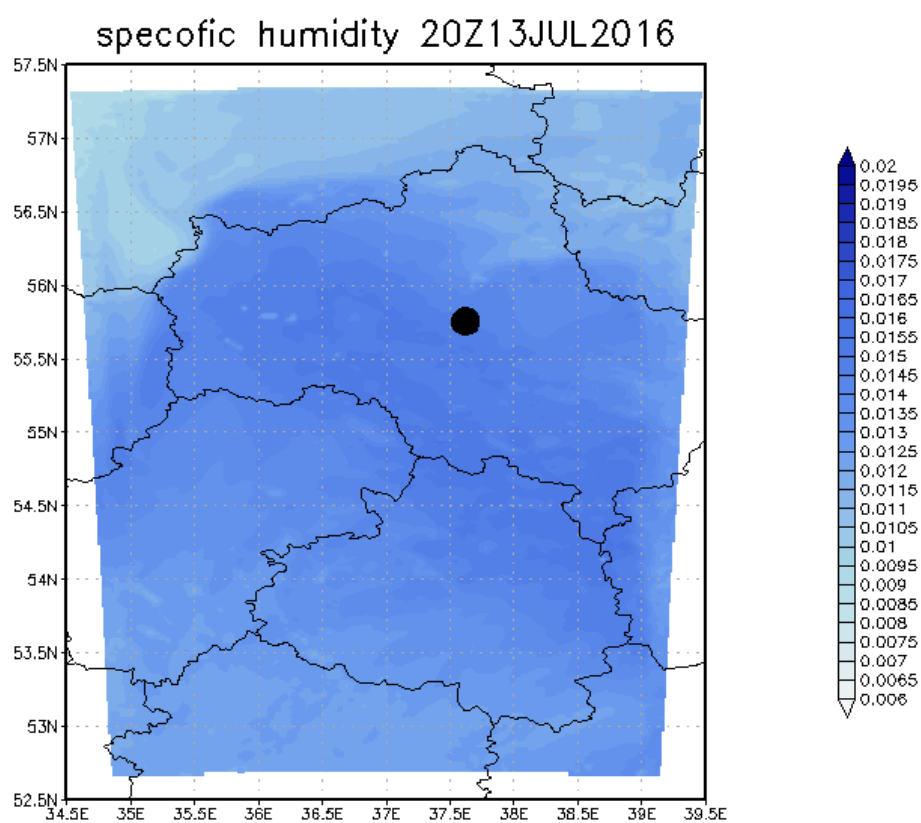


Рисунок 3.5 – Массовая доля водяного пара, ‰

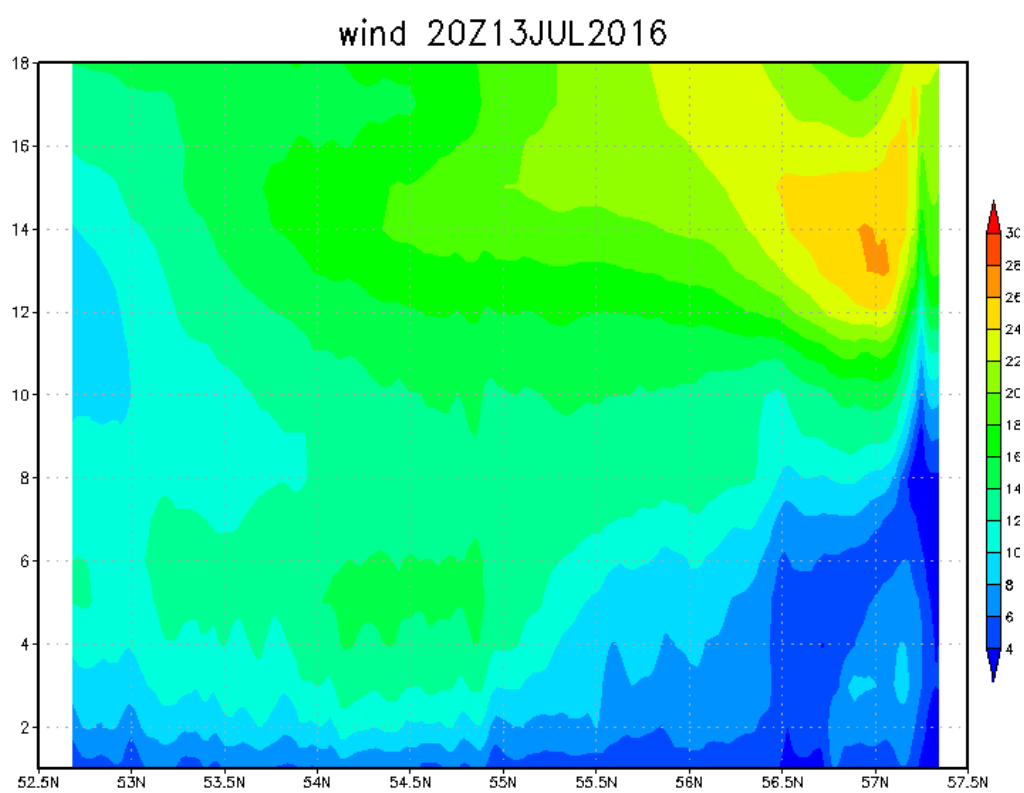


Рисунок 3.6 – Вертикальный разрез ветра по долготе, м/с

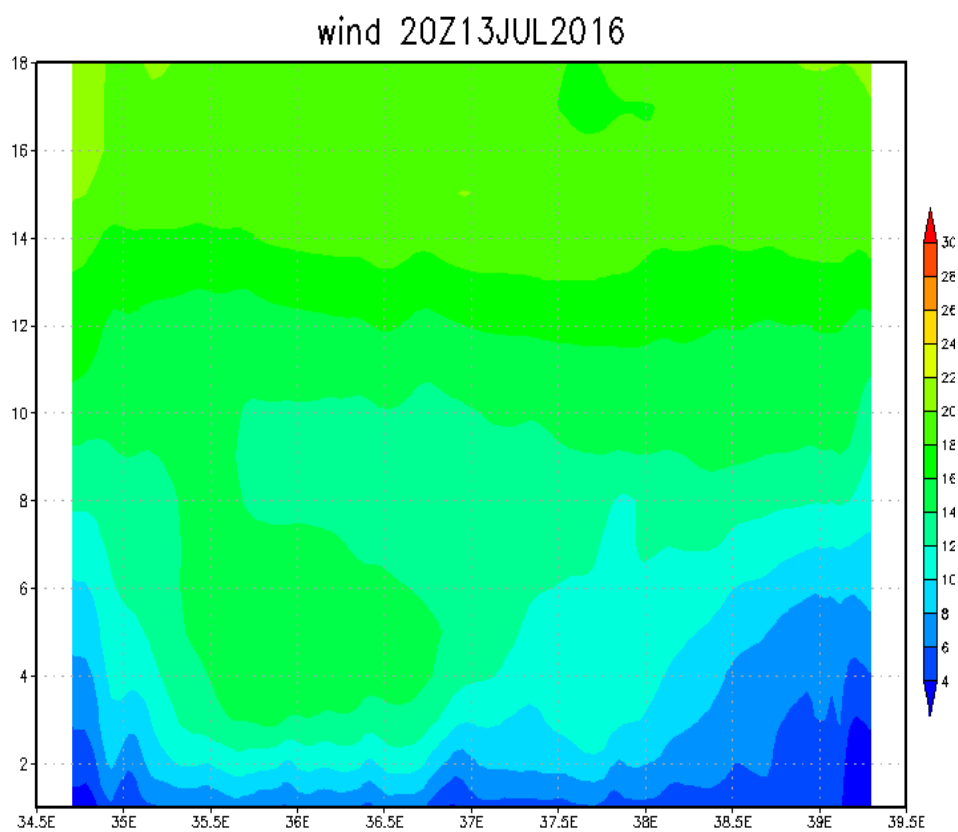


Рисунок 3.7 – Вертикальный разрез ветра по широте, м/с

Как видно из приведенных полей осадков и скорости ветра модель с начальными условиями с разрешением сетки $0,25^\circ$ показывает наличие очагов осадков, но они не развиваются и не соответствуют фактическим полям.

