



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: «Моделирование циклонов по типу Шапиро-Кейзера»

Исполнитель Дряпак Вероника Игоревна  
(фамилия, имя, отчество)

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

Топтунова Ольга Николаевна  
(фамилия, имя, отчество)

«К защите допускаю»  
Заведующий кафедрой

(подпись)

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

Анискина Ольга Георгиевна  
(фамилия, имя, отчество)

« 02 » июня 2025 г.

Санкт-Петербург  
2025

## СОДЕРЖАНИЕ

|                                                                                             |    |
|---------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| СОКРАЩЕНИЯ.....                                                                             | 1  |
| ВВЕДЕНИЕ.....                                                                               | 4  |
| ГЛАВА 1. МЕХАНИЗМЫ ЦИКЛОГЕНЕЗА И СТРУКТУРА ЦИКЛОНОВ....                                     | 6  |
| 1.1 Особенности циклогенеза по типу Шапиро-Кейзера.....                                     | 6  |
| 1.2 Модель «Конвейерной ленты» в формировании облачной спирали циклонов Шапиро-Кейзера..... | 13 |
| 1.3 Стинг-джеты .....                                                                       | 20 |
| ГЛАВА 2. ОПИСАНИЕ МОДЕЛИ WRF .....                                                          | 23 |
| 2.1 Общая характеристика WRF .....                                                          | 24 |
| 2.2 Элементы программной системы WRF .....                                                  | 25 |
| 2.3 Структура программной системы WRF .....                                                 | 27 |
| 2.4 Параметризация физических процессов в модели .....                                      | 43 |
| ГЛАВА 3. МОДЕЛИРОВАНИЕ ЦИКЛОНОВ ПО ТИПУ ШАПИРО-КЕЙЗЕРА .....                                | 52 |
| 3.1 Использование NCL и изоэнтропические уровни .....                                       | 52 |
| 3.2 Адаптация модели для региона .....                                                      | 55 |
| 3.3 Синоптическая обстановка.....                                                           | 58 |
| 3.4 Применение WRF на практике .....                                                        | 60 |
| ЗАКЛЮЧЕНИЕ .....                                                                            | 74 |
| СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....                                                                      | 76 |
| ПРИЛОЖЕНИЯ.....                                                                             | 80 |

## СОКРАЩЕНИЯ

|        |   |                                             |
|--------|---|---------------------------------------------|
| ACM2   | - | Asymmetric Convective Model                 |
| ARW    | - | Advanced Research WRF                       |
| CAM    | - | Community Atmosphere Model                  |
| CCBa   | - | early cold conveyor belt                    |
| CCBb   | - | returning cold conveyor belt                |
| ESMF   | - | Earth System Modeling Framework             |
| GFDL   | - | Geophysical Fluid Dynamics Laboratory       |
| GFS    | - | Global Forecast System                      |
| GRIB   | - | GRIdded Binary                              |
| MRF    | - | Medium Range Forecast                       |
| MYJ    | - | Mellor-Yamada-Janjic                        |
| Ncar   | - | National Center for Atmospheric Research    |
| NetCDF | - | Network Common Data Form                    |
| NMC    | - | National Meteorological Center              |
| NMM    | - | Nonhydrostatic Mesoscale Model              |
| RRTM   | - | Rapid Radiative Transfer Model              |
| SJ     | - | Sting Jet                                   |
| WCB    | - | warm conveyor belt                          |
| WPS    | - | WRF Preprocessing System                    |
| WRF    | - | Weather Research and Forecasting            |
| WRFDA  | - | Weather Research Forecast Data Assimilation |
| WRFDA  | - | WRF Data Assimilation                       |
| WSF    | - | WRF Software Framework                      |
| YSU    | - | Yonsei State University                     |
| BMO    | - | Всемирная метеорологическая организация     |
| РФ     | - | Российская Федерация                        |

## ВВЕДЕНИЕ

Атмосферные циклоны средних широт играют ключевую роль в формировании погодных условий, оказывая влияние на температурный режим, осадки и ветровую активность. Среди них особый интерес представляют циклоны типа Шапиро—Кейзера, характеризующиеся интенсивным фронтогенезом, асимметричной структурой и четко выраженными стадиями развития. Изучение таких циклонов важно для улучшения прогнозирования опасных метеорологических явлений, включая штормовые ветры, ливни и резкие изменения температуры.

Численное моделирование является мощным инструментом для исследования структуры и эволюции циклонов. Одной из наиболее распространенных моделей, применяемых для этих целей, является Weather Research and Forecasting (WRF), позволяющая с высокой детализацией воспроизводить динамику атмосферных процессов. В данной работе модель WRF использовалась для анализа циклона, развивающегося по сценарию Шапиро—Кейзера, с акцентом на изучение термодинамических и влажностных характеристик на различных изобарических уровнях.

Цель работы – моделирование и анализ структуры циклона типа Шапиро—Кейзера с использованием модели WRF, включая исследование полей давления, температуры, удельной влажности и их вертикального распределения.

Задачи исследования:

1. Отбор данных;
2. Подготовка начальных данных для гидродинамического прогноза;
3. Адаптация модели к исследуемой территории;

4. Провести численное моделирование циклона в Северной Атлантике с помощью WRF.

Актуальность работы обусловлена необходимостью углубленного понимания механизмов циклогенеза, что важно для повышения точности метеорологических прогнозов. Внетропические циклоны играют решающую роль в формировании погодных условий в средних и высоких широтах и приводят к существенным социально-экономическим последствиям, влияя на судоходство, морскую инфраструктуру и прибрежные регионы. Результаты исследования могут быть использованы в синоптической метеорологии, а также при разработке методов раннего предупреждения экстремальных погодных явлений.

Методы исследования включают численное моделирование в WRF, визуализацию метеорологических полей, анализ вертикальных разрезов и сравнение полученных данных с теоретическими моделями циклонической активности.

Работа состоит из введения, теоретической части, описания методики моделирования, анализа результатов и заключения. В качестве исходных данных использовались глобальные метеорологические архивы, а параметризация модели была настроена для воспроизведения условий, характерных для циклонов Шапиро—Кейзера.

Проведенное исследование позволяет не только подтвердить представления о структуре таких циклонов, но и выявить особенности их эволюции.

# ГЛАВА 1. МЕХАНИЗМЫ ЦИКЛОГЕНЕЗА И СТРУКТУРА ЦИКЛОНОВ

## 1.1 Особенности циклогенеза по типу Шапиро-Кейзера

В 1990 году М.А. Шапиро и Д. Кейзер предложили альтернативную модель эволюции циклонов, которая принципиально отличалась от классической норвежской концепции. Их исследования показали, что над океаническими акваториями часто наблюдается особый тип циклогенеза, при котором процесс окклюзии протекает иным образом.

Согласно их модели, начальная стадия окклюдирования характеризуется отсутствием традиционного смыкания теплого и холодного фронтов. Вместо этого наблюдается следующая динамика: холодный фронт изначально не связан с циклоном и перемещается независимо, сохраняя перпендикулярную ориентацию относительно основного теплого фронта. При этом в тыловой части циклона формируется фронт окклюзии, обладающий свойствами теплого фронта.

Важнейшей особенностью данной модели является отсутствие визуального соединения фронтов, характерного для классической норвежской схемы. Ключевым диагностическим признаком такого развития циклона становится образование секклюдии - уникального процесса, при котором часть теплого сектора отсекается и замыкается вблизи центра циклонной системы.

Этот механизм объясняет специфику эволюции морских циклонов и демонстрирует разнообразие сценариев циклогенеза в зависимости от термодинамических условий подстилающей поверхности.

Работа Шапиро и Кейзера существенно расширила понимание динамики атмосферных вихрей и показала необходимость учета различных сценариев развития при анализе и прогнозировании циклонической деятельности.

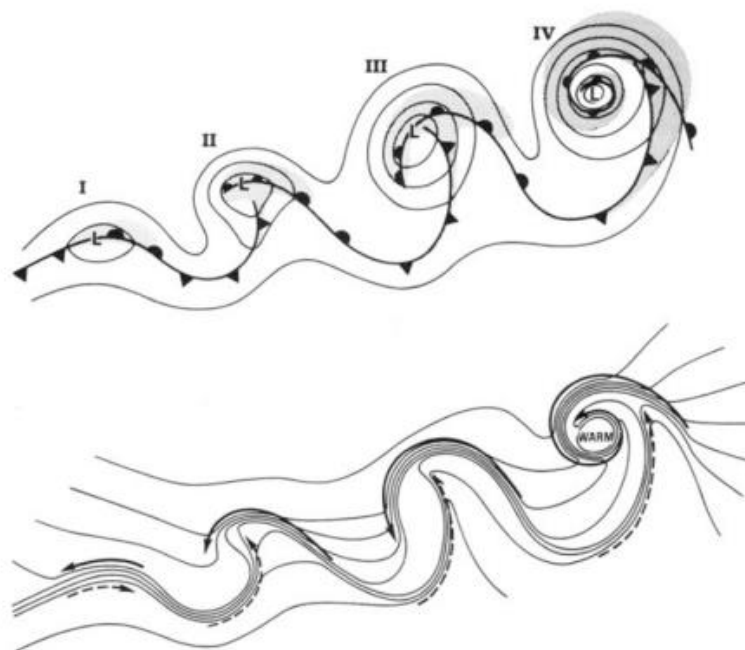


Рисунок 1.1 – Схема эволюции циклона по типу Шапиро-Кейзера [1]

Начальная волновая стадия развития циклона по модели Шапиро-Кейзера представляет собой процесс формирования зоны пониженного давления на обширном фронтальном разделе, обусловленный развитием бароклинной неустойчивости.

На этом этапе возникают слабо выраженные фронтальные границы, постепенно объединяющиеся в центре формирующегося циклона. Характерной особенностью данной стадии является слабая интенсивность адвективных процессов - потоки теплого и холодного воздуха, движущиеся в противоположных направлениях вдоль фронтальной зоны, пока не достигают значительной силы. При этом теплые и холодные талоки остаются относительно сбалансированными, что препятствует быстрому развитию фронтогенеза.

В отличие от классической норвежской модели, где фронтальные разделы формируются четко и быстро, в циклонах типа Шапиро-Кейзера начальная стадия характеризуется размытостью фронтальных границ и постепенным нарастанием термических контрастов.

Такая эволюция особенно характерна для морских и океанических циклонов, где перепад температур на фронтальных разделах изначально менее выражен, чем над континентальными районами.

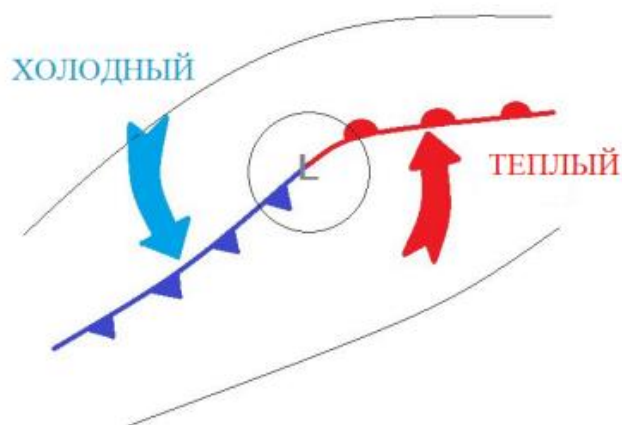


Рисунок 1.2 – Графическое изображение стадии волны. Стрелками указано направление воздушных масс внутри барического образования [1]

На втором этапе развития циклона по модели Шапиро-Кейзера – стадии молодого циклона – происходит качественное изменение структуры атмосферного вихря. Фронтальная поверхность приобретает выраженную кривизну, что приводит к разрыву непрерывности линий теплого и холодного фронтов. В центральной части циклона формируется глубокий «гребень тепла» – область выраженной теплой адвекции, проникающая в ядро циклонического образования. [1]

На синоптических картах в этот период появляется возможность провести дополнительную замкнутую изобару, что свидетельствует об углублении барической депрессии. Характерной особенностью является образование выраженных барических ложбин, отражающих усиление циклонической циркуляции. Воздушные потоки начинают демонстрировать заметное

искривление траекторий с одновременным увеличением скорости переноса воздушных масс.

Принципиальным отличием от классической норвежской модели остается наличие слабоактивной переходной зоны (на схемах часто обозначаемой серой линией), которая сохраняет связь между холодным и теплым фронтами. Эта граница, хотя и не обладает выраженной фронтологической активностью, играет важную роль в дальнейшей эволюции циклона, определяя особенности процесса окклюдирования, характерного для данного типа циклонов. Усиление кривизны фронтальных поверхностей и нарастание барических градиентов свидетельствуют о переходе системы в фазу активного развития. [1]



Рисунок 1.3 – Графическое изображение стадии молодого циклона по типу Шапиро-Кейзера. Стрелками указано направление воздушных масс внутри барического образования

Третий этап эволюции циклона по модели Шапиро-Кейзера — стадия максимального развития — представляет собой уникальный сценарий циклонической зрелости, существенно отличающийся от классической норвежской модели.

На этой стадии циклон достигает пика интенсивности, однако вместо традиционного процесса окклюзии формируется особая фронтальная конфигурация. Характерной особенностью является отсутствие классической окклюзии — вместо этого образуется четко выраженная граница, отделяющая теплое ядро циклона от холодных воздушных масс на северо-востоке, которая по своим свойствам напоминает теплый фронт. [1]

На синоптических картах это проявляется в виде изогнутого теплого фронта там, где в норвежской модели ожидалось бы увидеть фронт окклюзии. Фронтальные системы при этом сохраняют перпендикулярную ориентацию относительно друг друга, образуя характерную разомкнутую конфигурацию.

В этот период продолжается углубление циклона с усилением кривизны воздушных потоков — холодные воздушные массы интенсивно поступают в тыловую часть системы, тогда как теплые потоки концентрируются в центральном секторе. Визуально это проявляется в формировании Т-образной облачной структуры, где горизонтальная перекладина соответствует тепловому фронту, а вертикальная составляющая — холодному фронту. Такая конфигурация облачности является диагностическим признаком циклонов данного типа. При этом сохраняется выраженный теплый сектор и значительные температурные контрасты, что принципиально отличает эту стадию от классической окклюзии в норвежской модели. [1]

Особенностью динамики является поддержание высокой барической контрастности без традиционного «перекрытия» фронтов, что характерно прежде всего для морских и океанических условий, где процессы циклогенеза имеют свою специфику. Эта стадия представляет особый интерес для современной синоптической метеорологии, демонстрируя альтернативные механизмы развития атмосферных вихрей.

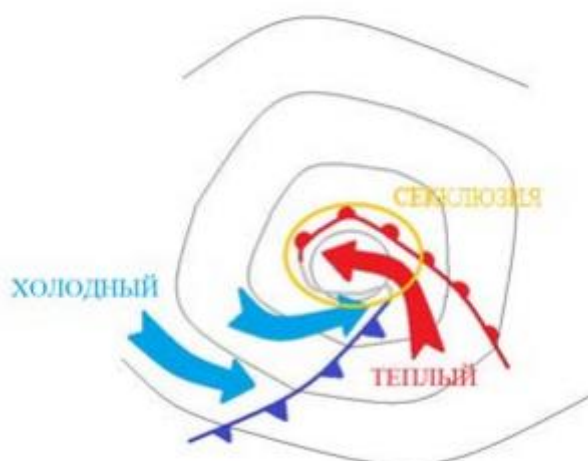


Рисунок 1.4 – Графическое изображение стадии максимального развития циклона по типу Шапиро-Кейзера. Стрелками указано направление воздушных масс внутри барического образования

На заключительной стадии эволюции циклона по модели Шапиро-Кейзера — стадии заполнения — происходит качественное преобразование структуры атмосферного вихря. В отличие от предыдущих этапов, теперь наблюдается формирование классического фронта окклюзии, который спиралевидно обвивает центр циклона, достигая при этом максимальной интенсивности воздушных потоков. Этот процесс сопровождается характерным соединением изотерм, образующих компактное теплое ядро в центральной части циклонической системы. По мере развития окклюзии фронтальная структура приобретает замкнутый концентрический характер, при этом теплый сектор полностью изолируется от внешнего воздействия. [1]

Особенностью данной стадии является парадоксальное сочетание признаков затухания циклона (начало заполнения барической депрессии) с максимальной активностью фронтогенетических процессов. Воздушные потоки в этот период достигают пиковых значений скорости, формируя мощную кольцевую циркуляцию вокруг центра низкого давления. Одновременно происходит постепенное выравнивание термических контрастов — изотермы

замыкаются, создавая изолированную тепловую аномалию в сердцевине циклона.

Этот процесс принципиально отличается от классической норвежской модели более симметричным характером перераспределения тепловых полей и особым механизмом диссипации энергии.

Облачная система в этот период приобретает правильную спиральную форму, теряя характерные фронтальные особенности, что служит надежным индикатором перехода циклона в завершающую фазу своего существования. [1]

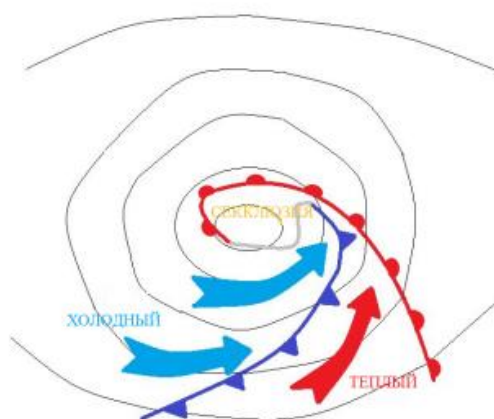


Рисунок 1.5 – Графическое изображение стадии заполнения циклона по типу Шапиро-Кейзера. Стрелками указано направление воздушных масс внутри барического образования

Проведенный анализ эволюции циклонов по модели Шапиро-Кейзера позволяет выявить их принципиальные отличия от классической норвежской схемы. Главной особенностью является нетрадиционная динамика фронтальных процессов - холодный фронт претерпевает характерный перелом, приобретая перпендикулярную ориентацию относительно теплого фронта и образуя специфическую Т-образную конфигурацию. При этом наблюдается активное проникновение холодного фронта через теплый сектор, что кардинально меняет традиционное представление о фронтальном взаимодействии. Важной

отличительной чертой становится формирование зон экстремальных ветровых нагрузок, особенно выраженных к югу от окклюзии, где скорости ветра могут достигать 150 км/ч. Процесс окклюзии развивается по особому сценарию - не через классическое «натекание» фронтов, а через их сложное пространственное переплетение и вторичное соединение, что приводит к образованию уникальной спиралевидной структуры.

На термодинамическом уровне циклоны этого типа сохраняют выраженное теплое ядро даже на поздних стадиях эволюции, демонстрируя нестандартное распределение температурных аномалий. Механизм теплообмена между воздушными массами также имеет существенные отличия от норвежской модели. Эти особенности кардинально меняют подходы к диагностике и прогнозированию подобных циклонов, особенно в условиях морских и океанических акваторий, где традиционные схемы часто оказываются недостаточно эффективными.

Таким образом, модель Шапиро-Кейзера представляет не просто альтернативный вариант циклогенеза, а принципиально иной механизм атмосферной динамики, требующий специальных подходов к анализу и прогнозированию. Особое значение эти особенности приобретают применительно к морским и океаническим циклонам, где традиционные норвежские модели часто оказываются недостаточно релевантными. Это новое понимание динамики атмосферных вихрей, требующее разработки специальных методик анализа и прогнозирования опасных метеорологических явлений.

## **1.2 Модель «Конвейерной ленты» в формировании облачной спирали циклонов Шапиро-Кейзера**

В научном сообществе до сих пор отсутствует консенсус относительно природы окклюзионных процессов. В современных методиках спутникового анализа основное внимание сосредоточено на визуальных характеристиках барических образований, наблюдаемых из космоса, а также на особенностях их эволюционных стадий. Учитывая продолжительный жизненный цикл окклюзий,

данная фаза циклонического развития может занимать меньший временной промежуток по сравнению со стадией сформированной облачной спирали, когда визуальные различия в структуре облачного покрова становятся менее выраженными.

Середина XX века ознаменовалась значительным прогрессом в метеорологической науке. Внедрение новых технологий наблюдения - включая запуск радиозондов, развертывание спутниковых систем и радиолокационных станций - позволило специалистам глубже изучить атмосферные процессы и их структуру.

Важное открытие было сделано исследователем Гринном Дж. в 1966 году, который на основе анализа спутниковых данных зафиксировал феномен рассеивания облачности в тыловой части циклонического образования. Данное наблюдение противоречило устоявшимся положениям Бергенской школы, что стимулировало дальнейшие исследования этого атмосферного явления, впоследствии продолженные учёным К. Браунингом.

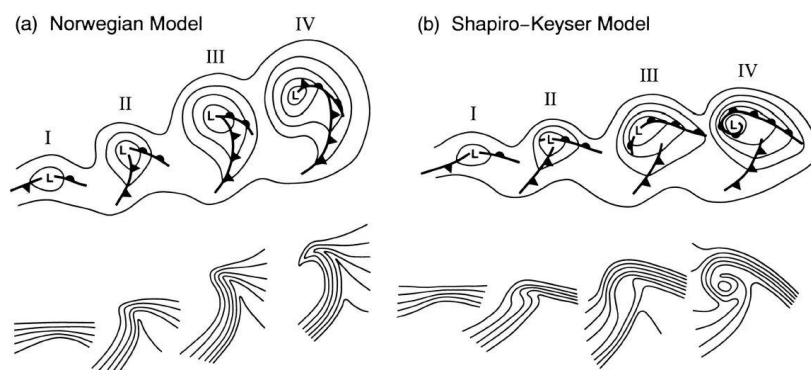


Рисунок 1.6 - Модель образования окклюзии по двум типам моделям (слева – норвежская, справа – Шапиро-Кейзер) [1]

Анализ представленной модели позволяет проследить формирование облачной спирали. Этот процесс наиболее точно объясняется в рамках концепции «конвейерной ленты», согласно которой воздушные массы

перемещаются вместе с фронтальной системой, сохраняя относительное положение.

К. Браунинг в своих исследованиях доказал, что система воздушных течений функционирует не только в приземных слоях (как предполагает классическая норвежская модель циклона), но и в верхних уровнях атмосферы. Учёный ввёл классификацию воздушных потоков, разделив их на три типа: тёплый, холодный и сухой конвейеры.

#### *Характеристики тёплого конвейера:*

Двигается к северу впереди холодного фронта, затем, догоняя его, поворачивает на восток и поднимается вдоль тёплого фронта, определяя его наклон.

Распространяется до уровней 500 гПа и выше, следуя вдоль изобар (линий равного геопотенциала) и смещаясь к востоку от гребня высокого давления. [2]

Обеспечивает транспортировку тёплого воздуха в развивающемся циклоне.

При попадании тёплого конвейера в более холодную воздушную массу формируется типичная фронтальная облачность (перистые, слоистые и слоисто-дождевые облака).

#### *Характеристики холодного конвейера:*

Формируется в холодных воздушных массах под теплым фронтом, располагаясь севернее циклонического центра. При достижении центральной части циклона воздушный поток меняет направление на северное.

Осуществляет перенос холодных воздушных масс из нижних слоев тропосферы в тыловую область циклонического образования.

Играет ключевую роль в формировании осадков в центральной части циклона: при взаимодействии относительно сухого холодного воздуха с

насыщенными влагой теплыми массами происходит их увлажнение. Однако при исходно низкой влажности воздушной массы количество выпадающих осадков существенно уменьшается. [2]

*Особенности сухого конвейера (сухого вторжения):*

Представляет собой перенос сухих воздушных масс из нижней тропосферы в направлении холодного фронта с последующим перемещением в тыловую часть барической системы. [2]

При достижении холодного фронта воздушный поток меняет траекторию, располагаясь параллельно фронтальной зоне.

Характеризуется значительной вертикальной протяженностью, пониженными температурными показателями, низкими значениями относительной влажности.

Обуславливает формирование ясной погоды в области, следующей за холодным фронтом.

Таким образом, область за холодным фронтом обычно характеризуется ясной, малооблачной погодой. Если сухой конвейер распространяется в приземном слое, то весь тёплый сектор циклона заполняется сухими воздушными массами, что приводит к установлению сухой и ясной погоды с незначительной конвективной активностью. На спутниковых изображениях этот процесс визуализируется в виде характерного облачного "хвоста", формирующегося на границе воздушных масс. [2]

Однако в ряде случаев наблюдается изменение траектории сухого конвейера. При его подъёме в верхние слои тропосферы создаются условия для развития атмосферной неустойчивости. Это способствует образованию мощных конвективных ячеек, которые могут вызывать опасные метеорологические явления, включая:

- интенсивные ливневые осадки;

- шквалистые усиления ветра (до 30 м/с и более);
- активную грозовую деятельность;
- смерчи и шквалы (в наиболее выраженных случаях).

Данный сценарий демонстрирует, что даже изначально сухие воздушные массы при изменении динамики могут существенно влиять на погодные условия, трансформируясь из фактора стабилизации в источник конвективной неустойчивости.

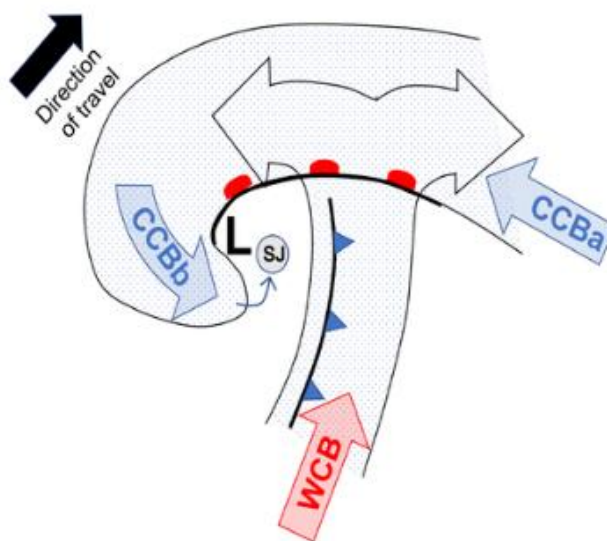


Рисунок 1.7 - Концептуальная модель циклона Шапиро-Кейзера.

WCB (warm conveyor belt – теплая конвейерная лента), CCBa (early cold conveyor belt – ранняя холодная конвейерная лента) и CCBb (returning cold conveyor belt – возвратная холодная конвейерная лента). Фронты обозначены условными символами, «L» указывает на центр циклона, а штриховка — на облака.

Работы К. Браунинга, основанные на разработанной им модели, стали катализатором для углубленного изучения механизмов облакообразования и генезиса осадков. Его научные разработки легли в основу множества современных моделей, описывающих эволюционные процессы циклонов.

Анализ спутниковых данных позволяет выделить следующие характерные признаки:

1. Визуализация «теплой конвейерной ленты» представлена антициклонически изогнутой облачной полосой, локализованной впереди облачной системы холодного фронта, но пространственно обособленной от нее.
2. В инфракрасном диапазоне (ИК) оптическая плотность облачности данной структуры варьируется в градациях от светло-серого до ярко-белого.
3. Морфология облаков преимущественно волокнистая, однако наблюдаются включения обширных зон высокоуровневой перистой облачности.
4. Облачный покров, ассоциированный с «теплым конвейером», отличается меньшей площадью; в случаях визуальной выраженности он представлен дискретными ячеистыми элементами.
5. Интенсивность восходящих движений в «теплой конвейерной ленте» проявляется в пространственном градиенте яркости ИК-изображения: монотонное усиление сигнала в направлении с юга на север или северо-восток с последующей редукцией.

«Тёплая конвейерная лента» представляет собой воздушный поток, формирующийся в приземном слое внетропического циклона и обладающий следующими ключевыми свойствами:

#### *Генезис и вертикальная динамика:*

Воздушные массы, иницирующиеся в пограничном слое циклона, подвергаются квазиadiaбатическому восходящему движению в северном или северо-восточном направлении. В процессе адвекции происходит насыщение влагосодержащих воздушных потоков, что индуцирует конденсационные процессы и последующее образование облачных структур.

### *Нисходящие движения:*

После достижения верхних уровней тропосферы наблюдается изменение траектории воздушного потока на юго-восточное направление с переходом к субсиденции. Данный процесс сопровождается деструкцией облачности вследствие адиабатического нагрева и уменьшения относительной влажности.

### *Микрофизические особенности:*

Облачный покров, ассоциированный с «тёплой конвейерной лентой», преимущественно представлен средне- и высокоуровневыми формами (Altostratus, Cirrostratus), для которых характерно минимальное фазовое переохлаждение капель. Вследствие этого осадкообразование либо отсутствует, либо проявляется в виде слабых морозящих осадков.

### *Погодные условия в зоне «конвейерной ленты»:*

#### Осадки:

- осадки слабой и умеренной интенсивности, ассоциированные с зонами повышенной плотности облачного покрова;
- интенсификация осадков до ливневых при мезомасштабном взаимодействии с фронтогенетическими зонами;
- развитие конвективных процессов на тыловой периферии облачной системы может инициировать грозовую активность.

#### Температура:

- отсутствие значимых барических и термических аномалий.

#### Ветровой режим:

- усиление скоростных характеристик ветрового поля с возможными шквалистыми усилениями в зоне влияния конвейерной ленты;
- векторная ротация ветра в передней части воздушного потока, обусловленная барической перестройкой.

### 1.3 Стинг-джеты

Работы Шапиро и Кейзера внесли существенный вклад в понимание динамики циклонических систем, предложив теоретическую базу для описания их эволюции. Однако их модель не смогла полностью объяснить генезис экстремальных ветровых явлений в зонах холодного фронта и фронта окклюзии. Разрешение этой научной проблемы было достигнуто К. Браунингом, который идентифицировал ключевую роль «холодного конвейера» в формировании данных метеорологических явлений.

Согласно концепции Браунинга, процесс сепарации холодных воздушных масс от основного потока «холодной конвейерной ленты» приводит к образованию высокоскоростных нисходящих ветровых потоков, известных как стинг-джеты. Данные структуры характеризуются:

- вертикальным ускорением воздушных масс с достижением приземных скоростей более 150 км/ч;
- выраженным барическим градиентом в зоне сепарации;
- значительным адвективным охлаждением насыщенных воздушных масс.

Физико-динамические последствия стинг-джетов включают:

- катастрофические ветровые воздействия (выкорчевывание деревьев, разрушение инфраструктуры)
- интенсификацию фронтогенеза за счет усиленной конденсации водяного пара, формирования дополнительной фронтальной облачности, интенсификации осадкообразования.

С метеорологической точки зрения, данный феномен представляет собой проявление локальной симметричной неустойчивости в зоне фронтальной окклюзии. Механизм его развития включает:

- баротоклинную генерацию мезомасштабных вихрей;
- нелинейное взаимодействие стратифицированных потоков;
- диссипацию потенциальной энергии в кинетическую форму

Таким образом, исследования Браунинга позволили установить принципиально новый механизм циклонической эволюции, объясняющий экстремальные ветровые явления через динамику холодного конвейера и процессы мезомасштабной неустойчивости. [3]

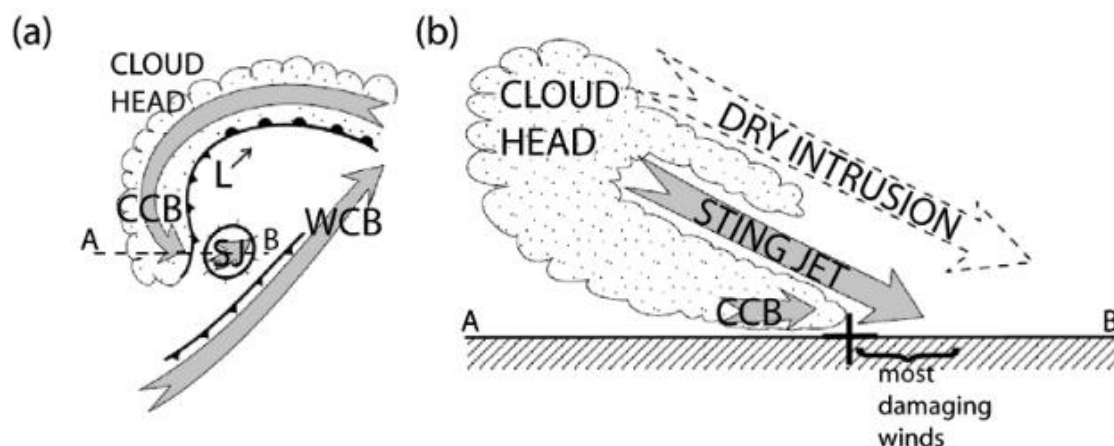


Рисунок 1.8 - Вертикальное поперечное сечение в области стинг-джета (SJ). (CCB: холодная конвейерная лента, WCB: теплая конвейерная лента),  
©Schultz and Browning (2017).

На стадии заполнения циклона в его центральной части происходит накопление теплого влажного воздуха, который оказывается полностью окружен холодными воздушными массами. Это создает резкие температурные контрасты на границах воздушных масс, способствуя усилению барических градиентов и общей неустойчивости системы. Особый интерес представляет исследование О. Мартинес-Альварado (2012), посвященное анализу зимних циклонов в Северной Атлантике.

В ходе изучения 100 штормовых циклонов за период 1989-2009 годов было установлено, что примерно в трети случаев наблюдалось образование стинг-джетов - мощных нисходящих воздушных потоков, отделяющихся от холодного конвейера. Это открытие позволило связать наличие стинг-джетов с экстремальным развитием циклонов. Физика процесса объясняется тем, что при

разделении холодного конвейера формируются узкие, но чрезвычайно мощные воздушные потоки, которые, ускоряясь в нисходящем движении, могут достигать у поверхности скорости свыше 150 км/ч. Такие ветры обладают значительной разрушительной силой, способной вызывать серьезные повреждения инфраструктуры.

Одновременно с этим происходит быстрое охлаждение влажного воздуха, приводящее к интенсивной конденсации и образованию дополнительной фронтальной облачности с сопутствующими осадками. Данный феномен, известный как локальная симметричная неустойчивость, существенно усиливает энергетику циклона и способствует его экстремальному развитию.