3.2 Результаты численных экспериментов с одной сеточной областью и начальными условиями с шагом сетки 2.5°

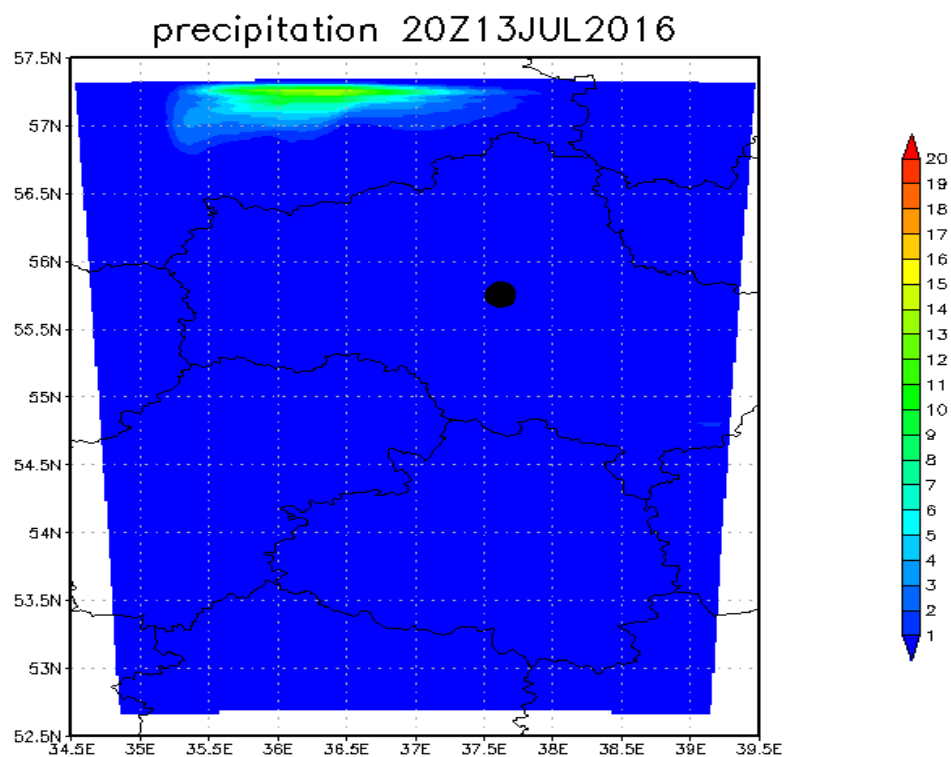


Рисунок 3.1 – Количество осадков, мм

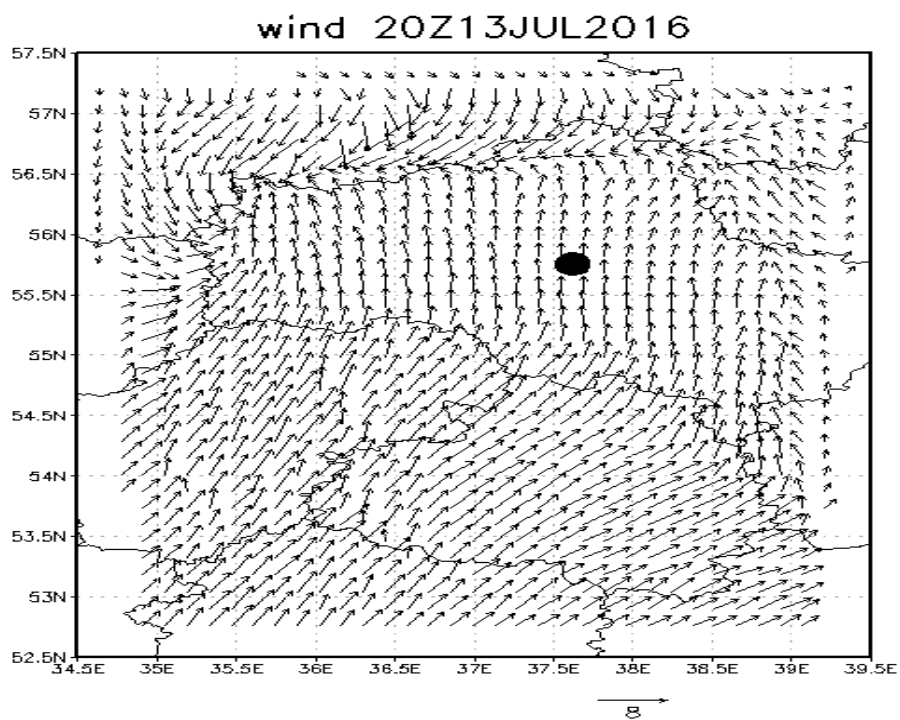


Рисунок 3.2 – Скорость и направление ветра, м/с

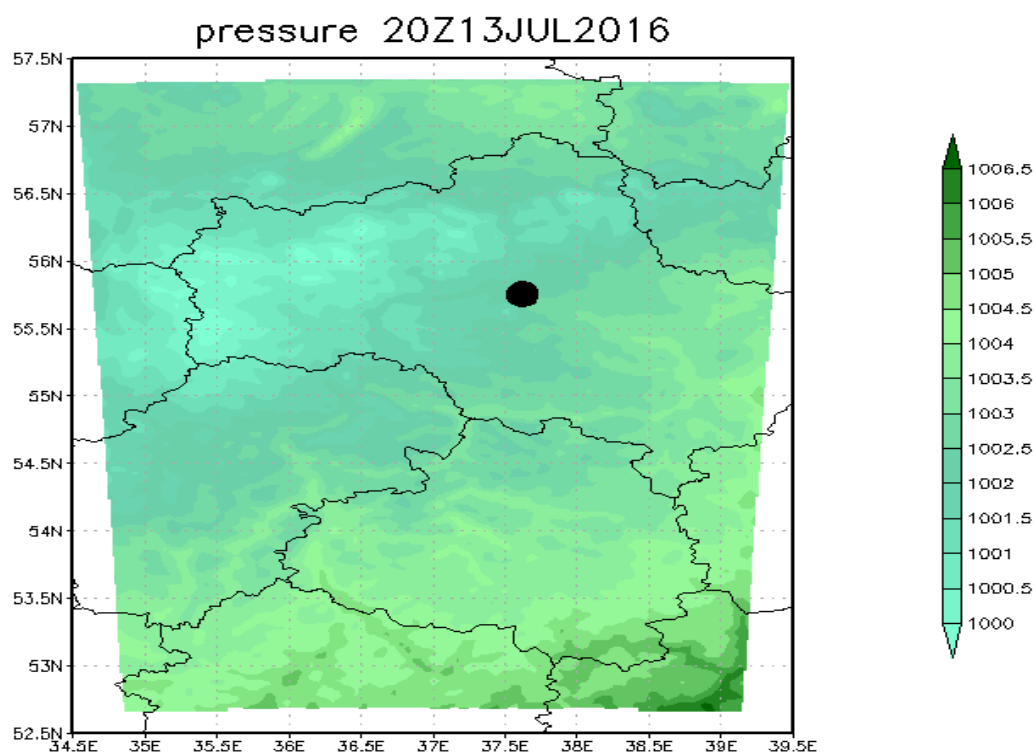


Рисунок 3.3 – Атмосферное давление, гПа

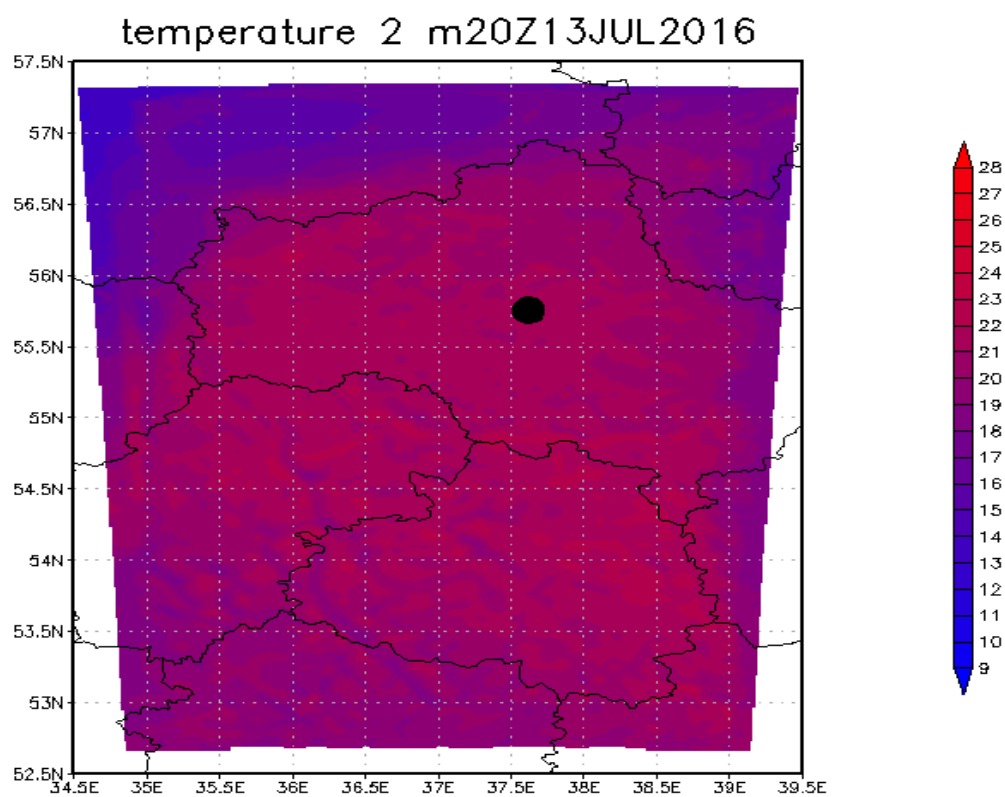


Рисунок 3.4 – Температура, °C