Таким образом, исследования последних десятилетий позволили не только выявить ранее неизученные механизмы циклогенеза, но и установить прямую связь между образованием стинг-джетов и усилением разрушительного потенциала внетропических циклонов. [4]

## ГЛАВА 2. ОПИСАНИЕ МОДЕЛИ WRF

Современная метеорология располагает целым рядом гидродинамических моделей для краткосрочного прогнозирования, среди которых особое место занимает система WRF (Weather Research and Forecasting). Эта модель представляет собой результат последовательного развития и совершенствования таких известных систем как MM5 и Eta, вобрав в себя их лучшие характеристики. Для данного исследования выбор пал именно на WRF не случайно - данная модель обладает рядом уникальных преимуществ. Ее универсальная архитектура позволяет эффективно работать в различных пространственных масштабах, от мезомасштабных процессов до глобальных атмосферных явлений. Особое значение имеет современная параметризация физических процессов, обеспечивающая высокую точность моделирования атмосферной динамики. Гибкая система координат и возможность использования вложенных сеток делают WRF особенно ценным инструментом для исследования специфических циклонов типа Шапиро-Кейзера.

Открытый код и модульная структура модели предоставляют широкие возможности для ее адаптации под конкретные исследовательские задачи. В контексте изучения нестандартных сценариев циклогенеза WRF демонстрирует особые преимущества благодаря усовершенствованной схеме взаимодействия атмосферы с подстилающей поверхностью, точной параметризации облачных и осадочных процессов, а также способности детально воспроизводить сложные фронтогенетические процессы. Все эти характеристики делают WRF незаменимым инструментом для исследования особенностей эволюции циклонов по модели Шапиро-Кейзера, где требуется особая точность в воспроизведении специфических динамических и термодинамических процессов. Возможности модели позволяют не только анализировать уже известные закономерности, но и выявлять новые аспекты в поведении атмосферных вихрей данного типа.

## 2.1 Общая характеристика WRF

Модель WRF (Weather Research and Forecasting) представляет собой современную мезомасштабную систему численного прогнозирования погоды, оснащенную инновационной системой ассимиляции данных нового поколения.

Разработка этого мощного вычислительного инструмента стала результатом масштабного международного сотрудничества - более 150 научных организаций из США и других стран объединили усилия под руководством Национального центра атмосферных исследований (NCAR). [5]

На сегодняшний день WRF зарекомендовала себя как одна из наиболее востребованных моделей в мировом метеорологическом сообществе, находя активное применение как в научно-исследовательской сфере, так и в оперативной работе национальных метеорологических служб. Ключевой особенностью модели является ее открытая архитектура - будучи доступной для свободного использования, система обладает исключительной гибкостью, позволяя исследователям модифицировать и адаптировать ее под решение специфических задач. [6]

Основная миссия разработчиков WRF заключалась в кардинальном улучшении качества прогнозирования мезомасштабных атмосферных явлений, что достигается за счет глубокой проработки физических параметризаций и внедрения передовых методов описания атмосферных процессов. [7]

Модель демонстрирует особую эффективность при моделировании конвективных процессов, эволюции фронтальных систем, циклонической активности и местных циркуляционных процессов. Благодаря открытому коду и модульному принципу построения, WRF продолжает активно развиваться мировым научным сообществом, постоянно расширяя спектр решаемых метеорологических задач и совершенствуя точность прогностических расчетов. Уникальное сочетание вычислительной эффективности, физической достоверности и гибкости делает WRF незаменимым инструментом как для

фундаментальных исследований атмосферных процессов, так и для прикладных задач прогнозирования опасных погодных явлений. [6]

## 2.2 Элементы программной системы WRF

Программная система WRF представляет собой комплекс взаимосвязанных компонентов, обеспечивающих высокоточное моделирование атмосферных процессов. В ее архитектуре можно выделить следующие ключевые элементы:

1. *Динамическое ядро модели* служит основой всей системы, реализуя фундаментальные уравнения гидродинамики и термодинамики атмосферы. Оно отвечает за численное решение уравнений Навье-Стокса и определяет базовые физические процессы атмосферной циркуляции. [6]
2. *Схемы параметризации* представляют собой набор специализированных алгоритмов, детализирующих различные физические процессы:
  - микропроцессы в облаках и осадках;
  - турбулентный обмен в пограничном слое;
  - радиационные потоки в атмосфере;
  - поверхностные процессы тепло- и влагообмена.
3. *Библиотека физических констант* содержит тщательно подобранные значения фундаментальных параметров:
  - универсальные газовые постоянные;
  - теплоемкости воздуха;
  - параметры фазовых переходов воды;
  - Коэффициенты переноса.
4. *Геофизические данные* включают три взаимосвязанных компонента:
  - топографические данные высокого разрешения;
  - почвенные характеристики (тип, влажность, температура);

- данные о землепользовании (растительность, урбанизированные территории, водные объекты).

5. *Инициализирующие данные* обеспечивают начальные условия моделирования:

- трехмерные поля метеорологических величин;
- анализ текущего состояния атмосферы;
- данные реанализа глобальных моделей.

6. *Граничные условия* определяют взаимодействие моделируемой области с окружающей атмосферой:

- периодическое обновление граничных параметров;
- согласование с данными глобальных моделей;
- учет крупномасштабных атмосферных процессов.

7. *Система ввода-вывода* обеспечивает:

- чтение входных данных различных форматов;
- запись результатов моделирования;
- организацию временного хранения данных;
- поддержку стандартов обмена метеорологической информацией.

8. *Менеджер параллельных вычислений* оптимизирует работу модели на современных вычислительных системах:

- распределение вычислительной нагрузки;
- эффективное использование ресурсов кластера;
- организацию межпроцессорного взаимодействия;
- балансировку загрузки процессоров.

Каждый из этих компонентов разработан с учетом требований модульности и гибкости, что позволяет адаптировать систему для решения широкого спектра задач - от оперативного прогнозирования до фундаментальных исследований атмосферных процессов. Особое внимание

уделено согласованности работы всех подсистем, что обеспечивает высокую точность и устойчивость моделирования. [7]

## **2.3 Структура программной системы WRF**

Модель WRF представляет собой модульную программную архитектуру, состоящую из множества автономных компонентов, функционально специализированных для выполнения конкретных задач на различных этапах вычислительного процесса. Структурно систему можно разделить на два основных блока: базовый программный каркас WRF Software Framework (WSF), формирующий ядро модели, и комплекс вспомогательных внешних модулей. К последним относятся: WRF Preprocessing System (WPS) - специализированная подсистема предварительной обработки входных данных; OBSGRID - модуль объективного анализа данных стандартных метеорологических наблюдений; а также набор инструментальных средств для визуализации и постпроцессинга результатов моделирования [8].

Каждый компонент системы обладает четко определенным функционалом: WSF обеспечивает базовую инфраструктуру для численного моделирования, WPS выполняет критически важные операции интерполяции и адаптации исходных данных к расчетной сетке, OBSGRID отвечает за интеграцию данных наблюдений в модель, а инструменты постпроцессинга позволяют проводить комплексный анализ и интерпретацию результатов.

Такая модульная архитектура обеспечивает высокую гибкость системы, позволяя адаптировать ее под конкретные исследовательские задачи, и способствует параллельному развитию отдельных компонентов без нарушения общей функциональности модели.

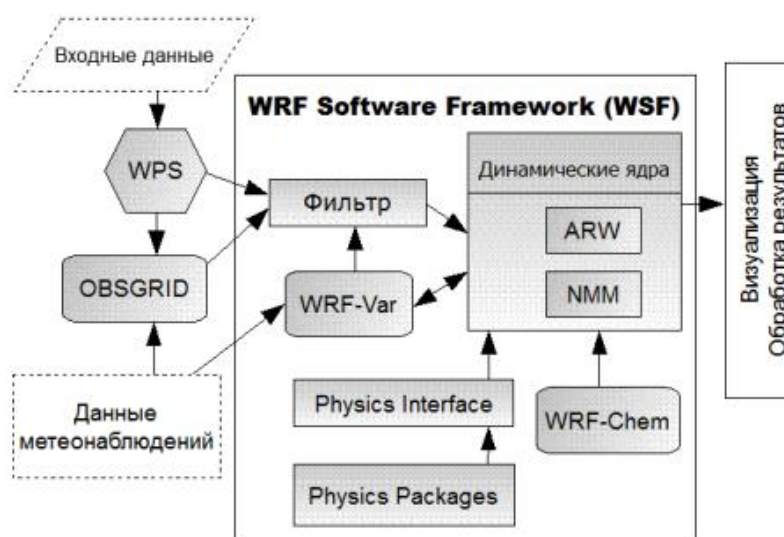


Рисунок 2.1 - Структура программной системы WRF

Система моделирования WRF включает в себя сложную архитектуру программного обеспечения, в центре которой находится WRF Software Framework (WSF). Эта структура объединяет два различных динамических ядра: усовершенствованную исследовательскую модель WRF (ARW) и негидростатическую мезомасштабную модель (NMM), каждая из которых использует различные численные подходы для моделирования атмосферы. Физические параметризации системы организованы в комплексные физические пакеты, которые обрабатывают процессы в субсетевом масштабе с помощью специализированных схем для микрофизики облаков, планетарного пограничного слоя, взаимодействия земли и поверхности и переноса излучения. Специальный физический интерфейс обеспечивает беспрепятственную связь между этими физическими параметризациями и динамическими ядрами. [8]

Возможности системы дополнительно расширяются благодаря модулю WRF Data Assimilation (WRFDA), который включает в себя передовые методы интеграции данных наблюдений в инициализацию модели. Для приложений, связанных с атмосферной химией, полностью связанный модуль WRF-Chem обеспечивает всестороннюю обработку химических процессов и взаимодействия аэрозолей с облаками. [8]

Ключевой архитектурной особенностью системы является ее совместимость с системой моделирования системы Земли (ESMF), что позволяет осуществлять двунаправленный обмен данными с внешними компонентами моделирования, такими как модели циркуляции океана и модели поверхности суши. Такая совместимость поддерживает приложения для моделирования земной системы с полным взаимодействием. [8]

WSF демонстрирует исключительную гибкость в работе с данными, поддерживая множество стандартных форматов метеорологических данных, как для входных, так и для выходных операций. Такая широкая совместимость форматов облегчает интеграцию с различными наборами данных наблюдений и результатами глобальных моделей. Модульная конструкция системы позволяет исследователям настраивать конкретные комбинации динамических ядер и физических параметризаций в соответствии с конкретными исследовательскими задачами или требованиями к прогнозированию.

Такая архитектурная особенность делает систему WRF универсальным инструментом для атмосферных исследований и оперативного прогнозирования в различных пространственных и временных масштабах.

В настоящее время система WRF обеспечивает поддержку пяти основных форматов данных для операций ввода-вывода, что обеспечивает гибкость работы с различными источниками метеорологической информации. Модель совместима с форматом GFS (Global Forecast System), используемым для обработки данных глобальных прогностических систем. Двоичный формат применяется для эффективного хранения и обработки больших массивов данных. Поддержка NetCDF (Network Common Data Form) позволяет работать с сетевыми данными, обеспечивая кроссплатформенную совместимость. Формат PHDFS предназначен для параллельной обработки данных в распределённых вычислительных системах. Кроме того, WRF поддерживает стандартные метеорологические форматы GRIB1 и GRIB2 (Gridded Binary), которые широко используются для хранения и передачи прогностических данных в оперативной

метеорологии. Такое разнообразие поддерживаемых форматов делает WRF универсальным инструментом, способным интегрироваться с различными источниками данных и системами обработки метеорологической информации.

Формат GFS представляет собой стандартизированный способ представления метеорологических данных, генерируемых моделями глобальной циркуляции атмосферы. Он включает комплексные поля метеорологических параметров, охватывающие всю земную поверхность с детализированным описанием множества атмосферных переменных. [9]

В научной практике особое предпочтение отдается формату NetCDF - специализированному стандарту для хранения и обработки научных данных, получившему широкое распространение в различных областях исследований благодаря своей универсальности и кроссплатформенной совместимости. [9]

Учитывая значительный объем метеорологической информации, в оперативной практике повсеместно применяется формат GRIB (GRIdded Binary), официально утвержденный Всемирной метеорологической организацией (ВМО). Этот стандарт был специально разработан для эффективного хранения и передачи метео данных, обеспечивая высокую степень их сжатия без существенной потери информативности. Особенности формата GRIB позволяют компактно представлять сложные сеточные данные, что делает его незаменимым инструментом в современной метеорологии, особенно при работе с большими массивами прогностической информации и обмене данными между различными метеорологическими службами и исследовательскими центрами. [9]

Модель WRF базируется на сложной архитектуре динамического ядра, выполняющего фундаментальные вычислительные операции для численного моделирования атмосферных процессов. Ядро осуществляет три ключевые функции: инициализацию начальных условий, численное интегрирование системы уравнений гидродинамики и термодинамики, а также формирование граничных условий для расчетной области. В текущей реализации WRF

предлагает исследователям выбор между двумя альтернативными динамическими ядрами - Advanced Research WRF (ARW) и Nonhydrostatic Mesoscale Model (NMM), различающимися принципиальными подходами к математическому моделированию. Эти различия проявляются в используемых численных схемах аппроксимации дифференциальных уравнений, системах вертикальной координации и базовых наборах прогностических переменных. [8]

Хотя ARW и NMM функционируют как независимые вычислительные модули, они разделяют общую концептуальную основу и ряд структурных элементов. Стратегия дальнейшего развития WRF предполагает конвергенцию этих ядер в рамках единой прогностической платформы, которая сохранит возможность выбора динамической основы, но унифицирует интерфейсы физических параметризаций. Особого внимания заслуживает ядро ARW, созданное в NCAR специально для регионального моделирования. Его отличительными особенностями являются: использование декартовой системы координат, оптимизация для задач ограниченной области и высокая адаптивность к различным пространственным масштабам. Эти характеристики делают ARW особенно ценным инструментом для фундаментальных исследований атмосферных процессов, позволяя достигать высокой точности при моделировании сложных мезомасштабных явлений. Гибкость архитектуры и открытость для модификаций способствуют широкому применению этого ядра в научном сообществе. [10]

Модель WRF использует систему негидростатических уравнений для сжимаемой жидкости, описывающих полную динамику атмосферных процессов. Особенностью математической формулировки является применение сигма-координаты в вертикальном направлении, которая адаптивно следует за рельефом подстилающей поверхности, что позволяет более точно учитывать орографические эффекты. Пространственная дискретизация уравнений реализована на сетке Аракавы типа «С», обеспечивающей оптимальное расположение переменных и высокую точность расчетов. [11]

Для временного интегрирования применяется комбинированная схема, сочетающая методы Рунге-Кутты третьего порядка (для медленных процессов) и второго порядка (для быстрых процессов), что достигается за счет использования техники расщепления. Такой подход позволяет существенно повысить вычислительную эффективность модели, поскольку разные временные шаги интегрирования применяются к различным по скорости физическим процессам: более мелкий шаг используется для акустических и гравитационных волн, в то время как крупный шаг - для относительно медленных адвективных процессов. [11]

Эта методика обеспечивает устойчивость численного решения при сохранении приемлемых вычислительных затрат, что особенно важно при моделировании сложных атмосферных явлений с широким диапазоном временных масштабов.

В ядре ARW использует специфическую систему прогностических переменных, организованную по принципу отклонений от гидростатического равновесия. В качестве основных расчетных параметров выступают аномалии температуры, геопотенциала и давления относительно их референсных значений в состоянии гидростатического баланса, а также трехмерные компоненты вектора скорости в декартовой системе координат.

Для описания физических процессов модель дополнена комплексом дополнительных параметров, включающих: турбулентную кинетическую энергию (характеризующую интенсивность перемешивания в пограничном слое), фазовые составляющие облачности (водяная, кристаллическая и смешанная фазы), влагосодержание в форме отношения смеси водяного пара, параметры осадкообразования, а также концентрации химических компонентов и атмосферных примесей. [8]

Такой подход к представлению метеорологических величин позволяет существенно повысить точность расчетов за счет отдельного учета равновесных

состояний и их отклонений, что особенно важно при моделировании мезомасштабных процессов с выраженной негидростатической динамикой. При этом расширенный набор физических переменных обеспечивает комплексное описание взаимодействий между динамическими, термодинамическими и микрофизическими процессами в атмосфере. [9]

В динамическом ядре NMM реализована система уравнений для полностью сжимаемой жидкости, математически разделенная на две компоненты: гидростатическую составляющую, описывающую равновесное состояние атмосферы, и негидростатическую часть, отвечающую за отклонения от этого равновесия.

Пространственная дискретизация уравнений выполняется на сетке Аракавы типа E, характеризующейся оптимальным расположением переменных для данного типа моделирования. Временное интегрирование осуществляется по схеме Адамса-Башфорта, при этом для обеспечения численной устойчивости при расчете отдельных параметров применяется комбинированный подход с использованием неявного метода Кранка-Николсона. [9]

Особенностью вертикальной координации в NMM является гибридная система, сочетающая сигма-координаты, точно следующие рельефу земной поверхности в нижних слоях атмосферы, с классической изобарической системой в верхних слоях. Переход между этими системами координат происходит на заданном пользователем уровне изобарической поверхности, что позволяет гибко адаптировать модель к различным условиям моделирования. [9]

Такая комбинированная система координат обеспечивает хорошее описание орографических эффектов в приземном слое при сохранении преимуществ изобарического представления в свободной атмосфере, что делает ядро NMM особенно эффективным для задач оперативного прогнозирования погоды. [9]

Моделирование в системе WRF начинается с определения расчетной области с помощью специализированного модуля WPS. Данный модуль использует прямоугольную область, заданную в одной из четырех картографических проекций, доступных в ядре ARW:

1. Коническая проекция Ламберта - требует задания двух стандартных параллелей и центрального меридиана, оптимальна для средних широт;
2. Полярная стереографическая проекция - применяется для высокоширотных регионов;
3. Проекция Меркатора - подходит для тропических областей;
4. Широтно-долготная проекция - используется для глобального моделирования, поддерживает функцию поворота полюсов.