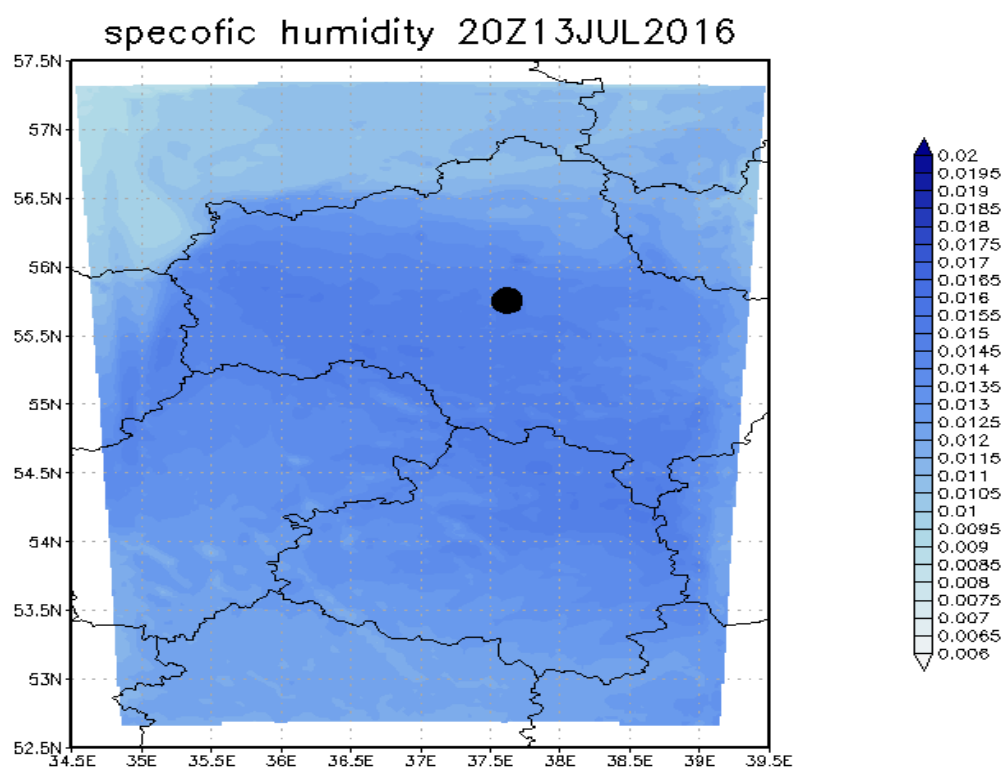


Рисунок 3.5 – Массовая доля водяного пара, ‰

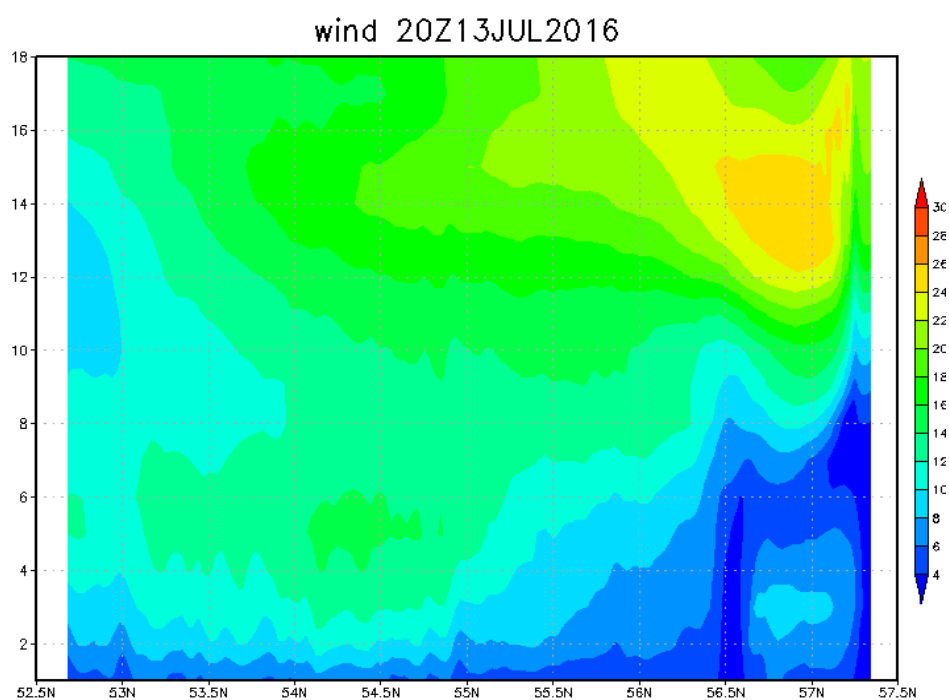


Рисунок 3.6 – Вертикальный разрез ветра по долготе, м/с

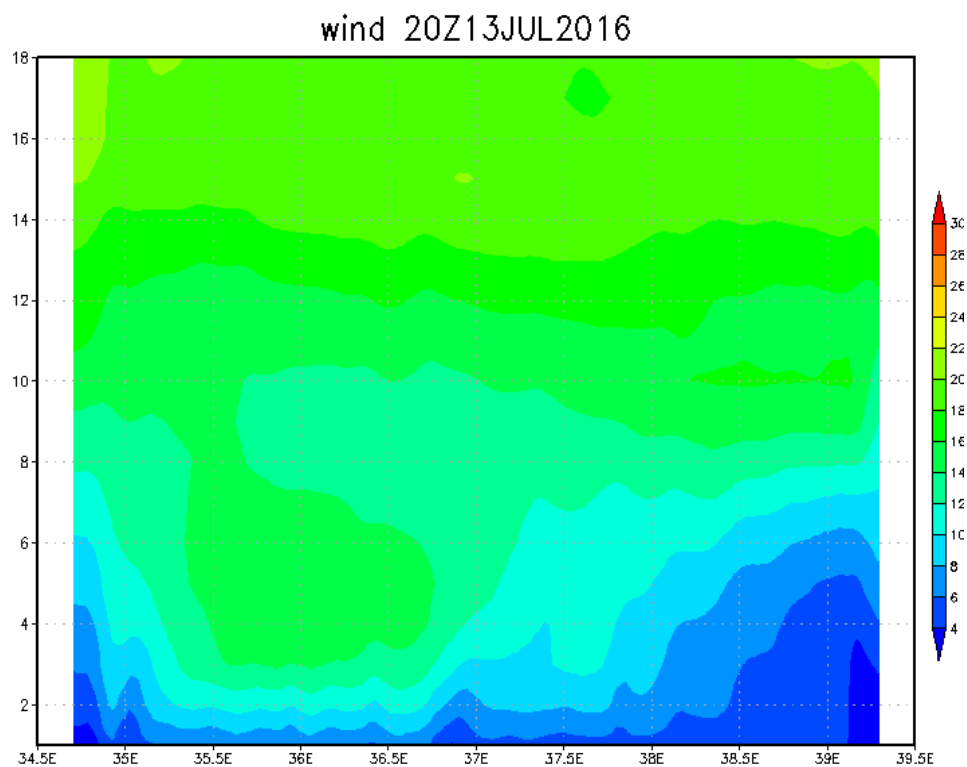


Рисунок 3.7 – Вертикальный разрез ветра по широте, м/с

Исходя из полученных результатов с начальными условиями с разрешением сетки $2,5^\circ$ видно что, на приведенных полях осадков и скорости ветра модель не воспроизводит суперячейку