Каждая проекция обладает специфическими параметрами конфигурации. В частности, коническая проекция Ламберта требует точного определения:

- двух стандартных параллелей (определяющих зону наименьших искажений);
- центрального меридиана (оси симметрии проекции);
- географических координат центра проекции.

Для глобальных исследований применяется широтно-долготная проекция, которая, в отличие от региональных проекций, равномерно покрывает всю земную поверхность. Выбор конкретной проекции осуществляется на этапе предварительной обработки данных и существенно влияет на точность моделирования, особенно в случаях сложного рельефа или при работе с протяженными расчетными областями. WPS автоматически преобразует исходные данные в выбранную систему координат, обеспечивая корректную пространственную привязку всех метеорологических параметров. [8]

Модель WRF обладает функционалом вложенных сеток (nesting), позволяющим значительно повысить детализацию расчетов в заданных

областях. Разрешение расчетной сетки, задаваемое в метрах или градусах на основном домене, является критическим параметром, непосредственно определяющим как точность моделирования, так и требуемые вычислительные ресурсы.

Следует учитывать, что уменьшение шага сетки вдвое приводит к квадратичному росту вычислительной нагрузки - количество необходимых операций увеличивается минимум вчетверо. Эта нелинейная зависимость делает выбор пространственного разрешения компромиссом между желаемой детализацией результатов и доступными мощностями вычислительной системы. При настройке модели исследователь должен тщательно балансировать между потребностью в высоком пространственном разрешении для адекватного воспроизведения мезомасштабных процессов и техническими ограничениями по времени расчетов и объему используемой памяти. Особенно важно это учитывать при работе с вложенными доменами, где увеличение разрешения на внутренних сетках может существенно повысить общую точность моделирования в ключевых областях, сохраняя при этом разумные вычислительные затраты на внешних доменах. Уменьшение шага сетки в 2 раза приводит к увеличению количества вычислений как минимум в 4 раза. [6]

Модель реализует технологию вложенных расчетных сеток, позволяющую концентрировать вычислительные ресурсы на заданных участках моделируемой области, существенно повышая пространственное разрешение в зонах особого интереса. Архитектура системы допускает создание многоуровневой иерархии вложений, где каждая последующая сетка может содержать дополнительные подсетки более высокого разрешения. Критически важным требованием при конфигурации таких систем является недопущение пространственного пересечения областей с разной глубиной вложенности, что могло бы привести к нарушению целостности расчетов. [11]

Особенностью реализации является сохранение единой вертикальной структуры на всех уровнях вложенности - количество уровней по вертикальной

координате остается постоянным вне зависимости от выбранного горизонтального разрешения на каждой конкретной сетке. Такая архитектура обеспечивает:

1. Согласованность атмосферных процессов между доменами;
2. Стабильность вертикального переноса параметров;
3. Сохранение физической корректности на границах вложенных областей.

При этом переход между сетками разного разрешения осуществляется через специальные буферные зоны, где происходит плавное согласование метеорологических полей. Технология вложенных сеток особенно востребована при моделировании локальных явлений (конвективных штормов, орографических эффектов), где требуется высокая детализация на фоне крупномасштабного атмосферного фона. Важно подчеркнуть, что хотя система и позволяет создавать сложные многоуровневые конфигурации, практическое количество вложений ограничивается как вычислительными ресурсами, так и требованиями к устойчивости численных алгоритмов при значительных перепадах разрешений между соседними доменами. [11]

#### *Блок предварительной обработки данных WPS*

Модуль WPS (WRF Preprocessing System) представляет собой комплекс из трех взаимосвязанных программ, предназначенных для подготовки входных данных перед запуском моделирования. Этот блок выполняет ключевые функции, обеспечивающие корректную инициализацию модели на основе реальных метеорологических данных. В рамках WPS реализуются следующие процессы:

1. Определение расчетной области и интерполяция данных:

Задаются границы моделируемой области и параметры расчетных сеток, после чего географические и статические переменные интерполируются на узлы

сетки. Это включает обработку топографии, типов почв и землепользования, которые критически важны для точности моделирования. [8]

## 2. Загрузка и обработка метеорологических данных:

Система поддерживает форматы GRIB и GRIB2, позволяя извлекать данные из глобальных моделей (например, GFS, ECMWF). Дополнительно интерполируются наземные параметры, такие как растительный покров, влажность почвы и температура поверхности. [12]

## 3. Адаптация данных к расчетной сетке:

Метеорологические поля, полученные из внешних источников, преобразуются в формат, совместимый с доменом WRF. Это включает горизонтальную и вертикальную интерполяцию параметров (температуры, давления, ветра, влажности) на узлы сетки модели. [10]

### *Модуль инициализации WRFDA*

Программа WRF Data Assimilation (WRFDA) формирует начальные и граничные условия, необходимые для старта моделирования. Данные автоматически генерируются на основе подготовленных WPS полей, которые задаются на изобарических поверхностях. В процессе инициализации выполняются:

### 1. Вертикальная интерполяция:

Метеопараметры преобразуются в выбранную систему координат (сигма или гибридную), что позволяет адаптировать вертикальную сетку под особенности моделируемых процессов. Для повышения точности в приземном слое может использоваться неравномерное распределение уровней.

### 2. Усвоение данных:

WRFDA поддерживает современные методы ассимиляции, включая:

- 3D-Var – трехмерный вариационный анализ, учитывающий пространственную корреляцию ошибок наблюдений;
- 4D-Var (требуется пакет WRFPLUS) – четырехмерный метод, дополнительно учитывающий временную эволюцию атмосферных процессов;
- Ансамблевое усвоение – статистический подход, улучшающий прогноз за счет обработки множества сценариев начальных условий.

Модуль WRFDA (Weather Research Forecast Data Assimilation), распространяется бесплатно и может быть интегрирован в вычислительный процесс для повышения точности моделирования, особенно при работе с реальными данными наблюдений. Комбинация WPS и WRFDA обеспечивает гибкую настройку модели под конкретные исследовательские или оперативные задачи. [12]

#### *Усвоение данных с помощью WRFDA-3DVAR*

Данный подход позволяет эффективно интегрировать в модель дополнительные данные наблюдений, не учтенные при первоначальном анализе. В процессе работы 3DVAR происходит пересчет метеорологических полей на модельной сетке с целью их максимального соответствия реальным измерениям в начальный момент времени. [13]

Особенностью данного метода является его способность обрабатывать разнородные данные наблюдений: сведения со стандартных метеорологических станций, радиолокационные измерения, спутниковую информацию, данные аэрологического зондирования.

WRFDA как программная реализация 3DVAR предоставляет исследователям мощный инструмент для:

- повышения точности начальных условий моделирования;

- коррекции систематических ошибок прогноза;
- интеграции различных типов метеорологических наблюдений;
- учета региональных особенностей метеоданных.

Метод демонстрирует высокую эффективность при работе с глобальными системами наблюдений, однако требует дополнительной адаптации для корректной обработки локальных данных, характерных для отдельных регионов. [14]

Основным принципом данной методики является сведение к минимуму определенного математического функционала:

$$J(x) = \frac{1}{2}(x - x^b)^T B^{-1}(x - x^b) + \frac{1}{2}(y - H(x))^T R^{-1}(y - H(x)) \quad (2.1)$$

$x$  – векторное состояние атмосферы;

$x^b$  – исходное состояние;

$y$  – наблюдения;

$H$  – оператор наблюдений;

$B$  – матрица ковариаций ошибок модели.

В системе WRF реализован комплексный подход к ассимиляции данных, основанный на современных методах статистического анализа. Для оценки ошибок прогнозирования применяется метод NMC (National Meteorological Center), позволяющий вычислять матрицу ошибок либо на основе архивных прогнозов самой модели, либо используя универсальные данные глобальной модели GFS. При этом учитываются региональные и сезонные особенности атмосферных процессов. Важным аспектом настройки системы является корректный подбор весовых коэффициентов, отражающих значимость различных типов ошибок в наблюдательных данных. [13]

Система поддерживает ассимиляцию 16 категорий метеорологических данных, включающих:

- наземные наблюдения с метеостанций;
- корабельные измерения;
- самолетные сводки
- спутниковую информацию;
- радиолокационные данные;
- профили ветра и другие специализированные наблюдения и др. [13]

Помимо классического трехмерного вариационного анализа (3DVAR), WRF предлагает более совершенные методы ассимиляции:

1. Четырехмерный вариационный анализ (4DVAR), учитывающий временную эволюцию атмосферных процессов;
2. Ансамблевые методы усвоения данных, основанные на статистическом анализе множества возможных состояний атмосферы.

Особый интерес представляют современные гибридные схемы, комбинирующие преимущества вариационных и ансамблевых подходов. В этих методах матрица ковариаций ошибок прогноза строится на основе ансамбля модельных реализаций, после чего используется в вариационном алгоритме, что значительно повышает точность ассимиляции. [15]

Дополнительно в системе реализована инновационная методика, объединяющая вариационный подход с фильтрацией Калмана. Этот метод основан на математическом доказательстве сходимости линейного фильтра к диффузионному процессу, что приводит к новой системе уравнений для оптимальной фильтрации, отличающейся от традиционных уравнений Калмана. Такой подход позволяет более эффективно учитывать нелинейные процессы в

атмосфере и улучшает качество прогноза, особенно для мезомасштабных явлений. [15]

*Модель WRF-Chem* представляет собой специализированный модуль системы WRF, предназначенный для комплексного моделирования атмосферной химии и аэрозольных процессов.

Данный модуль обеспечивает совместный расчет динамики воздушных масс и химических превращений, учитывая взаимодействие между метеорологическими параметрами и химическим составом атмосферы. В рамках модели рассматриваются процессы эмиссии, переноса, турбулентного перемешивания и химической трансформации газообразных загрязняющих веществ и аэрозольных частиц. [16]

WRF-Chem находит широкое применение при решении задач регионального мониторинга качества воздуха, исследования взаимосвязей между облачными процессами и химическим составом атмосферы, а также анализа влияния аэрозолей на радиационный баланс и формирование осадков.

Для корректной работы химического модуля требуется ввод дополнительных данных, описывающих различные источники загрязняющих веществ в атмосфере. К таким данным относятся как непосредственно поля выбросов (включая природную пыль, вулканические выбросы, продукты горения биомассы), так и параметры для расчета эмиссий (биогенные источники, антропогенные выбросы). [16]

Модуль поддерживает использование фоновых химических полей из глобальных моделей (таких как GOCART), что позволяет учитывать влияние крупномасштабных процессов на региональное распределение загрязняющих веществ. Особенностью WRF-Chem является возможность как непосредственного задания полей выбросов, так и их расчета внутри модели на основе параметризаций различных источников загрязнения, что обеспечивает

гибкость при моделировании сложных химико-метеорологических процессов в атмосфере. [16]

Модель WRF включает в себя специализированную *систему обработки и вывода результатов*, интегрированную в оба динамических ядра (ARW и NMM). Данная система выполняет комплекс задач по преобразованию и представлению модельной продукции, обеспечивая удобство ее дальнейшего анализа и использования. В рамках системы реализованы диагностические алгоритмы, которые рассчитывают дополнительные параметры, критически важные для составления синоптических прогнозов. Эти алгоритмы позволяют преобразовывать исходные модельные данные, выполняя интерполяцию метеорологических полей с исходных расчетных уровней на стандартные изобарические поверхности или уровни постоянной геометрической высоты. [17]

Результаты моделирования могут быть экспортированы в стандартном формате GRIB, что обеспечивает их совместимость с большинством современных метеорологических систем и позволяет эффективно передавать данные по каналам связи. [17]

Выходная информация включает около 200 различных параметров, комплексно описывающих состояние атмосферы, характеристики подстилающей поверхности и почвенного покрова. В число этих параметров входят как базовые метеорологические величины (температура, давление, ветер, влажность), так и специализированные характеристики, включая показатели поверхностного и грунтового стока, что особенно важно для гидрологических приложений. [17]

Такая детализированная информация позволяет проводить всесторонний анализ атмосферных процессов и их взаимодействия с земной поверхностью.

## 2.4 Параметризация физических процессов в модели

В современных атмосферных моделях, включая WRF, непрерывные метеорологические поля дискретизируются посредством расчетной сетки с конечным числом узлов. Такой подход, хотя и обеспечивает вычислительную эффективность, принципиально ограничивает возможность явного разрешения процессов, происходящих в микро- и мезомасштабах (меньших, чем шаг сетки). Однако эти субсеточные процессы оказывают существенное влияние на крупномасштабную атмосферную динамику и термодинамику, что требует их обязательного учета в моделировании.

### *Параметризация подсеточной турбулентности*

В модели ARW реализована многоуровневая система параметризации подсеточной турбулентности, предлагающая четыре альтернативных метода расчета коэффициентов турбулентного обмена.

Наиболее простой подход предполагает использование постоянных значений коэффициентов горизонтальной ( $K_h$ ) и вертикальной ( $K_v$ ) турбулентности, задаваемых пользователем. [17]

Более сложные методы включают: параметризацию на основе тензора горизонтальной деформации с применением замыкания первого порядка по Смагоринскому; трехмерное замыкание по Смагоринскому; а также метод, учитывающий турбулентную кинетическую энергию (ТКЕ) с замыканием порядка 1.5. Особенностью реализации является приоритет параметризации пограничного слоя - при ее активации расчет ( $K_v$ ) переопределяется соответствующим алгоритмом параметризации, независимо от выбранного метода расчета турбулентности. [6]

В ядре NMM подход к параметризации турбулентности отличается: коэффициент горизонтального обмена ( $K_h$ ) рассчитывается на основе модифицированного тензора деформации с дополнительным учетом вклада

ТКЕ, тогда как вертикальный коэффициент ( $K_v$ ) определяется исключительно параметризацией пограничного слоя. [17]

Такая дифференциация методов параметризации отражает фундаментальные различия в архитектуре динамических ядер и позволяет оптимально учитывать особенности турбулентного переноса в различных масштабах атмосферных процессов.

#### *Параметризация микрофизических процессов*

Модели ARW и NMM используют комплекс параметризаций для описания микрофизических процессов, связанных с гидрометеорами, обеспечивая тем самым учет фазовых переходов влаги и формирования осадков. В числе ключевых схем микрофизики следует отметить параметризацию Кесслера - простейшую одномоментную схему, учитывающую только жидкую фазу и применяемую преимущественно для идеализированных исследований облачных процессов. Более сложная схема Линн включает пять классов гидрометеоров, что позволяет достигать высокой точности при работе с реальными данными.

Семейство параметризаций WSM (WSM3, WSM5, WSM6), основанных на модифицированных схемах Хоббса и Ратледжа, предназначено для моделирования смешаннофазных облаков, причем различия между версиями обусловлены особенностями параметризации замерзания осадков. Параметризация Ферьера использует прогностические уравнения для общего влагосодержания и удельной влажности, что делает ее эффективной при описании микрофизических процессов в смешанной фазе.

Схема Томпсона учитывает несколько прогностических переменных, включая водяной пар, содержание льда, водность осадков и облаков, а также концентрацию облачных кристаллов, обеспечивая детализированное описание микрофизики. Параметризация Центра им. Годдарда, разработанная для моделирования конвективных облаков, дополнительно включает

прогностическое уравнение для крупного града, что расширяет ее применимость при изучении интенсивных осадков.

Наиболее сложной является двумоментная схема Моррисона, в которой прогнозируются не только отношения смеси, но и концентрации частиц, что позволяет более точно воспроизводить распределение гидрометеоров по размерам. Эта схема особенно востребована при исследовании облачных систем, требующих учета широкого спектра микрофизических процессов. Все перечисленные параметризации могут быть использованы в моделях ARW и NMM, обеспечивая гибкость при выборе оптимального уровня детализации микрофизических расчетов в зависимости от решаемой задачи.

#### *Расчет радиационных потоков*

В модели реализован комплексный подход к расчету радиационных потоков, включающий шесть специализированных схем - по три для коротковолнового и длинноволнового диапазонов соответственно.

Для моделирования длинноволнового излучения применяются следующие параметризации: схема RRTM (Rapid Radiative Transfer Model), основанная на методе коррелированных коэффициентов поглощения и обеспечивающая высокоточный расчет переноса излучения; схема GFDL, представляющая собой многополосный алгоритм, разработанный в Geophysical Fluid Dynamics Laboratory и использующий спектральное разрешение, калиброванное по линейным расчетам; а также схема CAM (Community Atmosphere Model), учитывающая влияние малых газовых компонентов и облачности различных масштабов. [18]

В коротковолновом диапазоне используются: схема Дудхия, выполняющая интегрирование радиационных потоков для облачных и безоблачных условий; многополосная схема Eta GFDL, включающая параметризацию озонового слоя и облачных эффектов; спектральная схема CAM NCAR, которая дополнительно

учитывает оптические свойства аэрозолей и малых газовых составляющих. [18, 19, 20, 21]

Особенностью реализации является возможность выбора различных комбинаций схем для коротко- и длинноволновой радиации в зависимости от решаемой задачи, что позволяет оптимально учитывать специфику радиационных процессов в различных географических условиях и при разных метеорологических ситуациях. [20]

Все схемы обеспечивают самосогласованный расчет взаимодействия радиации с облачностью, аэрозолями и основными парниковыми газами, что критически важно для корректного моделирования энергетического баланса атмосферы.

#### *Параметризация пограничного слоя*

Рассмотрим четыре основные параметризации пограничного слоя атмосферы, реализованные в модели WRF: MRF, YSU, MYJ и ACM2. Каждая из этих схем обладает уникальными особенностями в описании турбулентных процессов в приземном слое атмосферы.

Параметризация MRF (Medium Range Forecast) относится к классу нелокальных схем, учитывающих вклад крупномасштабных вихревых структур. Ее ключевой особенностью является расчет коэффициента вертикального обмена для количества движения, что позволяет более адекватно описывать перенос импульса в пограничном слое. Схема YSU (Yonsei State University), также являющаяся нелокальной, модифицирует подход MRF путем введения дополнительного слоя вовлечения на верхней границе пограничного слоя, что улучшает описание его взаимодействия со свободной атмосферой. [17]

В отличие от них, параметризация MYJ (Mellor-Yamada-Janjic) основана на уравнениях турбулентной кинетической энергии и относится к классу локальных схем. Ее характерной чертой является наличие ограничений на значения коэффициентов турбулентного обмена, что обеспечивает большую устойчивость

численного решения. Наиболее сложной из рассматриваемых является параметризация ACM2 (Asymmetric Convective Model), сочетающая в себе элементы конвективно-диффузионной модели и подход Блакадара. Эта схема обеспечивает точное описание вертикального переноса метеорологических величин за счет раздельного учета восходящих и нисходящих движений в пограничном слое. [17, 22, 23]

Выбор конкретной параметризации существенно влияет на качество моделирования процессов в пограничном слое, что особенно важно для задач, связанных с прогнозированием приземных характеристик и моделированием процессов тепло- и влагообмена между поверхностью и атмосферой. Каждая из рассмотренных схем имеет свои преимущества и области оптимального применения, определяемые как физической адекватностью описания процессов, так и вычислительной эффективностью реализации.

#### *Параметризация приземного слоя*

В модели реализован комплексный подход к параметризации процессов в приземном слое атмосферы, играющий ключевую роль в расчетах турбулентных потоков импульса ( $\tau$ ), скрытого тепла ( $E$ ) и явного тепла ( $H$ ). Эти параметры имеют фундаментальное значение не только для описания динамики пограничного слоя, но и для моделирования взаимодействия атмосферы с подстилающей поверхностью, включая процессы тепло- и влагообмена в почве и растительном покрове. [17]

Среди основных параметризаций приземного слоя в WRF выделяют четыре специализированные схемы. Классическая схема подобия MM5, основанная на теории Мони́на-Обухова, использует функции устойчивости Паулсона для определения коэффициентов обмена импульсом и теплом.

Модифицированная схема Eta, сохраняя общий теоретический подход, вводит дополнительные физические уточнения, включая параметризацию вязкого подслоя, различающуюся для морских и континентальных условий, а

также особый алгоритм расчета потоков влаги и тепла над этим слоем. [17, 22, 24]

Более сложная схема GFS расширяет физическую постановку задачи, учитывая отдельный вклад различных компонентов поверхностного баланса: транспирации растительности, испарения с почвы и открытых водных поверхностей. Наиболее комплексной является схема Плейма-Ксю, которая дополнительно включает параметризацию квазиламинарного сопротивления и дифференцированно описывает перенос химических компонентов, тепла и водяного пара, что особенно важно для задач химического моделирования атмосферы. [17]

Выбор конкретной схемы существенно влияет на точность воспроизведения процессов тепло- и влагообмена между поверхностью и атмосферой, определяя качество прогноза таких параметров как температура и влажность приземного слоя воздуха, скорость ветра у поверхности, а также формирование туманов и других приземных метеорологических явлений. Все схемы обеспечивают согласованный расчет коэффициентов турбулентного обмена с учетом стратификации атмосферы, но различаются степенью детализации физических процессов и адаптацией к различным типам подстилающей поверхности.

#### *Параметризация процессов на поверхности и в почве*

Моделирование процессов тепло- и влагообмена на поверхности суши и морского льда в WRF осуществляется с помощью специализированных одномерных параметризаций, которые интегрируют данные различных компонентов модели. Входными параметрами для этих расчетов служат: выходные данные моделей приземного слоя, радиационные потоки (как коротковолновые, так и длинноволновые), характеристики осадков и их перераспределения, а также детальная информация о свойствах поверхности и состоянии верхнего почвенного слоя. [17]

Ключевым результатом работы поверхностных параметризаций являются расчетные значения потоков явного и скрытого тепла, а также влаги с поверхности, которые затем используются в качестве граничных условий для моделирования вертикального переноса в пограничном слое атмосферы. Особенностью данных параметризаций является их одномерный характер - они учитывают только вертикальные потоки и не включают горизонтальный обмен в почвенном слое. Такой подход обусловлен необходимостью сохранения вычислительной эффективности при обеспечении достаточной точности описания поверхностно-атмосферного взаимодействия. [17]

В рамках этих моделей реализованы сложные алгоритмы, учитывающие: фазовые переходы воды в почве и на поверхности, теплопроводность и влагоперенос в почвенном профиле, влияние растительного покрова на процессы тепло- и влагообмена, особенности энергообмена на поверхностях морского льда. [17]

При этом модели различаются степенью детализации описания почвенных процессов - от простых схем с небольшим числом слоев до сложных параметризаций с подробным вертикальным разрешением. Все они обеспечивают согласованный расчет потоков на границе поверхность-атмосфера, что критически важно для корректного моделирования эволюции пограничного слоя и формирования приземных метеорологических характеристик.

В системе WRF реализовано несколько параметризаций для моделирования процессов тепло- и влагообмена на поверхности суши, различающихся по сложности и учитываемым физическим механизмам.

Наиболее простой является пятислойная модель термической диффузии, ограничивающаяся описанием только теплопереноса в почвенном профиле без учета влияния растительного покрова, что существенно снижает ее прогностическую ценность для метеорологических приложений. [6]

Более совершенная унифицированная модель Noah включает параметризацию суточных вариаций потенциального испарения и использует многослойное представление почвы с отдельными слоями для растительности и снежного покрова, что позволяет рассчитывать эволюцию температуры и влажности почвы, а также аккумуляцию воды на растительности и снежной поверхности. [17, 20]

Модель RUC (Rapid Update Cycle), сохраняя общую концептуальную схожесть с Noah, дополнительно учитывает процессы промерзания почвы и характеризуется более детализированной шестислойной структурой почвенного профиля глубиной до 3 метров, с возможностью моделирования одного или двух снежных слоев в зависимости от их толщины. [17,25]

Наиболее комплексной является модель Плейма-Ксю, использующая двухслойную схему «возбуждение-восстановление» для описания температурного режима и влажности почвы, с особым вниманием к процессам эвапотранспирации как ключевому механизму регуляции поверхностных потоков влаги. [17]

Каждая из этих моделей демонстрирует различную степень адекватности при описании взаимодействия поверхности с атмосферой, что позволяет выбирать оптимальную параметризацию в зависимости от решаемой научной или прикладной задачи.

#### *Параметризация конвекции*

WRF предоставляет гибкие возможности для учета конвективных процессов через различные схемы параметризации, либо позволяют полностью исключить их из расчетов при работе с высоким пространственным разрешением.

Среди ключевых параметризаций конвекции следует выделить схему Бетса-Миллера-Янича, основанную на концепции квазиравновесных профилей,

где предполагается баланс между вертикальной адвекцией и конвективным притоком тепла. [17]

Альтернативный подход реализован в схеме Кейна-Фрича, которая рассматривает единичное конвективное облако и предполагает преобразование 90% доступной потенциальной энергии посредством конвективных процессов. Данная схема используется в проводимом нами исследовании. [25]

Более сложные методы представлены ансамблевыми схемами Грела-Дэвени и Грела 3D. Первая из них сочетает статический и динамический контроль конвекции, используя комбинированные и возмущенные значения внешних параметров из различных источников. Модифицированная версия Грела 3D сохраняет основные принципы квазиравновесного состояния между компонентами ансамбля, но дополнительно учитывает эффекты опускания воздушных масс вблизи кучевых облаков, что существенно улучшает описание процессов конвективного теплообмена. Эти усовершенствования позволяют более точно моделировать взаимодействие между конвективными ячейками и окружающей атмосферой, особенно в условиях сложного мезомасштабного окружения. [26, 27]

Все перечисленные схемы демонстрируют различную эффективность в зависимости от пространственного разрешения модели и характеристик моделируемой конвекции, что требует тщательного выбора параметризации для конкретных исследовательских или прогностических задач. Особое значение имеет способность схем учитывать не только восходящие потоки, но и компенсирующие нисходящие движения, что критически важно для корректного описания энергетического баланса в конвективных системах.

## ГЛАВА 3. МОДЕЛИРОВАНИЕ ЦИКЛОНОВ ПО ТИПУ ШАПИРО-КЕЙЗЕРА

### 3.1 Использование NCL и изобарические уровни

*NCAR Command Language* (NCL) – это специализированный язык программирования и среда для анализа и визуализации научных данных, разработанные Национальным центром атмосферных исследований (NCAR) в США. NCL особенно популярен в метеорологии, климатологии и океанографии благодаря мощным возможностям обработки сеточных данных (например, модельных выходов и спутниковых наблюдений).

С помощью NCL можно проводить анализа больших научных данных (NetCDF, GRIB, HDF и др.), создавать визуализации метеорологических и климатических данных (карты, вертикальные разрезы, временные серии и т. д.), автоматизировать обработку данных (скрипты для регулярных расчетов, что используется в данной работе), сравнивать модельные данные с наблюдениями (верификация моделей). [29]

NCL имеет множество плюсов:

- Оптимизирован для научных данных – встроенная поддержка NetCDF, GRIB, HDF;
- Мощная графика – высококачественные карты, анимации, сложные графики;
- Широкие возможности статистики – интерполяция, регрессия, спектральный анализ;
- Кроссплатформенность – работает на Linux, macOS, Windows (через WSL или Cygwin);
- Интеграция с другими инструментами (Python через PyNIO/PyNGL, R, CDO).

NCAR Command Language активно используется для анализа и визуализации данных, связанных с циклонами, благодаря своей специализированной направленности на работу с метеорологическими и климатическими данными. Одним из ключевых применений NCL является визуализация траекторий циклонов, полученных из различных моделей, таких как WRF, ERA5 или GFS. Это позволяет исследователям наглядно отслеживать пути движения циклонов, что особенно важно для прогнозирования их развития и потенциального воздействия.

Кроме того, NCL эффективно применяется для анализа полей атмосферных параметров, включая давление, ветер и осадки. С его помощью строятся детальные карты аномалий, вертикальные разрезы и другие графические представления, которые помогают выявлять ключевые особенности структуры циклонов. Например, можно проанализировать распределение давления в центре вихря или изучить вертикальную структуру ветровых полей, что важно для понимания интенсивности и эволюции циклона. [29]

Ещё одной важной задачей, решаемой с помощью NCL, является сравнение модельных данных с реальными наблюдениями, полученными со спутников, радаров и метеорологических станций. Это позволяет оценивать точность модельных прогнозов и корректировать параметры моделирования. NCL поддерживает работу с различными форматами данных (NetCDF, GRIB), что упрощает процесс сопоставления и верификации. [29]

Для более глубокого анализа циклонической активности в NCL реализованы методы расчёта специализированных индексов, таких как Eady Growth Rate, который используется для оценки баротропной неустойчивости атмосферы — важного фактора в развитии циклонов. Эти расчёты помогают исследователям количественно оценивать условия, способствующие усилению или ослаблению вихрей. [28]

Наконец, NCL позволяет создавать анимации, наглядно демонстрирующие эволюцию циклона во времени. Это может быть визуализация движения вихря, изменения его интенсивности или трансформации связанных с ним атмосферных фронтов. Такие анимации полезны как для научного анализа, так и для образовательных целей, поскольку делают сложные атмосферные процессы более понятными.

Таким образом, NCL остаётся востребованным инструментом в исследованиях циклонов, несмотря на постепенный переход к альтернативным платформам, таким как Python. Его преимущества — удобство работы с научными данными, мощные графические возможности и богатая библиотека готовых решений — делают его ценным ресурсом для метеорологов и климатологов.

### *Изоэнтропические уровни*

Изоэнтропический анализ представляет собой важный метод диагностики атмосферных процессов, основанный на изучении движения воздушных масс вдоль изоэнтропических поверхностей, то есть поверхностей постоянной потенциальной температуры ( $\theta$ ). [30]

Этот метод широко применяется в исследованиях циклогенеза, поскольку позволяет эффективно выявлять адвекцию воздушных масс и анализировать их стратификацию. Одним из ключевых преимуществ изоэнтропического анализа является возможность изучения вертикальных движений в атмосфере, что имеет принципиальное значение для понимания механизмов развития циклонов. [30]

Кроме того, данный подход дает возможность исследовать процессы взаимодействия между тропосферой и стратосферой, а также точно определять области восходящих и нисходящих потоков, что критически важно для прогнозирования эволюции циклонов. [30]

Использование изоэнтропических координат существенно упрощает уравнения движения, поскольку адиабатические процессы не влияют на

потенциальную температуру, что делает анализ более наглядным и удобным для интерпретации.

Применение изоэнтропического анализа в моделировании циклонов включает несколько ключевых аспектов. Во-первых, он позволяет изучать адвекцию влажности и вихря, что помогает выявлять зоны конвергенции, играющие важную роль в циклогенезе. Во-вторых, метод обеспечивает эффективную диагностику вертикальных движений: восходящие потоки вдоль изоэнтропических поверхностей служат индикаторами зон интенсивного развития циклона. В-третьих, изоэнтропический анализ используется для исследования стратосферно-тропосферного обмена, что особенно актуально для углубляющихся циклонов, в которых может наблюдаться опускание стратосферного воздуха. [1, 30]

Таким образом, изоэнтропический анализ является мощным инструментом в метеорологии, позволяющим глубже понять динамику циклонов и улучшить их прогнозирование.

### **3.2 Адаптация модели для региона**

В данной работе оценены возможности использования мезомасштабной модели WRF для краткосрочного прогноза циклонов по типу Шапиро-Кейзера в области Атлантики.

Модель с заданными параметрами сетки (таблица № 3.1) предназначена для исследования циклонов типа Шапиро-Кейзера в средних и высоких широтах. Конфигурация расчетной области размером 560×560 км с разрешением 8 км обеспечивает охват мезомасштабных атмосферных процессов, характерных для данного типа циклонов, при сохранении вычислительной эффективности.

Использование полярной стереографической проекции оптимально для моделирования высокоширотных систем, минимизируя искажения в интересующем регионе.

Вертикальная структура модели представлена 37 уровнями, что позволяет адекватно разрешать ключевые динамические и термодинамические процессы во всей тропосфере до верхней границы в 20 км (5000 Па).

Шаг интегрирования в 60 секунд обеспечивает численную устойчивость при заданном горизонтальном разрешении.

Такая конфигурация особенно эффективна для анализа специфических особенностей циклонов по Шапиро-Кейзеру, включая их фронтальную структуру, эволюцию теплого сектора и взаимодействие с крупномасштабным потоком, что требует точного учета процессов на всем вертикальном протяжении атмосферы.

Таблица № 3.1 - Параметры используемой сетки

| Параметр                        | Значение                            |
|---------------------------------|-------------------------------------|
| Размер области (км)             | 560x400                             |
| Разрешение сетки                | 8000 м                              |
| Верхняя граница модели          | 5000 Па (~20 км)                    |
| Шаг интегрирования              | 60 сек                              |
| Количество вертикальных уровней | 37                                  |
| Проекция                        | Полярная стереографическая проекция |

Модель WRF с указанными параметрами (таблица № 3.2) облачной физики обеспечивает комплексное моделирование циклонов типа Шапиро-Кейзера, учитывая ключевые процессы взаимодействия облачности с динамикой атмосферы.

Трехклассовая микрофизическая схема WSM (Water Species Microphysics) отдельно описывает водяной пар, облачные капли и ледяные кристаллы, что

критически важно для корректного воспроизведения фазовых переходов влаги в облачных системах циклона.

Параметризация длинноволнового излучения RRTM (Rapid Radiative Transfer Model) с высокой точностью учитывает радиационное взаимодействие облаков и осадков с атмосферой, особенно в условиях сложной стратификации, характерной для циклонов данного типа.

Схема коротковолновой радиации Dudhia обеспечивает реалистичное описание поглощения и рассеяния солнечной радиации в облачных полях, что существенно для энергетического баланса системы.

Параметризация пограничного слоя YSU (Yonsei University) с включенным слоем вовлечения адекватно воспроизводит турбулентные потоки на границе раздела атмосферы и поверхности, играющие ключевую роль в эволюции циклона.

Схема кучевой конвекции Kain-Fritsch учитывает до 90% преобразования доступной потенциальной энергии в конвективные процессы, что особенно важно для моделирования мезомасштабных конвективных элементов в структуре циклона.