3.3. Результаты численных экспериментов с вложенными сетками

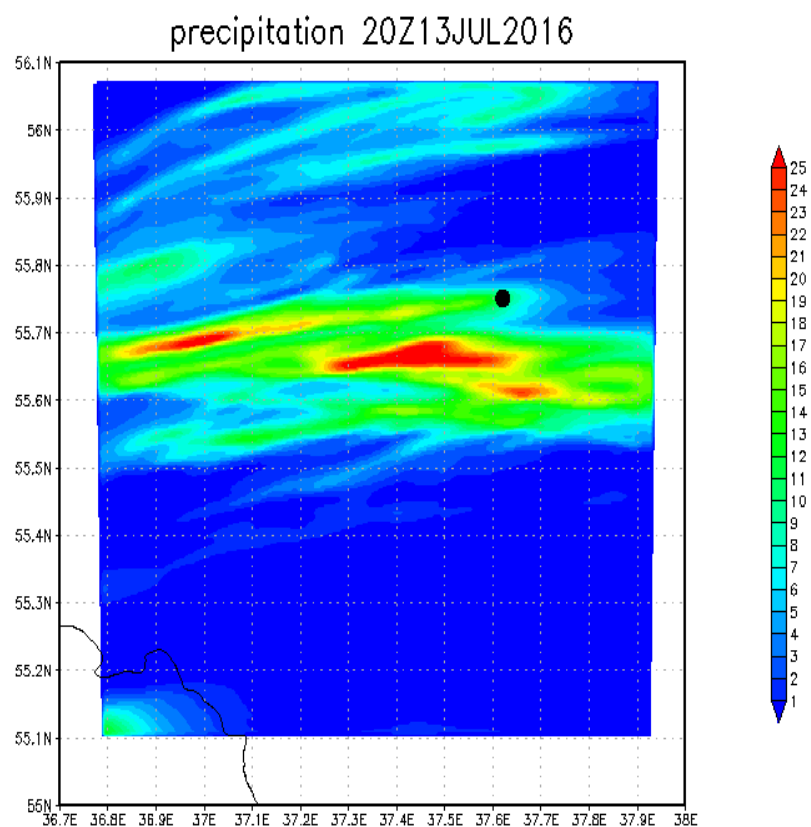


Рисунок 3.1 – Количество осадков, мм

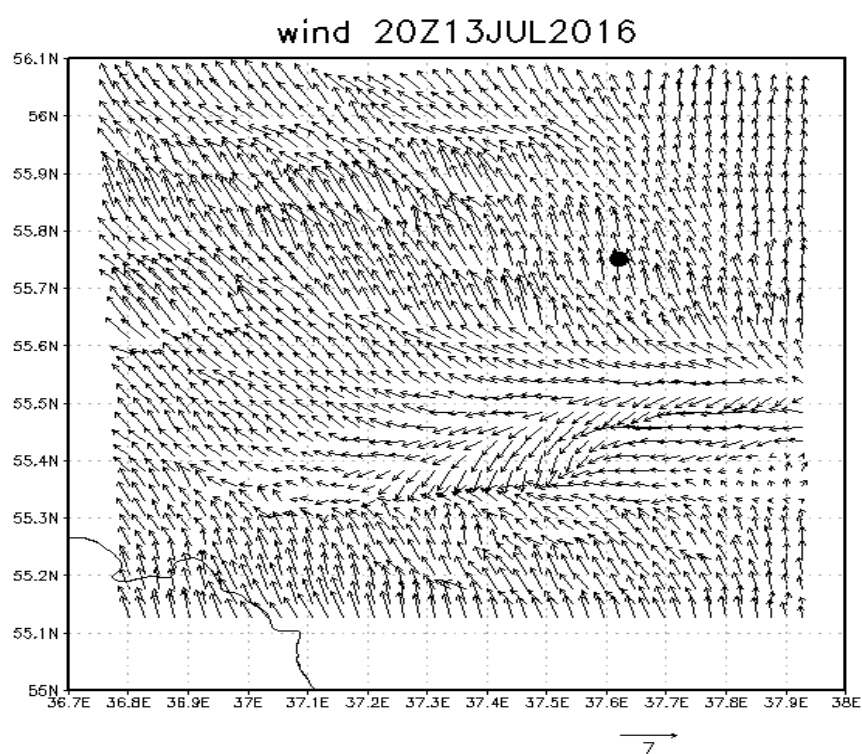


Рисунок 3.2 – Скорость и направление ветра, м/с

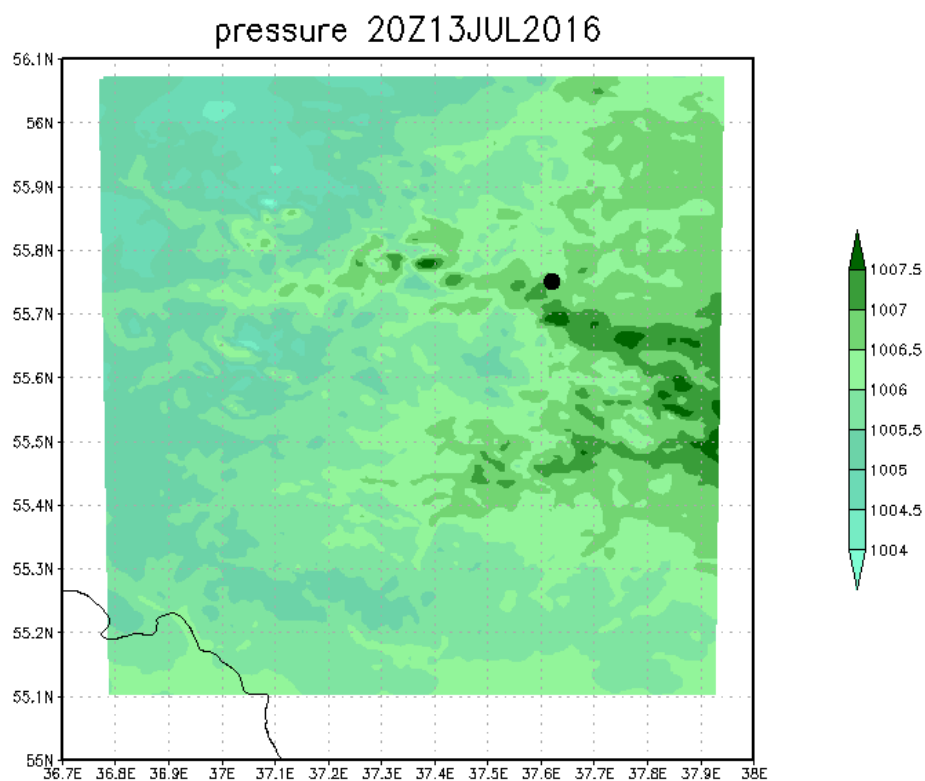


Рисунок 3.3 – Атмосферное давление, гПа

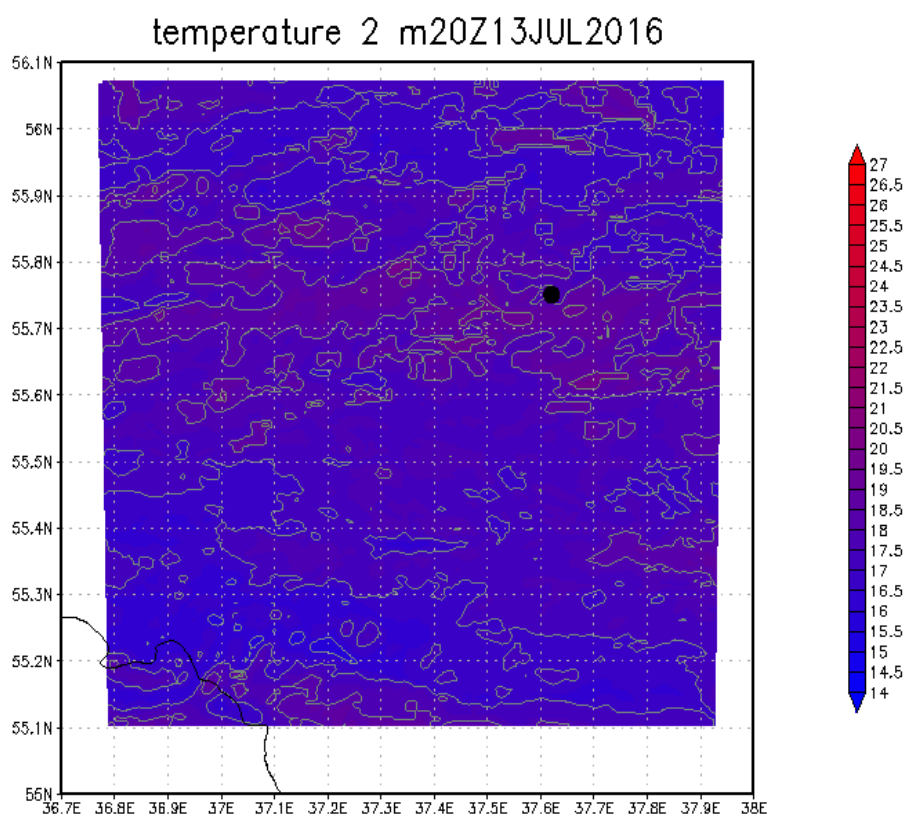


Рисунок 3.4 – Температура, °C

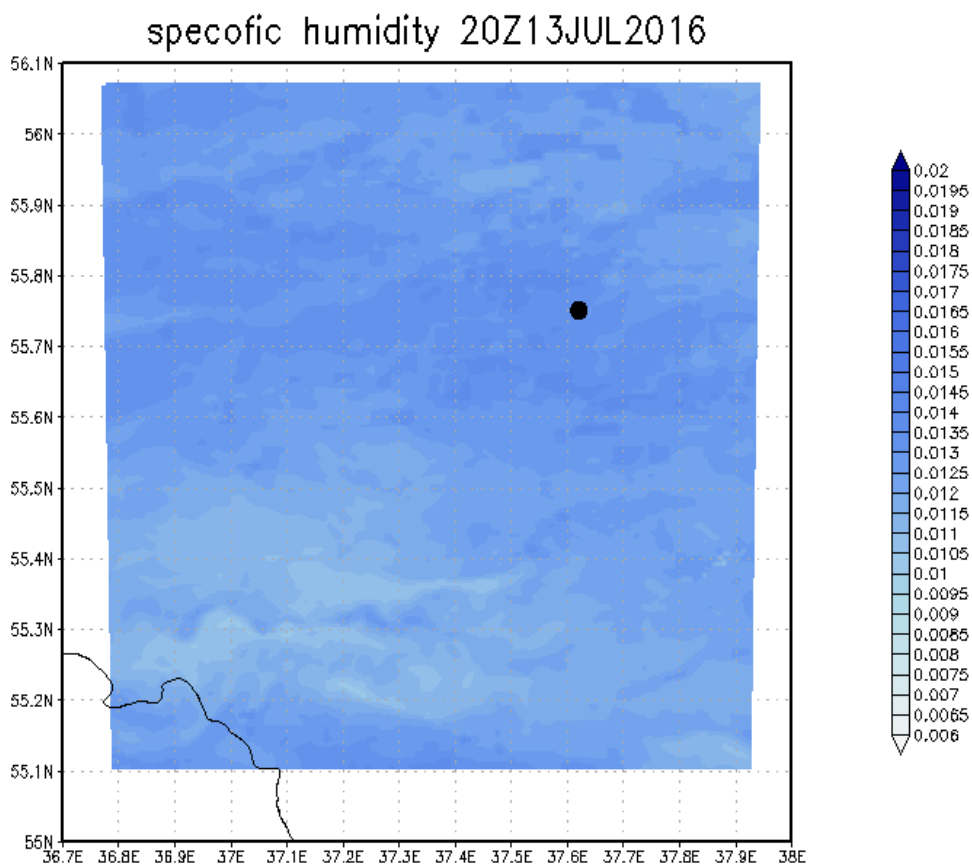


Рисунок 3.5 – Массовая доля водяного пара, ‰

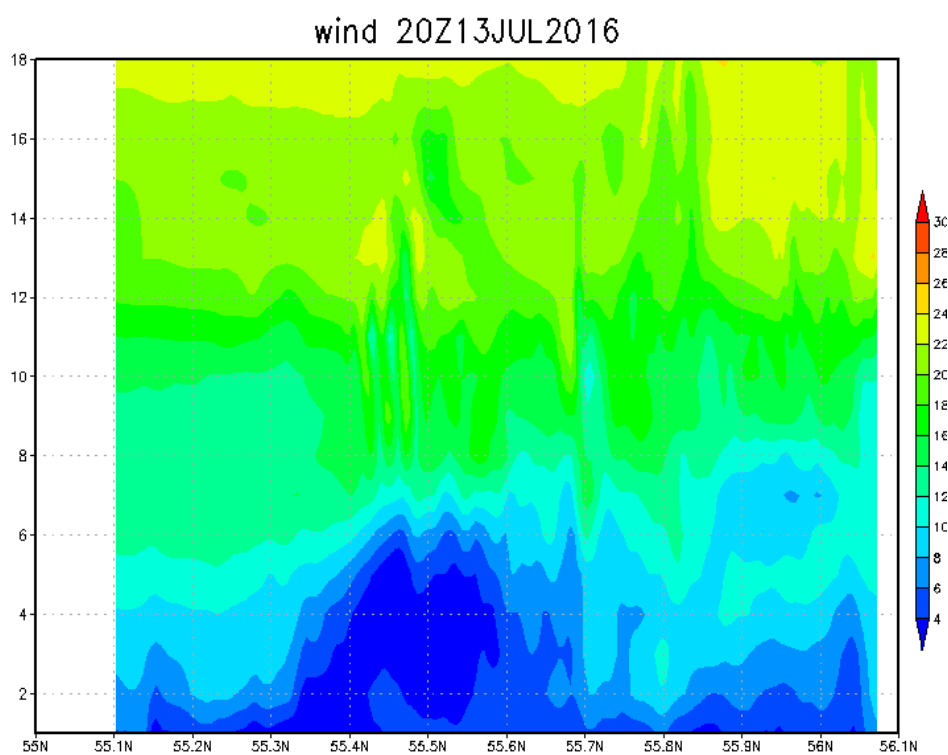


Рисунок 3.6 – Вертикальный разрез ветра по долготе, м/с

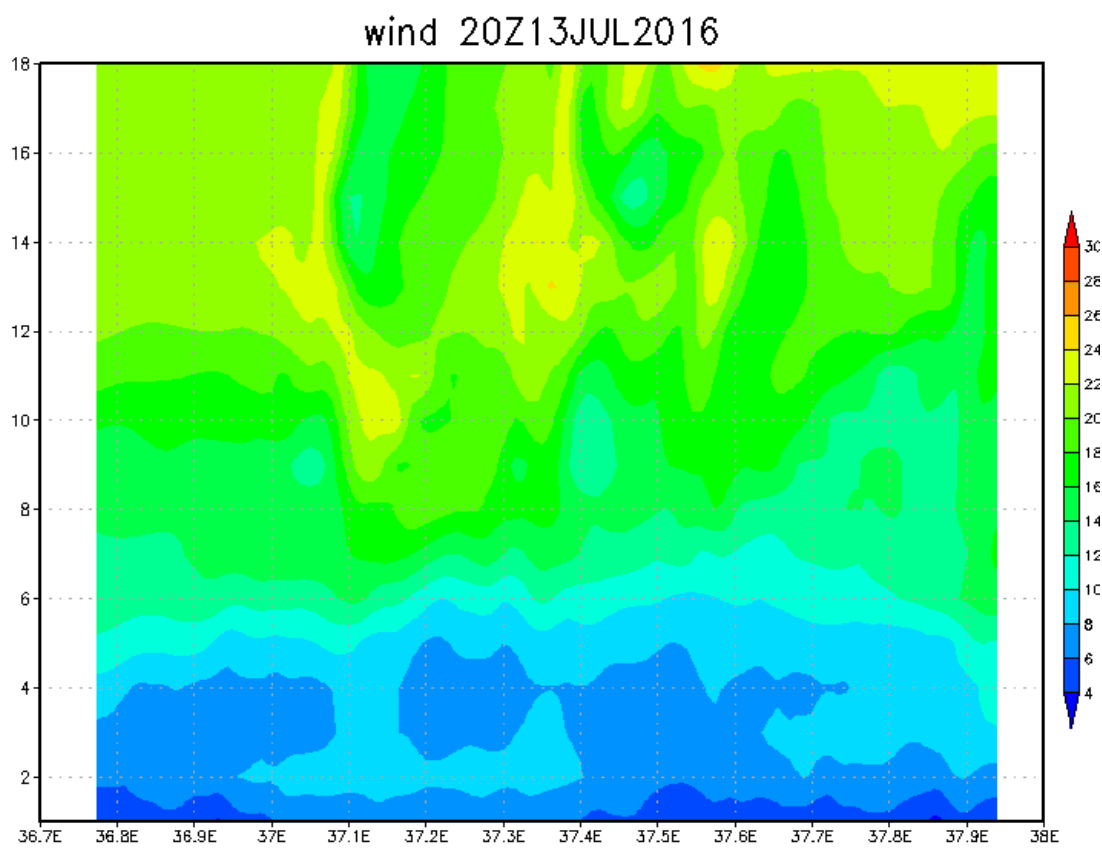


Рисунок 3.7 – Вертикальный разрез ветра по широте, м/с

Исходя из результатов, полученных в результате самой маленькой сетки, можно сделать вывод о том, из представленных полей видно, что качество прогноза стало лучше, мы видим область осадков, которая соответствует суперячейке, хотя абсолютное значение занижено, сам факт осадков и его местоположение воспроизводится моделью правильно. Аналогичный вывод можно сделать для оценки поля ветра, видна сходимость воздушных потоков, но скорость ветра недооценивается. В данной главе судя по результатам, полученным в ходе численных экспериментов, можно сделать вывод о том, что модель WRF-ARW, построенная в данном исследовании, достаточно успешно позволяет моделировать суперячейки в рассматриваемом регионе только с помощью вложенных сеток.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе было проведено исследование влияние опасного явления суперячейка на регионы России.

Были изучены все основные характеристики формирования суперячейки, её развития и влияние метеорологических и синоптических параметров на образование, интенсивность и время существования суперячейки.