Такая комбинация параметризаций оптимально подходит для исследования особенностей облачной структуры циклонов Шапиро-Кейзера, включая формирование Т-образных облачных конфигураций, эволюцию фронтальных облачных систем и взаимодействие конвективных элементов с крупномасштабным потоком. Выбранные схемы обеспечивают сбалансированное описание как микрофизических процессов в облаках, так и их радиационного воздействия.

Таблица № 3.2 - Параметры облачности используемой сетки

| Параметр                 | Значение     |
|--------------------------|--------------|
| Микрофизика облаков      | WSM3         |
| Длинноволновая радиация  | RRTM         |
| Коротковолновая радиация | Dudhia       |
| Пограничный слой         | YSU          |
| Кучевая конвекция        | Kain-Fritsch |

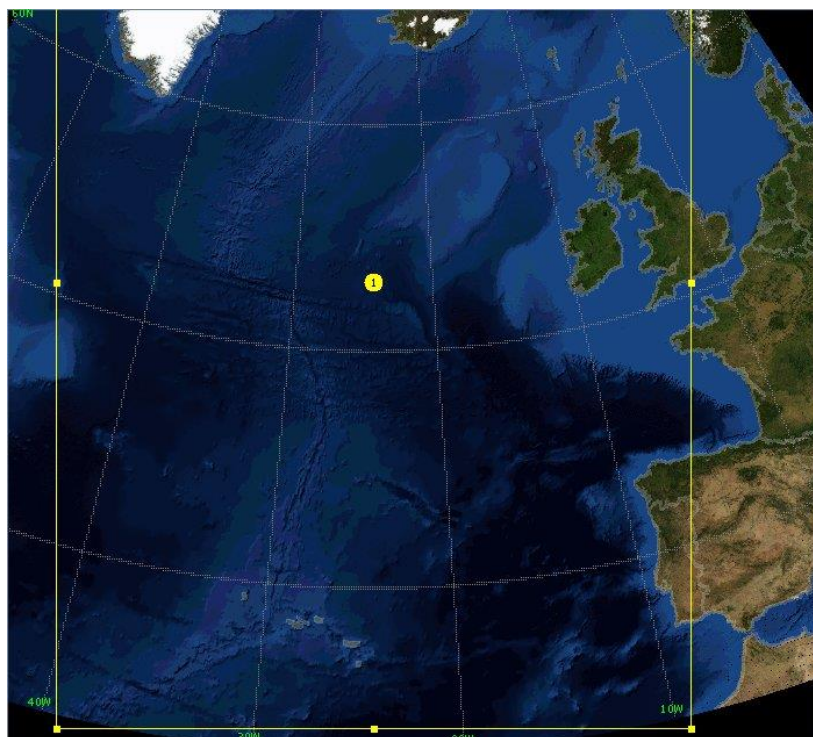


Рисунок 3.1 – Область моделирования WRF

### 3.3 Синоптическая обстановка

Был выбран случай для даты образования циклона 05.10.2023 года. В период с 5 по 7 октября 2023 года циклон типа Шапиро-Кейзера, сформировавшийся над западной Атлантикой, оказал существенное влияние на погодные условия в Северной Атлантике и Западной Европе. Наиболее сильное воздействие циклона наблюдалось 7 октября, когда он достиг Исландии, находясь в стадии максимальной интенсивности. Одновременно фронтальная

система циклона принесла интенсивные осадки. Близлежащие аэропорты были вынуждены отменить часть рейсов из-за опасной турбулентности и сильного бокового ветра.

Британские острова оказались под влиянием тыловой части циклона в период с вечера 6 по 7 октября. В Шотландии и Северной Ирландии зафиксированы шквалы со скоростью ветра 25-28 м/с (90-100 км/ч), а на Гебридских островах порывы достигали 30 м/с. Холодный фронт циклона вызвал локальные ливни с градом, особенно заметные в западной Шотландии. Транспортная инфраструктура Великобритании также испытала трудности - в Северной Англии и Шотландии произошли задержки поездов из-за подтопления путей.

Основное воздействие данного циклонического образования в течение большей части его жизненного цикла было сосредоточено на акватории Атлантического океана, где наблюдались наиболее выраженные синоптические и океанографические эффекты.

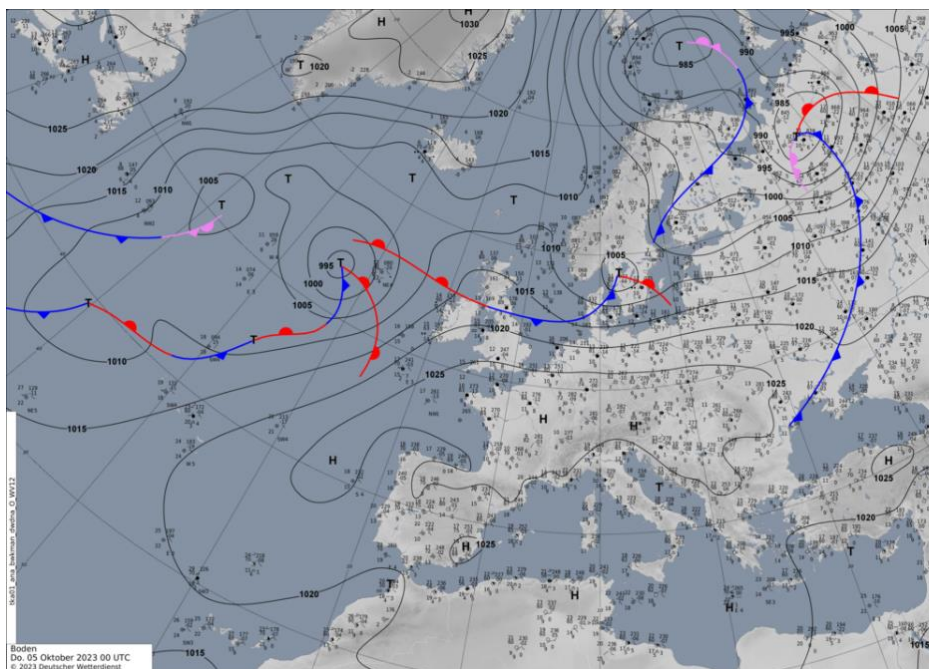


Рисунок 3.2 – Приземная карта на 05.10.2023 00 (UTC)

(<https://www.wetterzentrale.de>)

### 3.4 Применение WRF на практике

#### *Давление*

В рамках проведения численного моделирования с использованием модели WRF были получены и проанализированы карты распределения метеорологических параметров, характеризующих структуру циклонов типа Шапиро–Кейзера.

В частности, были визуализированы поля температуры на изобарических уровнях 700 и 850 гПа. Дополнительно рассчитаны и построены карты атмосферного давления, приведенного к уровню моря, поля удельной влажности на высоте 700 и 850 гПа и изоэнтропических поверхности 200К.

Для детального анализа фронтальной зоны выполнен вертикальный разрез, отражающий пространственную изменчивость термодинамических и динамических характеристик в поперечном сечении фронтальной системы. Полученные результаты позволяют исследовать структуру циклона, динамику фронтогенеза и эволюцию синоптического объекта в рамках заданной параметризации модели.

Было смоделировано давление. На начальном этапе, соответствующем 00:00 UTC 5 октября, в акватории Северной Атлантики (35-45°N, 25-35°W) наблюдается зарождение барической депрессии с давлением в центре около 1000-1010 гПа. В течение последующих часов происходит постепенное углубление циклона - к 06:00 UTC того же дня давление в центре понижается до 990-1000 гПа при одновременном усилении ветрового поля до 10-12 м/с, что свидетельствует об активной фазе циклогенеза. К 12:00 UTC 5 октября циклон достигает стадии максимальной интенсивности с минимальным давлением 990-980 гПа и хорошо выраженной циклонической циркуляцией, охватывающей обширный регион от 40°N до 45°N. В этот период отмечается четкая фронтальная структура с контрастными градиентами температуры и влажности.

К 3:00 UTC давление в центре постепенно доходит до 970 гПа, при этом смещаясь в северо-восточном направлении (50-55°N).

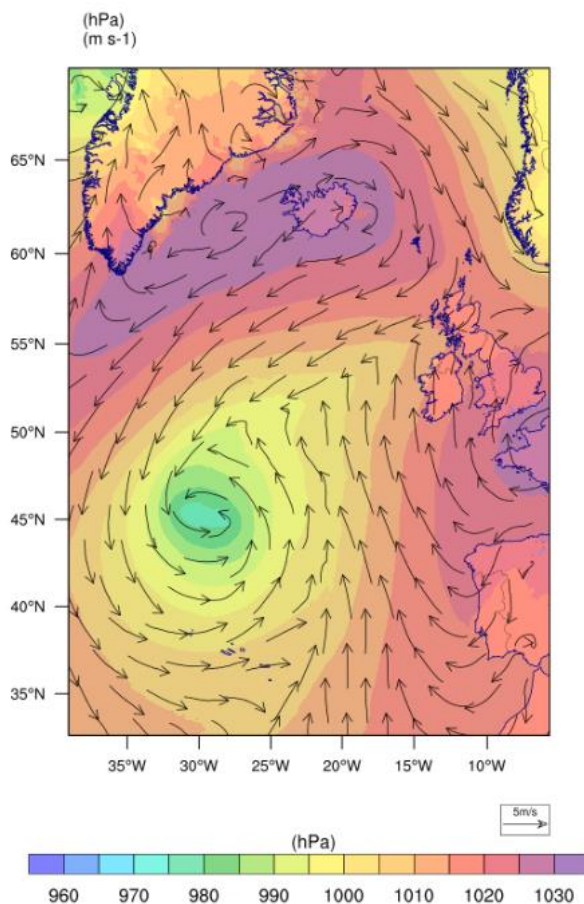


Рисунок 3.3 – Давление у поверхности 06.10.23 18:00 UTC (WRF)

### *Температура на высотах*

Была смоделирована температура на высотах 700 и 850 гПа.

#### *А) 700 гПа*

В начальный момент времени (00:00 UTC 5 октября) на поверхности 700 гПа наблюдается выраженный температурный градиент, характерный для формирующегося циклонического вихря. В тыловой части циклона (западный сектор) отмечаются минимальные температуры порядка -12...-16°C, что соответствует вторжению холодного арктического воздуха. В восточной (теплой) части циклона фиксируются более высокие температуры,

формирующие зону теплой адвекции. Такой контраст температур свидетельствует об активном фронтогенезе и соответствует ранней стадии циклогенеза.

К 12:00 UTC температурное поле демонстрирует усиление меридионального градиента: холодный воздух ( $-4...-8^{\circ}\text{C}$ ) проникает южнее  $50^{\circ}\text{N}$  по западной периферии циклона, в то время как теплый сектор смещается на северо-восток. Эта динамика отражает углубление циклона и формирование выраженного теплого фронта в восточной части и холодного фронта в юго-западной.

6 октября 11:00 UTC отмечается, что сектор приобретает форму узкого языка ( $0...+4^{\circ}\text{C}$ ), что соответствует классической модели окклюдированного циклона по Шапиро–Кейзеру.

14:00 UTC четко видно изолированное ядро тепла.

К 18:00 UTC начинается разрушение термодинамической структуры: температурный градиент уменьшается, холодное ядро фрагментируется, а теплая адвекция ослабевает. К 00:00 UTC 7 октября циклон переходит в стадию заполнения, что проявляется в выравнивании температурного поля на большей части области и потере пространственной когерентности.

Анализ динамики температуры на 700 гПа подтверждает, что смоделированный циклон развивался в соответствии с канонической схемой Шапиро–Кейзера: от начального фронтогенеза через стадию окклюзии до заполнения. Наблюдаемые особенности (резкий температурный градиент, асимметрия теплого/холодного секторов, стратосферное опускание) согласуются с теоретическими представлениями о динамике интенсивных фронтальных циклонов средних широт.

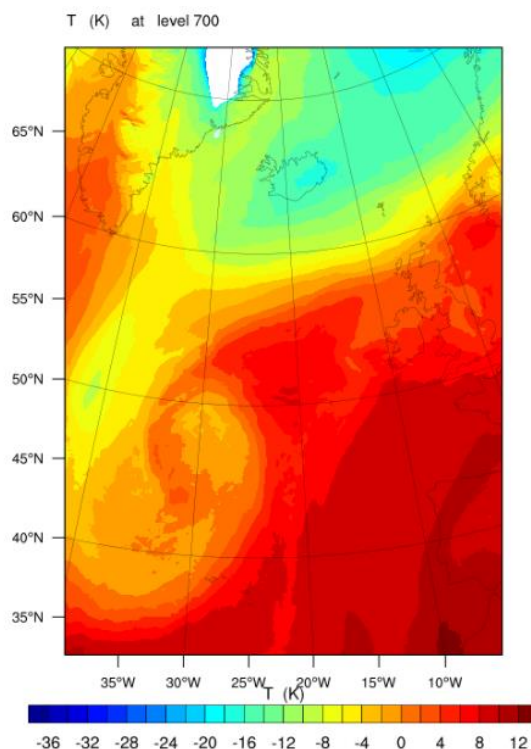


Рисунок 3.4 – Температура (C) на высоте 700 гПа для 06.10.2023 14:00 UTC (WRF)

#### Б) 850 гПа

Прослеживается термодинамическая эволюция циклона. В начальный момент времени (00:00 UTC 5 октября) на уровне 850 гПа наблюдается формирование выраженного температурного градиента между теплым ( $0...+4^{\circ}\text{C}$ ) и холодным ( $-12...-16^{\circ}\text{C}$ ) секторами, что соответствует ранней стадии циклогенеза. Теплый воздух сосредоточен в восточной части циклона ( $40-50^{\circ}\text{N}$ ,  $20-30^{\circ}\text{W}$ ), в то время как холодные массы располагаются в тыловой западной зоне. По сравнению с уровнем 700 гПа, где температуры были ниже ( $-8...-12^{\circ}\text{C}$  в теплом секторе), на 850 гПа контраст выражен более резко, что подчеркивает важную роль приземного слоя в развитии фронтальной зоны.

К 06:00 UTC происходит углубление циклона, проявляется в усилении меридионального температурного градиента, проникновении холодного воздуха южнее  $45^{\circ}\text{N}$  по западной периферии и формировании узкого языка теплого воздуха ( $+4...+8^{\circ}\text{C}$ ) в восточном секторе.

В фазе максимального развития (12:00 UTC) прослеживается язык теплого воздуха (+4...+8°C) в восточной части циклона и резкий фронтальный раздел между воздушными массами.

К 18:00 UTC отмечается поднятие теплого сектора и расширение области холодного воздуха, смещение фронтальной зоны к северо-востоку

К 00:00 UTC 6 октября циклон переходит в стадию заполнения, температурное поле выравнивается (-8...-12°C на большей части области), исчезает выраженный теплый сектор.

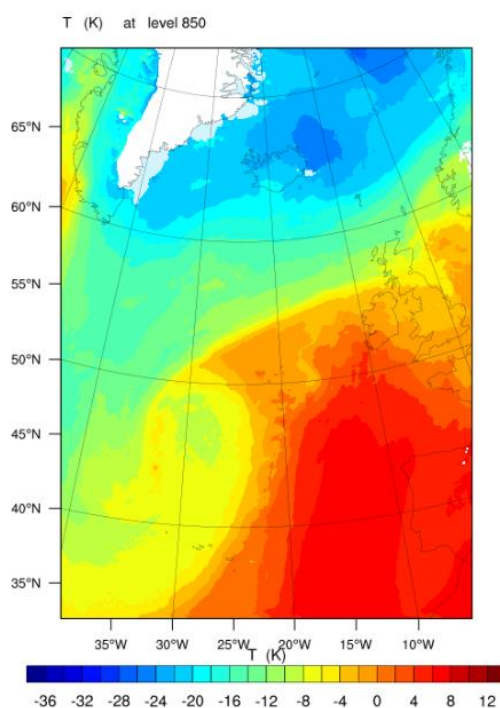


Рисунок 3.5 – Температура на высоте 850 гПа для даты 06.10.2023 09:00 (UTC)

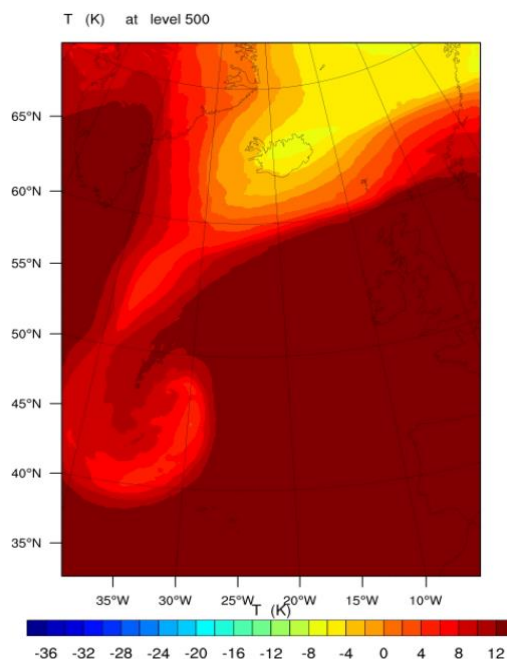


Рисунок 3.6 – Температура (C) на высоте 500 гПа для даты 06.10.2023 09:00 (UTC)

Сравнивая значения на двух выбранных уровнях, можно сделать выводы:

1. Верхняя граница пограничного слоя(850 гПа) демонстрирует более резкие температурные контрасты.
2. Процесс окклюзии инициируется нисходящим сухим стратосферным воздухом, который проникает в тыловую часть циклона на больших высотах. Этот нисходящий поток "отрезает" теплый сектор циклона от его центра сверху.
3. Заполнение циклона происходит практически синхронно по вертикали, но с сохранением остаточных градиентов на 850 гПа.