Особое внимание в работе уделялось суперячейке, которая прошла над территорией Москвы и Московской области, в результате чего пострадали населенные пункты в юго-западной части Московской области, а также в Москве.

Помимо сбора теоретических данных о суперячейке также была выполнена практическая часть. Она заключалась в проведении численных экспериментов по моделированию основных метеорологических величин. В работе применялась модель «Weather Research and Forecasting – Advanced Research WRF» (WRF-ARW).

Проводились численные эксперименты с разными начальными условиями. Лучшие результаты получены при использовании в качестве начальных условий данных анализа модели GFS – Global Forecast System с шагом сетки $0,25^\circ$.

В работе было произведено несколько циклов численных экспериментов, которые различались пространственной конфигурацией модели и видом начальных условий.

Лучшие окончательные результаты были получены при использовании вложенных (трёх) сеток с шагами 5км, 1666м, 555м.

Лучшие результаты на сетки с шагом по горизонтали 555 м. При использовании для прогноза этой сетки удалось дать прогноз времени возникновения и эволюции суперячейки, хотя не удалось достаточно точно

определить интенсивность осадков и скорости ветра, связанные с суперячейкой. Это можно увидеть при сравнении данных, полученных в результате радиолокационных наблюдений и спутниковых снимков с результатами, полученными при помощи моделирования. Можно заметить, что с более мелким шагом сетки получаемые изображения более детально описывают рассматриваемые метеорологические величины.

В ходе работы были решены все поставленные задачи.

В дальнейшее направление исследований связано с выбором оптимального набора параметризации и с ассимиляцией данных наблюдений, например, МРЛ.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Кибальчич И. Суперячейки [Электронный ресурс] / Кибальчич И. – Электрон. журн. 2010. – Режим доступа: <http://meteoweb.ru/2010/phen071.php> (дата обращения: 12.09.2020).
2. Сафонов А. Наблюдения за комплексом неблагоприятных и опасных явлений погоды и его последствиями в ночь с 13 на 14 июля 2016 г. в Москве [Электронный ресурс] / Сафонов А. – Электрон. журн. 2016. – Режим доступа: <http://meteoweb.ru/news/2016/07/wn2016072000.php> (дата обращения: 23.08.2020).
3. Шихов А. О смерче на западе Московской области 13 июля 2016 г. [Электронный ресурс] / Шихов А. – Электрон. журн. 2016. – Режим доступа: <http://meteoweb.ru/news/2016/07/wn2016071800.php> (дата обращения: 23.08.2020).
4. Parodi Antonio. Supercell in Liguria 19/09/2017 - WRF 500 m case study [Электронный ресурс] / Parodi A. – Электрон. журн. 2017. – Режим доступа: https://www.researchgate.net/publication/320166748_Supercell_in_Liguria_19092017_-_WRF_500_m_case_study (дата обращения: 24.08.2020)
5. Melissa, E. Becker (2010), Simulations of the supercell outbreak of 18 March 1925 / Becker E. Melissa // 25th Conference on Severe Local Storms, Poster Session 8, Supercells and Tornadoes Posters II – 2010 – P8.15
6. Mario, Marcello Miglietta, Jordi Mazon, and Richard Rotunno (2017), Numerical Simulations of a Tornadic Supercell over the Mediterranean / Miglietta Marcello Mario, Mazon Jordi, Rotunno Richard // Journal of the American Society Meteorological, Weather and Forecasting – 2017 – P: 1209–1226

ПРИЛОЖЕНИЯ

Приложение А. Скрипт для изображения метеорологических величин

```
'reinit'
*'open 555_13.07.ctl'
'open 555_14.07.ctl'
*'open 5000_13.07.ctl'
*'open 1666_13.07.ctl'
'set grads off'
tt=1
ty=2016
while(tt<25)
  'set t 'tt
  'set mpdraw on'
  'set mpdset hires'
  'set lon 36.7 38.0'
  'set lat 55.0 56.1'
  *'set lon 34.5 39.5'
  *'set lat 52.5 57.5'
  *'set lon 35.5 39.2'
  *'set lat 54 57.2'
  'run color.gs 0.006 0.020 0.0005 -gxout shaded -var q2 -kind whitesmoke->lightblue-
>cornflowerblue->royalblue->darkblue'
  'd q2'
  'q time'
  time=subwrd(result,3)
  'run cbarn 0.8 1'
  'SET CCOLOR 4'
  'draw title specofic humidity ' time
  'draw shp bnd-political-boundary-a'
  'q w2xy 37.62 55.75 '
  x2=subwrd(result,3)
  y2=subwrd(result,6)
  'draw mark 3 ' x2' 'y2 ' 0.15'
  'printim 555_14/'time'_q2.gif white'
  *'printim 1666_13/'time'_q2.gif white'
  *'printim 5000_13/'time'_q2.gif white'
  'c'
  tt=tt+1
endwhile
tt=1
while(tt<25)
  'set t 'tt
  'set mpdraw on'
  'set mpdset hires'
  'set lon 36.7 38.0'
  'set lat 55.0 56.1'
  *'set lon 34.5 39.5'
  *'set lat 52.5 57.5'
  *'set lon 35.5 39.2'
  *'set lat 54 57.2'
```

```

'run color.gs 14 27 0.5 -gxout shaded -var t2-273 -kind blue->red'
'd t2-273'
'run cbarn 0.8 1'
'run color.gs 14 27 1 -gxout contour -var t2-273 -kind lightslategray->olivedrab'
'set clab off'
'd t2-273'
'q time'
time=subwrd(result,3)
'SET CCOLOR 4'
'draw title temperature 2 m' time
'draw shp bnd-political-boundary-a'
'q w2xy 37.62 55.75 '
x2=subwrd(result,3)
y2=subwrd(result,6)
'draw mark 3 ' x2' 'y2 ' 0.15'
'printim 555_14/'time'_t2.gif white'
*'printim 1666_13/'time'_t2.gif white'
*'printim 5000_13/'time'_t2.gif white'
'c'
tt=tt+1
endwhile
tt=1
while(tt<25)
'set t 'tt
'set mpdraw on'
'set mpdset hires'
'set lon 36.7 38.0'
'set lat 55.0 56.1'
*'set lon 34.5 39.5'
*'set lat 52.5 57.5'
*'set lon 35.5 39.2'
*'set lat 54 57.2'
'run color.gs 5 30 -gxout vector -var skip(u10,10);v10 -kind blue->aqua->lime-
>yellow->red'
'd skip(u10,10);v10'
'q time'
time=subwrd(result,3)
'SET CCOLOR 4'
'draw title wind ' time
'draw shp bnd-political-boundary-a'
'q w2xy 37.62 55.75 '
x2=subwrd(result,3)
y2=subwrd(result,6)
'draw mark 3 ' x2' 'y2 ' 0.15'
'printim 555_14/'time'_v.gif white'
*'printim 1666_13/'time'_v.gif white'
*'printim 5000_13/'time'_v.gif white'
'c'
tt=tt+1
endwhile
tt=2
while(tt<25)

```

```

'set t 'tt
'set mpdraw on'
'set mpdset hires'
  'set lon 36.7 38.0'
  'set lat 55.0 56.1'
*'set lon 34.5 39.5'
*'set lat 52.5 57.5'
*'set lon 35.5 39.2'
*'set lat 54 57.2'
  'run color.gs 1 25 1 -gxout shaded -var p -kind blue->aqua->lime->yellow->red'
  'd RAINC+RAINNC+RAINSH'
  'run cbarn 0.8 1'
  'q time'
  time=subwrd(result,3)
  'SET CCOLOR 4'
  'draw title precipitation ' time
  'q w2xy 37.62 55.75 '
  x2=subwrd(result,3)
  y2=subwrd(result,6)
  'draw mark 3 ' x2' 'y2 ' 0.15'
  'draw shp bnd-political-boundary-a'
  'printim 555_14/'time'_R.gif white'
*'printim 1666_13/'time'_R.gif white'
*'printim 5000_13/'time'_R.gif white'
  'c'
  tt=tt+1
endwhile
tt=1
while(tt<25)
  'set t 'tt
  'set mpdraw on'
  'set mpdset hires'
  'set lon 36.7 38.0'
  'set lat 55.0 56.1'
*'set lon 34.5 39.5'
*'set lat 52.5 57.5'
*'set lon 35.5 39.2'
*'set lat 54 57.2'
  'set gxout shaded'
  'define pp=(ph+phb+p_HYD)/100'
  'run color.gs -gxout shaded -var pp -kind aquamarine->mediumaquamarine-
>palegreen->darkgreen'
  'd pp'
  'run cbarn 0.8 1'
  'q time'
  time=subwrd(result,3)
  'SET CCOLOR 4'
  'draw title pressure ' time
  'q w2xy 37.62 55.75 '
  x2=subwrd(result,3)
  y2=subwrd(result,6)
  'draw mark 3 ' x2' 'y2 ' 0.15'

```

```

        'draw shp bnd-political-boundary-a'
        'printim 555_14/'time'_P.gif white'
        *'printim 1666_13/'time'_P.gif white'
        *'printim 5000_13/'time'_P.gif white'
        'c'
        tt=tt+1
    endwhile

```

Приложение Б. Скрипт для изображения вертикального профиля ветра

```

reinit'
c.1="u,v"
'open 555_13.07.ctl'
'set grads off'
tt=1
while(tt<25)
    'set t 'tt
    'set mpdraw on'
    'set mpdset hires'
    'set lon 36.7 38'
    'set lat 55.75'
    'set z 1 18'
    'run color.gs 4 30 2 -gxout shaded -var mag(u,v) -kind blue->aqua->lime->yellow->red'
    'd mag(u,v)'
    'run cbarn 0.7 1'
    'q time'
    time=subwrd(result,3)
    'SET CCOLOR 4'
    'draw title wind ' time
    * 'q w2xy 37.62 55.75 '
    * x2=subwrd(result,3)
    * y2=subwrd(result,6)
    * 'draw mark 3 ' x2 ' y2 ' 0.25'
    * 'draw shp bnd-political-boundary-a'
    'printim vr_lat_555/'time'_vrWIND_lat.gif white'
    'c'
    tt=tt+1
endwhile
tt=1
while(tt<25)
    'set t 'tt
    'set mpdraw on'
    'set mpdset hires'
    'set lon 37.6'
    'set lat 55 56.1'
    'set z 1 18'
    'run color.gs 4 30 2 -gxout shaded -var mag(u,v) -kind blue->aqua->lime->yellow->red'
    'd mag(u,v)'
    'run cbarn 0.7 1'
    'q time'
    time=subwrd(result,3)
    'SET CCOLOR 4'

```

```

'draw title wind ' time
* 'q w2xy 37.62 55.75 '
* x2=subwrd(result,3)
* y2=subwrd(result,6)
* 'draw mark 3 ' x2' 'y2 ' 0.25'
* 'draw shp bnd-political-boundary-a'
'printim vr_lon_555/'time'_vrWIND_lon.gif white'
'c'
tt=tt+1
endwhile

```

Приложение В. Пример полученных результатов при помощи моделирования температуры воздуха с пространственным разрешением 555 м за 22 UTC 13.07.2016

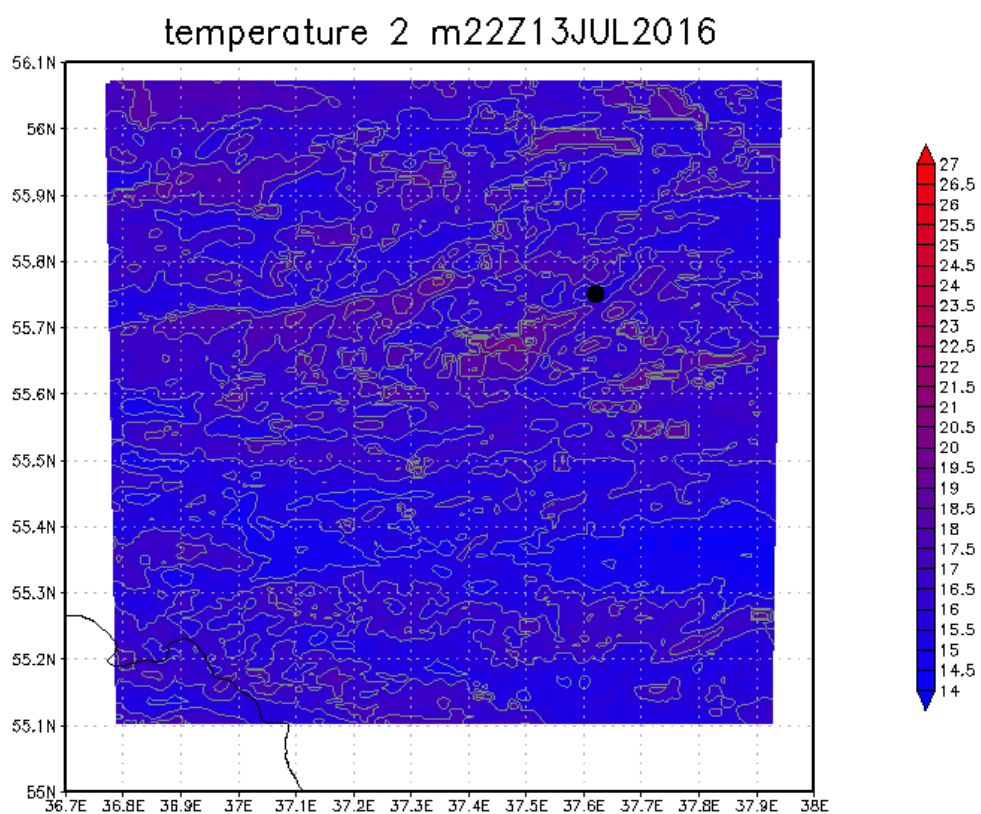


Рисунок В.1 – Пространственное распределение температуры воздуха за 22 UTC 13.07.2016г

Приложение Г. Пример полученных результатов при помощи моделирования осадков с пространственным разрешением 555 м за 22 UTC 13.07.2016

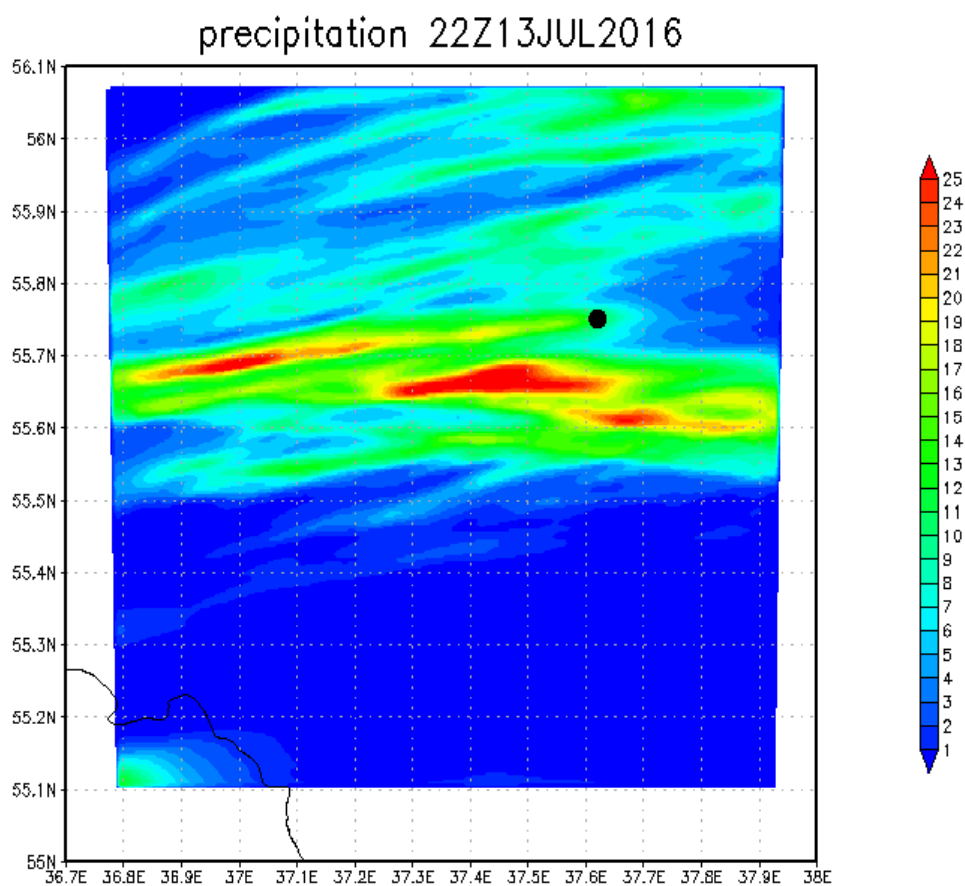


Рисунок Г.1 – Пространственное распределение осадков за 22 UTC
13.07.2016г

Приложение Д. Пример полученных результатов при помощи моделирования массовой доли водяного пара с пространственным разрешением 555 м за 22 UTC 13.07.2016