#### *Удельная влажность*

Для водяного пара были построены несколько карт распределения.

#### А) 850 гПа

В начальный момент времени (00:00 UTC 5 октября) на уровне 850 гПа наблюдается четкое пространственное распределение влажности, характерное

для ранней стадии циклогенеза. В теплом секторе циклона (восточная и юго-восточная части) фиксируются повышенные значения удельной влажности (0.008–0.012 кг/кг), что связано с адвекцией теплых и влажных воздушных масс с океанических регионов. В тыловой (западной) части циклона отмечаются более сухие условия (0.002–0.004 кг/кг), обусловленные вторжением холодного континентального воздуха. Такой контраст влажности подчеркивает формирование фронтальной зоны и соответствует начальной стадии развития циклона.

К 06:00 UTC происходит усиление градиента влажности: в теплом секторе значения достигают 0.010–0.012 кг/кг, в то время как в холодном секторе они остаются низкими (0.001–0.003 кг/кг). Это свидетельствует об углублении фронтальной структуры.

К 12:00 UTC, в фазе максимальной интенсивности циклона, наблюдается замкнутая область повышенной влажности (0.008–0.012 кг/кг) в восточной и северо-восточной частях циклона, что соответствует зоне теплого фронта и связанных с ним восходящих движений. Одновременно в западной и северо-западной частях сохраняются сухие условия (0.001–0.003 кг/кг), отражающие нисходящие движения в тыловой части циклона. Такое распределение влажности подтверждает наличие хорошо развитой фронтальной системы и соответствует классической модели циклона Шапиро–Кейзера.

К 18:00 UTC начинается процесс окклюзии, что проявляется в уменьшении контраста влажности между теплым и холодным секторами. Влажный воздух (0.006–0.008 кг/кг) распространяется на север, в то время как сухой воздух (0.002–0.004 кг/кг) постепенно заполняет центральную часть циклона. Это отражает смыкание теплого и холодного фронтов и переход циклона в стадию заполнения.

К 00:00 UTC 6 октября циклон окончательно теряет свою структуру: градиент влажности сглаживается, а значения выравниваются (0.004–0.006 кг/кг)

на большей части области. Это свидетельствует о завершении жизненного цикла циклона и переходе его в стадию заполнения.

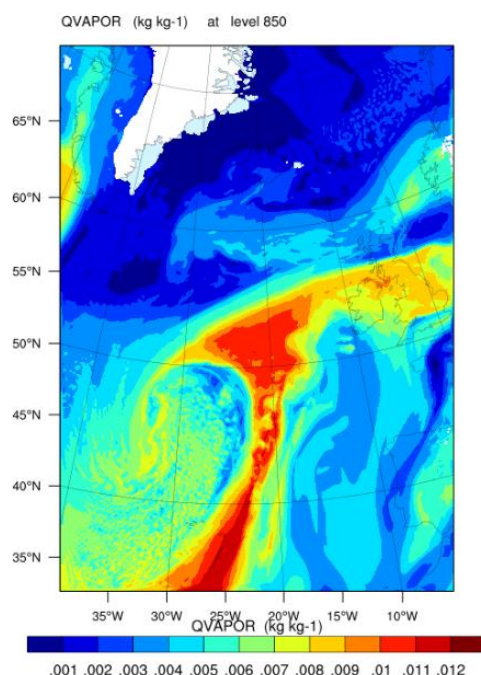


Рисунок 3.7 – Удельная влажность на высоте 850 гПа для 06.10.2023 12:00 (UTC)

Анализ динамики удельной влажности на уровне 850 гПа подтверждает, что смоделированный циклон развивался в соответствии с классической схемой Шапиро–Кейзера. Наблюдаемые особенности (резкий градиент влажности, спиральное распределение влажных и сухих воздушных масс, эволюция фронтальной зоны) согласуются с теоретическими представлениями о динамике интенсивных фронтальных циклонов средних широт.

#### Б) 700 гПа

На начальной стадии (00:00 UTC 5 октября) на уровне 700 гПа наблюдается отчетливая пространственная дифференциация влажности. В восточном секторе циклона отмечаются повышенные значения удельной влажности (0.006-0.008 кг/кг), что связано с адвекцией влажных воздушных масс в зоне теплого фронта. В то же время в тыловой (западной) части циклона фиксируются пониженные

значения (0.002-0.003 кг/кг), характерные для сухого холодного воздуха. Такой контраст подчеркивает формирующуюся фронтальную зону.

В период 06:00-12:00 UTC происходит интенсификация влажностного градиента. В восточной периферии циклона формируется выраженный язык повышенной влажности (0.007-0.009 кг/кг), что соответствует зоне активного восходящего движения воздуха. Одновременно в западном секторе сохраняются минимальные значения (0.001-0.002 кг/кг), отражающие нисходящие движения в тыловой части циклона. Такое распределение характерно для фазы максимального развития циклона.

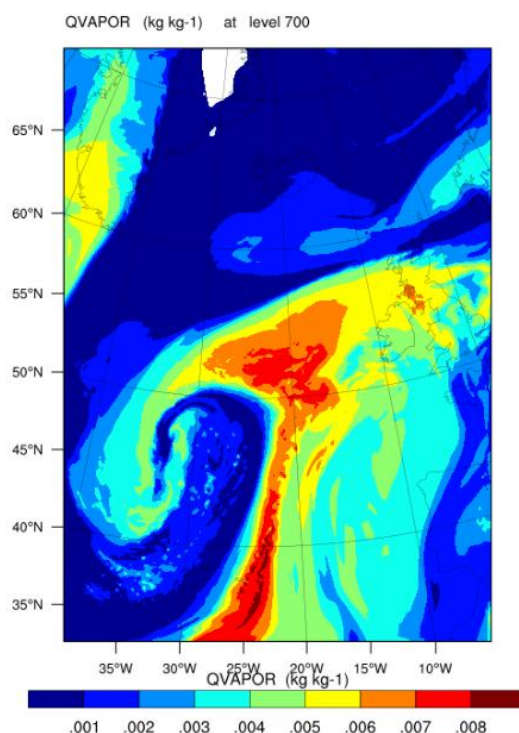


Рисунок 3.8 – Удельная влажность на высоте 700 гПа для 05.10.2023 12:00 (UTC)

На стадии окклюзии (18:00 UTC) наблюдается уменьшение контраста влажности между секторами, постепенное выравнивание поля, смещение области максимальной влажности (0.005-0.006 кг/кг) к северо-востоку

К 00:00 UTC 6 октября циклон переходит в стадию заполнения, что проявляется в дальнейшем снижении градиентов влажности, уменьшении максимальных значений влажности до 0.004-0.005 кг/кг, потере четкой пространственной организации влажностного поля.

Сравнительный анализ влажности на 700 гПа и 850 гПа показывает общие закономерности эволюции влажностных полей. Градиенты более выражены на 850 гПа.

Для верификации временной задержки в проявлении стадии окклюзии в различных слоях тропосферы было выполнено моделирование термодинамических параметров на изобарической поверхности 500 гПа. Результаты моделирования демонстрируют, что пространственное распределение удельной влажности на данном уровне (5-6 км) воспроизводит структурную организацию, аналогичную наблюдаемой на уровне 700 гПа с временным запаздыванием приблизительно 24 часа.

Этот феномен подтверждает теоретические представления о вертикальной стратификации процессов окклюзии в циклонах Шапиро-Кейзера, где термическая и влажностная сигнатуры окклюзионного процесса первоначально формируются в средней тропосфере (700 гПа); с временной задержкой, обусловленной инерционностью вертикального переноса воздушных масс, аналогичные паттерны проявляются на 500 гПа.

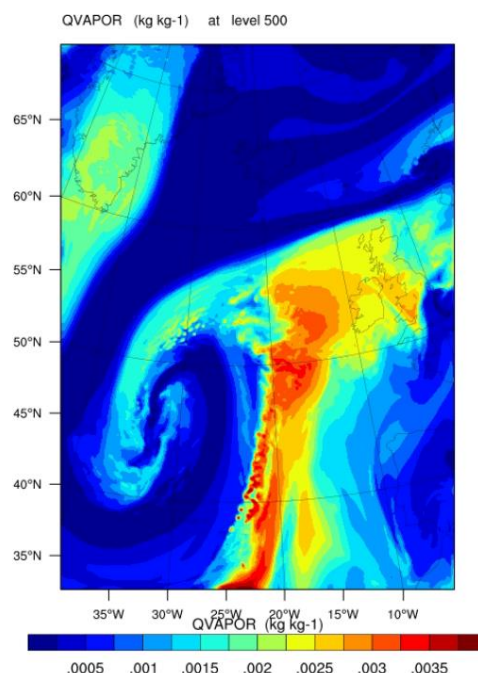


Рисунок 3.9 - Удельная влажность на высоте 500 гПа для 06.10.2023 12:00 (UTC)

Полученные результаты демонстрируют согласованность эволюции влажностных характеристик с классической моделью циклона.

#### В) На изоэнтропической поверхности

В начальный момент времени (00:00 UTC 5 октября) на изоэнтропической поверхности 290К наблюдается формирование четкого градиента влажности. В восточной части циклона отмечается область повышенной влажности (0.006-0.008 кг/кг), соответствующая теплому сектору, где происходит восходящее движение воздушных масс вдоль изоэнтропических поверхностей. В тыловой части циклона фиксируются пониженные значения влажности (0.002-0.003 кг/кг), характерные для нисходящих движений холодного воздуха. Такое распределение отражает начальную стадию циклогенеза с формированием фронтальной зоны.

К 06:00 UTC происходит усиление контраста влажности. В зоне теплого фронта наблюдается выраженный язык влажного воздуха (0.008-0.010 кг/кг),

распространяющийся к северу, что свидетельствует об активной фазе циклогенеза. Одновременно в тыловой части циклона сохраняется область сухого воздуха (0.001-0.002 кг/кг), подчеркивая формирование характерной для циклона Шапиро-Кейзера асимметричной структуры. На этой стадии особенно хорошо видна роль изоэнтропических поверхностей в организации восходящих движений во фронтальной зоне.

В период максимального развития циклона (12:00 UTC) изоэнтропический анализ выявляет замкнутую область повышенной влажности (0.007-0.009 кг/кг) в восточном секторе, четкую границу между влажным и сухим воздухом, соответствующую фронтальной зоне, признаки начинающейся окклюзии в виде вытягивания влажного языка к северу, сохранение минимальных значений влажности (0.001-0.002 кг/кг) в тыловой части

На стадии окклюзии (18:00 UTC) наблюдаются уменьшение контраста влажности между секторами, размывание границы между влажным и сухим воздухом, смещение области максимальной влажности (0.005-0.006 кг/кг) в северо-восточном направлении и постепенное выравнивание влажностного поля.

К 00:00 UTC 6 октября циклон переходит в стадию заполнения, что проявляется (уменьшении максимальных значений QVAPOR до 0.004-0.005 кг/кг).

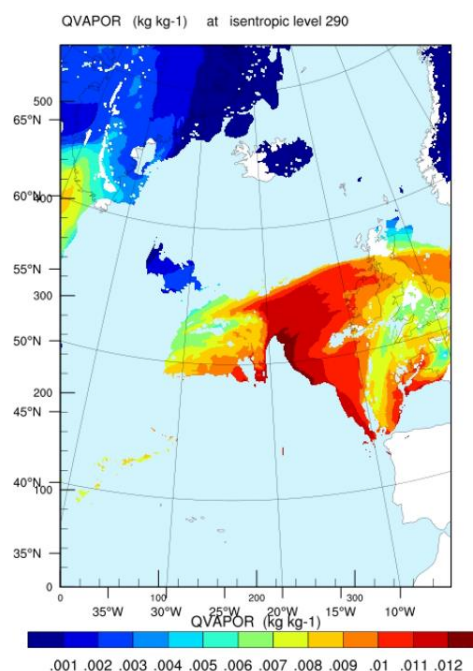


Рисунок 3.10 – Удельная влажность на изоэнтропической поверхности 290К для 06.10.2023 23:00 (UTC)

### Г) Разрезе удельной влажности

На представленном вертикальном разрезе удельной влажности, выполненном по диагонали между точками (33°N, 30°W) и (70°N, 5°W), прослеживается пространственно-временная эволюция влажностной структуры циклона типа Шапиро-Кейзера для 5 октября 2023 года.

В начальный момент (00:00 UTC 5 октября) разрез демонстрирует характерную асимметричную структуру. В южной части разреза (33-45°N) наблюдается мощный столб повышенной влажности (0.008-0.012 кг/кг), простирающийся от поверхности до высоты 2-2.5 км, что соответствует тепловому сектору циклона и зоне восходящих движений вдоль теплого фронта. В средней части (45-55°N) фиксируется резкое уменьшение влажности с высотой (от 0.006 кг/кг у поверхности до 0.002 кг/кг на 3 км), отражающее наклон фронтальной поверхности. В северной части (55-70°N) отмечается равномерно низкая

влажность (0.001-0.003 кг/кг) на всех высотах, характерная для холодного тылового сектора

К 06:00 UTC максимальные значения влажности (0.010-0.014 кг/кг) сосредотачиваются в узком слое 0-1.5 км в южной части. Формируется выраженная наклонная граница между влажными и сухими воздушными массами, соответствующая фронтальной поверхности

К 12:00 UTC разрез показывает четко выраженную клинообразную структуру влажного воздуха (0.008-0.012 кг/кг), поднимающегося вдоль фронтальной поверхности до 2-3 км, интенсификацию вертикального градиента влажности в средней части разреза, появление вторичного максимума влажности (0.006-0.008 кг/кг) на высотах 1-2 км в северной части.

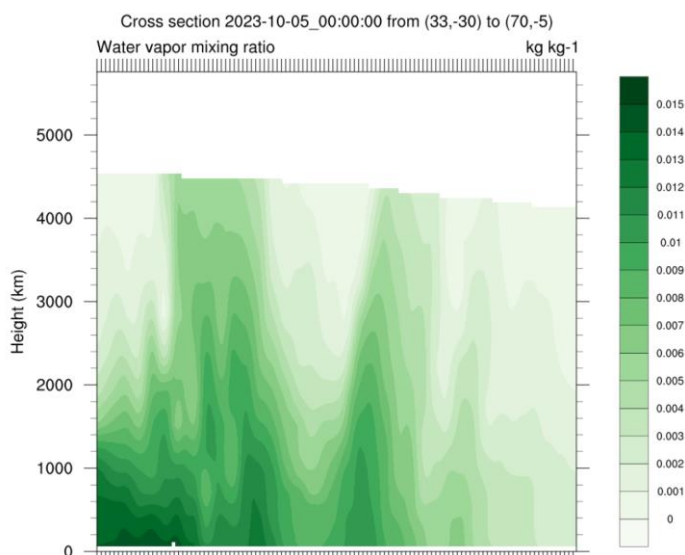


Рисунок 3.11 - Разрез удельной влажности для 05.10.2023 00 UTC

Особенно показательным является изменение наклона фронтальной поверхности и связанное с ним распределение влажности, наглядно демонстрирующее основные стадии жизненного цикла циклона.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В ходе численного моделирования с использованием модели WRF была успешно исследована структура и эволюция циклона типа Шапиро—Кейзера. Полученные результаты позволили проанализировать ключевые метеорологические параметры, включая атмосферное давление, температуру на изобарических уровнях 700 и 850 гПа, удельную влажность, а также особенности распределения влажности на изоэнтропической поверхности и в вертикальном разрезе.

Моделирование показало, что циклон развивался в соответствии с классической схемой Шапиро—Кейзера, начиная с зарождения барической депрессии и активной фазы циклогенеза, через стадию максимальной интенсивности с выраженной фронтальной структурой, до окклюзии и заполнения. На всех этапах наблюдались характерные признаки: резкие температурные и влажностные градиенты, асимметрия теплого и холодного секторов, а также динамика фронтальной зоны.

Особое внимание было уделено анализу вертикальной структуры циклона. На уровне 850 гПа температурные контрасты оказались более выраженными, чем на 700 гПа, что подчеркивает важную роль приземного слоя в развитии фронтальной системы. Изоэнтропический анализ подтвердил роль восходящих и нисходящих движений в формировании влажностных полей, а вертикальный разрез наглядно продемонстрировал эволюцию фронтальной поверхности.

Результаты моделирования согласуются с теоретическими представлениями о динамике циклонов средних широт и подтверждают применимость модели WRF для исследования подобных атмосферных процессов. Полученные данные могут быть использованы для дальнейшего изучения механизмов циклогенеза, а также для совершенствования методов прогнозирования опасных погодных явлений, связанных с циклонами типа Шапиро—Кейзера.

Проведенное исследование вносит вклад в понимание структуры и эволюции циклонов, демонстрируя возможности современных численных моделей для решения актуальных задач метеорологии.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Shapiro, M. A. and D. Keyser, 1990: Fronts, jet streams and the tropopause. Extratropical Cyclones, The Erik Palmén Memorial Volume, C. W. Newton and E. O. Holopainen, Eds., Am. Meteorol. Soc., 167-191
2. Schultz, D. M., D. Keyser and L. F. Bosart, 1998: The effect of large-scale flow on low-level frontal structure and evolution in midlatitude cyclones. Mon. Weather Rev., 126, 1767-1791
3. Clark P. A., K. A. Browning and C. Wang, 2005: Investigation of the 3-D Structure of the Sting Jet with a high-resolution NWP-Model, Q. J. R. Meteorol. Soc.
4. Schultz, D. M. and H. Wernli, 2001: Determining Midlatitude Cyclone Structure and Evolution from the Upper-Level Flow. / [Электронный ресурс] / [<http://www.cimms.ou.edu/~schultz/papers/marwealog.html>]
5. Барт А.А. Математическое моделирование загрязнения городского воздуха источниками антропогенной и биогенной эмиссии [Электронный ресурс] : автореф. дис. на соиск. учен. степ. канд. физ.- мат. наук: 05.13.18 / Барт А.А.; Национальный исследовательский Томский государственный университет. - Томск, 2014. – 18 с. <https://search.rsl.ru/ru/record/01005549458> 10.
6. A Discription of the Advanced Research WRF Version 3 [Электронный ресурс] / W.C. Skamarock, J.B. Klemp, J. Dudhia, D.O. Gill, D.M. Barker, M.G. Duda, X. Huang, W. Wang, J.G. Powers // NCAR Technical Note. 2008. – Mode of access: [https://www2.mmm.ucar.edu/wrf/users/docs/attic/arw\\_v3\\_bw.pdf](https://www2.mmm.ucar.edu/wrf/users/docs/attic/arw_v3_bw.pdf)
7. Kessler E., 1969: On the distribution and continuity of water substance in atmospheric circulation [Электронный ресурс], Meteor. Monogr., 32, Amer. Meteor. Soc., 84 p.
8. ARW Version 3 Modeling System User's Guide [Электронный ресурс]. Mode of access: [https://www2.mmm.ucar.edu/wrf/users/docs/user\\_guide\\_V3/user\\_guide\\_V3.9/users\\_guide\\_chap5.htm](https://www2.mmm.ucar.edu/wrf/users/docs/user_guide_V3/user_guide_V3.9/users_guide_chap5.htm)
9. Применение ИТ в моделировании атмосферных процессов [Электронный ресурс], С.К. Бородко; М-во образования Республики 70 Беларусь,

- Беларусский государственный университет. – Минск, 2009. – 46 с.  
[https://www.zinref.ru/000\\_uchebniki/04600\\_raznie\\_3/783\\_lekcii\\_raznie\\_10/524.htm](https://www.zinref.ru/000_uchebniki/04600_raznie_3/783_lekcii_raznie_10/524.htm)
10. Паскаль В.Ф., Моделирование воюции тропических циклонов по юго-западной части Индийского океана с использованием ассимиляции данных [Электронный ресурс] : автореф. дис. канд. физ.- мат. наук: 25.00.30 / В.Ф. Паскаль. – СПб., 2009. – 19 с  
[https://www.rshu.ru/university/dissertations/pdf/2009\\_pascal.pdf](https://www.rshu.ru/university/dissertations/pdf/2009_pascal.pdf).
11. Ленская О.Ю., Численное моделирование характеристик пограничного слоя атмосферы крупного промышленного города (на примере г. Челябинска) [Электронный ресурс] <https://cyberleninka.ru/article/n/chislennoe-modelirovanie-harakteristikpogranichnogo-sloya-atmosfery-krupnogo-promyshlennogo-goroda-naprimere-g-chelyabinska>
12. Ботыгин И.А., Программные средства построения мезомасштабных атмосферных моделей [Электронный ресурс] / Науковедение: интернет-журнал – 2015. – Т. 7, №6. <https://cyberleninka.ru/article/n/programmnye-sredstva-postroeniya-mezomasshtabnyh-atmosfernyh-modeley>
13. Смирнова М.М., Анализ примеров усвоения данных в региональной модели WRF-ARW [Электронный ресурс] / Смирнова М.М., Рубинштейн К.Г. // Гидрометцентр России. Труды. Вып. 347, 2012. – 95-112 с.  
[http://elib.rshu.ru/files\\_books/pdf/img-57952.pdf](http://elib.rshu.ru/files_books/pdf/img-57952.pdf)
14. Barker D.M., Huang W., Guo Y.R., Xiao Q.N., A Three-Dimensional (3DVAR) Data assimilation system for use with MM5: Implementation and Initial results [Электронный ресурс] / Mon. Weath. Rev. - 2004. – Vol. 132. – 897–914 p.  
<https://www.scirp.org/reference/referencespapers.aspx?referenceid=2543692>
15. Красюк Т.В., Усвоение данных: конкуренция методов и проблема усвоение спутниковых наблюдений [Электронный ресурс] / Т.В. Красюк // Труды ГУ “ГМЦ РФ”. – Вып. 348, 2012 – 43-60 с. [http://elib.rshu.ru/files\\_books/pdf/img-48775.pdf](http://elib.rshu.ru/files_books/pdf/img-48775.pdf)

16. Коломеец Л.И., Смышляем С.П., Модельное исследование обратных связей между грозовой активностью и составом атмосферы [Электронный ресурс] // Ученые записки РГГМУ, 2014 № 37 – 177- 190с.
17. Вельтищев Н.Ф., Численные прогнозы погоды по негидростатическим моделям общего пользования WRF-ARW И WEF-NMM [Электронный ресурс] / Н.Ф. Вельтищев, Д.В. Жупанова // 80 лет Гидрометцентру России. 1939-2010, 2010. – 94-135 с.  
[https://method.meteorf.ru/publ/books/80\\_years/velt\\_zh.pdf](https://method.meteorf.ru/publ/books/80_years/velt_zh.pdf)
18. Mlawer, Eli. J., Steven. J. Taubman, Patrick. D. Brown, M. J. Iacono, and S. A. Clough, 1997: Radiative transfer for inhomogeneous atmospheres: RRTM, a validated correlated-k model for the longwave. J. Geophys. Res. [Электронный ресурс], 102, 16663–16682  
<https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1029/97JD00237>
19. Fels, Stephen. B., and M. D. Schwarzkopf, 1981, An efficient, accurate algorithm for calculating CO<sub>2</sub> 15 μm band cooling rates. J. Geophys. Res. [Электронный ресурс], 86, 1205–1232. <https://agupubs.onlinelibrary.wiley.com/>
20. Collins, William D., et al., 2004: Description of the NCAR Community Atmosphere Model (CAM 3.0). [Электронный ресурс] NCAR Tech. Note NCAR/TN–464+STR. 214 pp.
21. Dudhia, J. Numerical study of convection observed during the winter monsoon experiment using a mesoscale two-dimensional model // J. Atmos. Sci. [Электронный ресурс] – 1989. – V. 46. – PP. 3077–3107.  
[https://www2.mmm.ucar.edu/wrf/users/physics/phys\\_refs/SW\\_LW/Dudhia.pdf](https://www2.mmm.ucar.edu/wrf/users/physics/phys_refs/SW_LW/Dudhia.pdf)
22. Janjic, Z. I., 2002: Nonsingular implementation of the Mellor-Yamada Level 2.5 Scheme in the NCEP Meso model. NCEP Office Note No. 437 [Электронный ресурс], 61 pp.  
[https://www2.mmm.ucar.edu/wrf/users/physics/phys\\_refs/SURFACE\\_LAYER/eta\\_part4.pdf](https://www2.mmm.ucar.edu/wrf/users/physics/phys_refs/SURFACE_LAYER/eta_part4.pdf)
23. Pleim, Jonathan E., 2007: A Combined Local and Nonlocal Closure Model for the Atmospheric Boundary Layer. Part I: Model Description and Testing. J. Appl.

- Meteor. Climatol. [Электронный ресурс], 46, 1383– 1395  
[https://www2.mmm.ucar.edu/wrf/users/physics/phys\\_refs/PBL/ACM2.pdf](https://www2.mmm.ucar.edu/wrf/users/physics/phys_refs/PBL/ACM2.pdf)
24. NOAA, cited 2001: National Oceanic and Atmospheric Administration Changes to the NCEP Meso Eta Analysis and Forecast System: Increase in resolution, new cloud microphysics, modified precipitation assimilation, modified 3DVAR analysis. [Available online at <http://www.emc.ncep.noaa.gov/mmb/mmbpll/eta12tpb/>]
25. Benjamin, Stanley G., Georg A. Grell, John M. Brown, and Tatiana G. Smirnova, 2004: Mesoscale weather prediction with the RUC hybrid isentropic-terrain-following coordinate model. Mon. Wea. Rev. [Электронный ресурс], 132, 473-494. [https://www2.mmm.ucar.edu/wrf/users/physics/phys\\_refs/LAND\\_SURFACE/RUC.pdf](https://www2.mmm.ucar.edu/wrf/users/physics/phys_refs/LAND_SURFACE/RUC.pdf)
26. Grell, Georg A., 1993: Prognostic Evaluation of Assumptions Used by Cumulus Parameterizations. Mon. Wea. Rev. [Электронный ресурс], 121 [https://www2.mmm.ucar.edu/wrf/users/physics/phys\\_refs/CU\\_PHYS/Grell3D\\_part1.pdf](https://www2.mmm.ucar.edu/wrf/users/physics/phys_refs/CU_PHYS/Grell3D_part1.pdf)
27. Grell, G. A, D. Devenyi, 2002: A generalized approach to parameterizing convection combining ensemble and data assimilation techniques. Geophys. Res. Lett. [Электронный ресурс], 29, 1693. [https://www2.mmm.ucar.edu/wrf/users/physics/phys\\_refs/CU\\_PHYS/Grell3D\\_part2.pdf](https://www2.mmm.ucar.edu/wrf/users/physics/phys_refs/CU_PHYS/Grell3D_part2.pdf)
28. Thomas Schartner, Ingo Kirchner, June 14 2016: Eady Growth Rate, Institut für Meteorologie, Freie Universität Berlin [Электронный ресурс] <https://frea.met.fu-berlin.de/about/eady/>
29. Guilherme Martins, Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais in Brazil [Электронный ресурс] <https://www.ncl.ucar.edu/Document/Manuals/>
30. Hoskins, B. J., McIntyre, M. E., & Robertson, A. W. (1985). On the use and significance of isentropic potential vorticity maps. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 111(470), 877-946. [Электронный ресурс] [http://speedy.aos.wisc.edu/Hoskins\\_etal\\_1985.pdf](http://speedy.aos.wisc.edu/Hoskins_etal_1985.pdf)

## ПРИЛОЖЕНИЯ

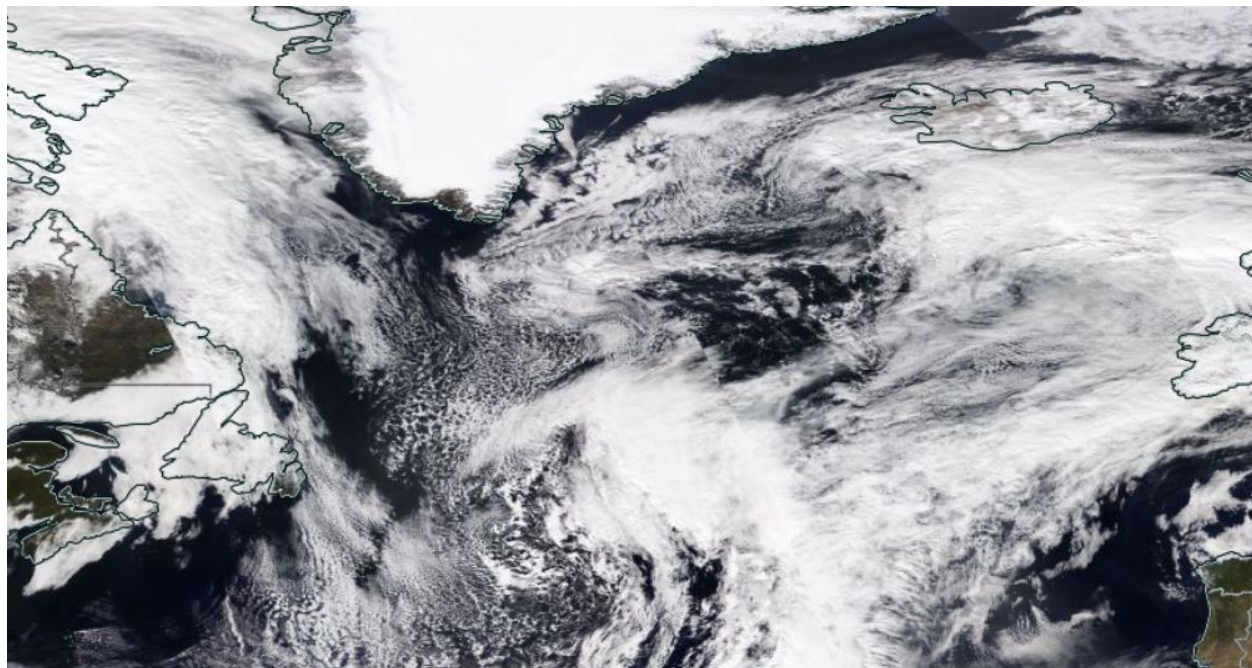


Рисунок 1 – Спутниковое изображение для даты 05.10.2023 (NOAA-20 / VIIRS)

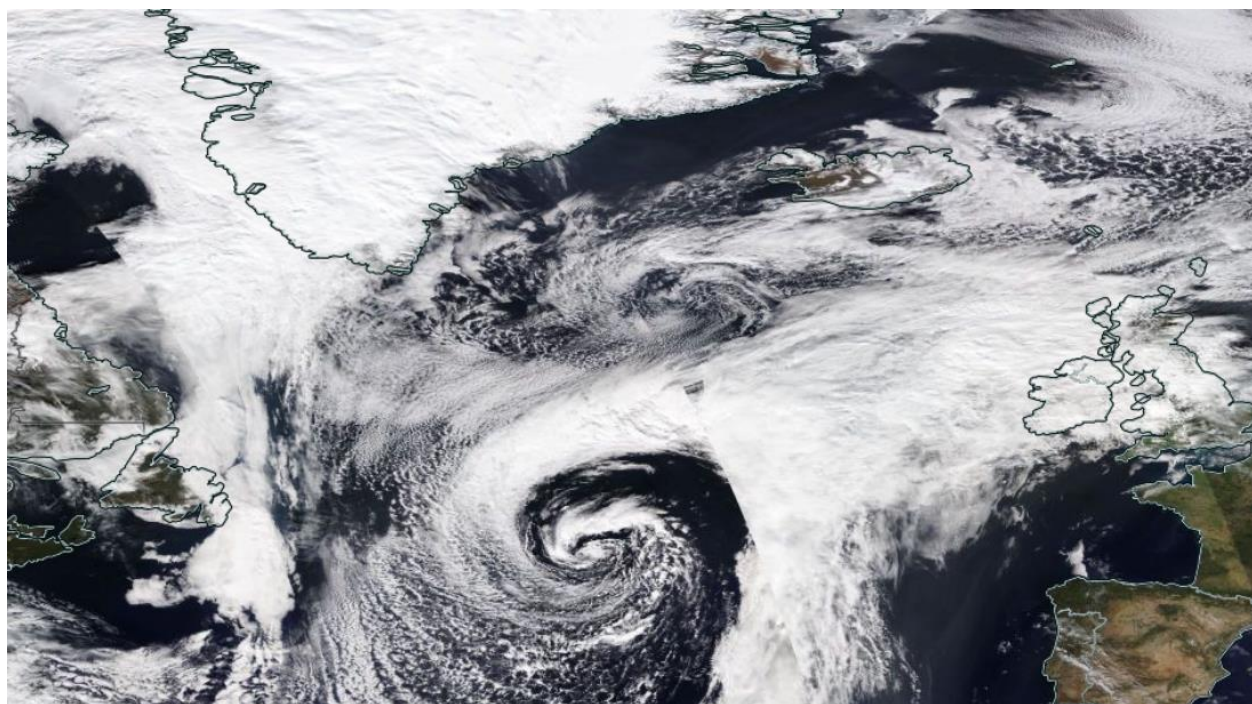


Рисунок 2 – Спутниковое изображение для даты 06.10.2023 (NOAA-20 / VIIRS)



Рисунок 3 – Спутниковое изображение для даты 07.10.2023 (NOAA-20 / VIIRS)

```
*namelist – Блокнот
Файл  Правка  Формат  Вид  Справка
&share
wrf_core = 'ARW',
max_dom = 1,
start_date = '2023-10-05_00:00:00',
end_date = '2023-10-07_00:00:00',
interval_seconds = 21600,
io_form_geogrid = 2,
opt_output_from_geogrid_path = '/data0/home/1122/wrf/shapiro/',
debug_level = 0,
/

&geogrid
parent_id          = 1,
parent_grid_ratio  = 1,
i_parent_start     = 1,
j_parent_start     = 1,
e_we              = 100,
e_sn              = 100,
geog_data_res     = '30s',
dx = 0.016025,
dy = 0.016024,
map_proj = 'lat-lon',
ref_lat  = 59.934,
ref_lon  = 30.335,
truelat1 = 59.934,
truelat2 = 59.934,
stand_lon = 24.424,
geog_data_path = '/data2/geob',
opt_geogrid_tbl_path = '/data0/home/1122/wrf/shapiro/',
ref_x = 50.0,
ref_y = 50.0,
/
```

Рисунок 4 – Часть программного кода для WRF (namelist.wps)