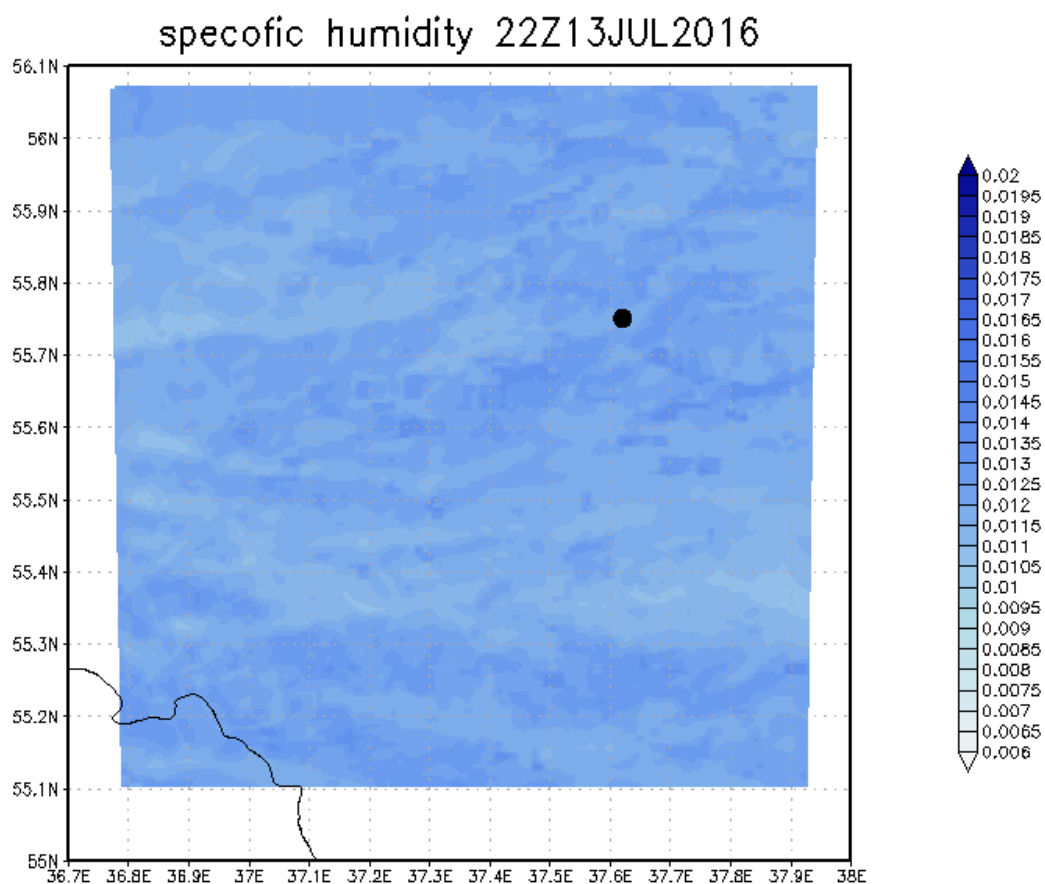


Рисунок Д.1 – Пространственное распределение массовой доли водяного пара за 22 UTC 13.07.2016г

Приложение Е. Пример полученных результатов при помощи моделирования атмосферного давления с пространственным разрешением 555 м за 22 UTC 13.07.2016

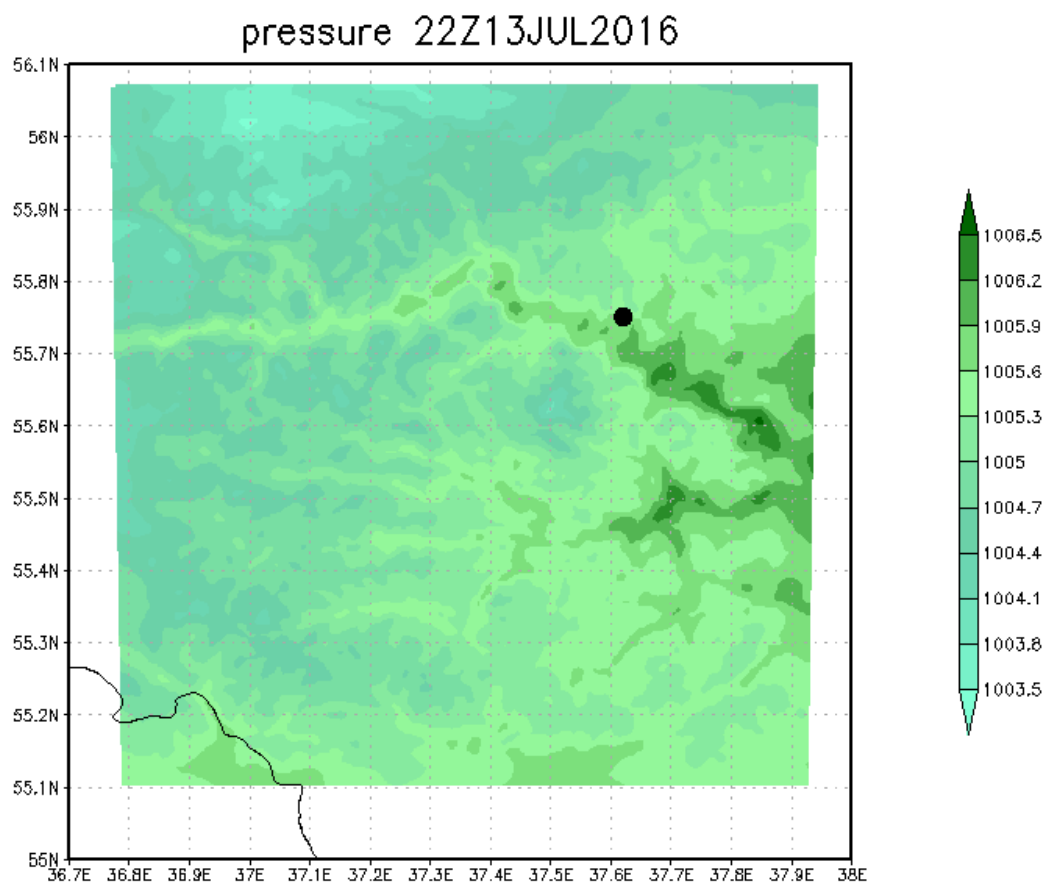


Рисунок Е.1 – Пространственное распределение атмосферного давления за 22 UTC 13.07.2016г

Приложение Ж. Пример полученных результатов при помощи моделирования скорости и направления ветра с пространственным разрешением 555 м за 22 UTC 13.07.2016

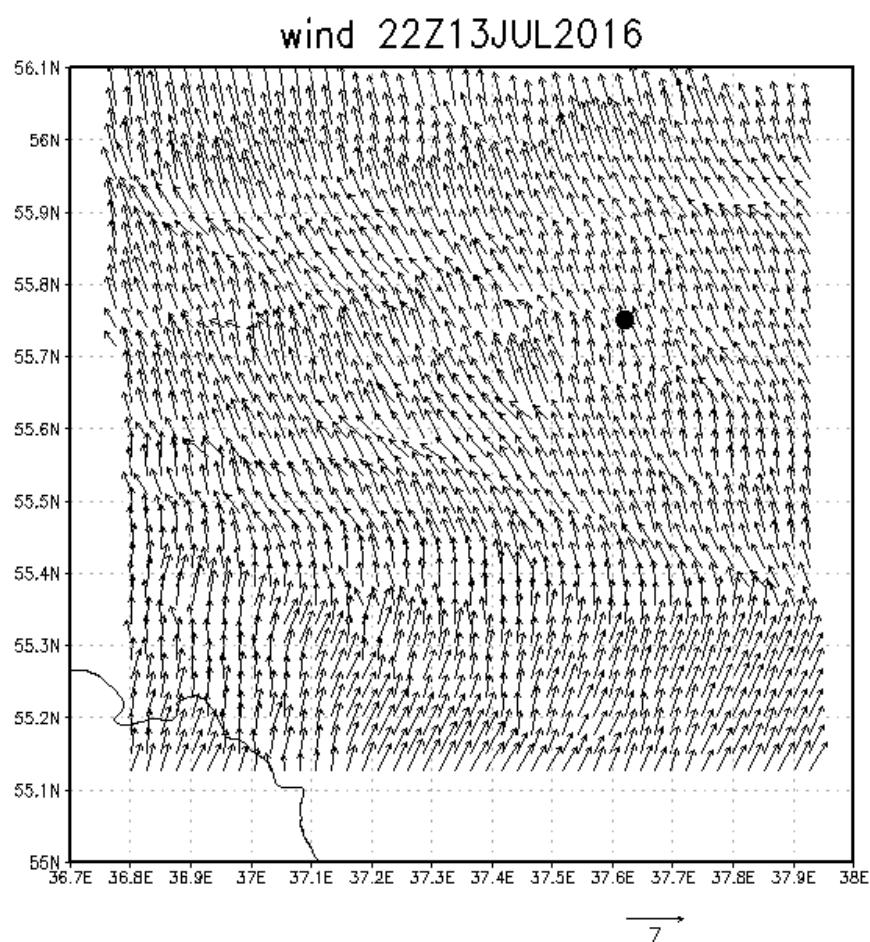


Рисунок Ж.1 – Пространственное распределение скорости и направления ветра за 22 UTC 13.07.2016г