



## WEATHER MODELING USING PARALLEL PROGRAMMING MODELS

Aimbetova Gulara Nurymbetovna

senior lecturer

Salawatov Saparbek Askar uly

student

Ongarbaev Rustem Tenelbaevich

student

Department of Nukus State Technical University

<https://doi.org/10.5281/zenodo.18066048>

### ARTICLE INFO

Received: 19<sup>th</sup> December 2025

Accepted: 26<sup>th</sup> December 2025

Online: 27<sup>th</sup> December 2025

### KEYWORDS

weather modeling, Navier-Stokes equation, MPI, OpenMP, CUDA, GPU.

### ABSTRACT

Weather modeling is one of the most complex and computationally resource-intensive tasks of modern science. It involves solving systems of equations describing the dynamics of the atmosphere, oceans, Earth's surface, and other components of the climate system. To efficiently perform such calculations, advanced parallel programming methods and architectures of high-performance computing systems are used.

This article discusses how parallel programming models are used to develop and implement meteorological models, and discusses basic approaches and examples.

## МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОГОДЫ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ МОДЕЛЕЙ ПАРАЛЛЕЛЬНОГО ПРОГРАММИРОВАНИЯ

Аимбетова Гулара Нурымбетовна

старший преподаватель

Салауатов Сапарбек Аскар улы

Студент

Онгарбаев Рустем Тенелбаевич

Студент

Нукусский государственный технический университет

<https://doi.org/10.5281/zenodo.18066048>

### ARTICLE INFO

Received: 19<sup>th</sup> December 2025

Accepted: 26<sup>th</sup> December 2025

Online: 27<sup>th</sup> December 2025

### KEYWORDS

Моделирование погоды, уравнение Навье-Стокса, MPI, OpenMP, CUDA, GPU.

### ABSTRACT

Моделирование погоды — одна из наиболее сложных и вычислительно ресурсоёмких задач современной науки. Оно включает в себя решение систем уравнений, описывающих динамику атмосферы, океанов, земной поверхности и других компонентов климатической системы. Для эффективного выполнения таких расчетов применяются передовые методы параллельного программирования и архитектуры высокопроизводительных вычислительных



систем. В данной статье рассматривается как используются модели параллельного программирования для разработки и реализации метеорологических моделей, а также обсуждаются основные подходы и примеры.

## PARALLEL DASTURLASH MODELLARIDAN FOYDALANIB OB-HAVONI MODELLASHTIRISH

Gulara Nurymbetovna Aimbetova

katta o'qituvchi

Saparbek Asqar uly Salawatov

talaba

Rustem Tenelbaevich Ongarbaev

talaba

Nukus davlat texnika universiteti

<https://doi.org/10.5281/zenodo.18066048>

### ARTICLE INFO

Received: 19<sup>th</sup> December 2025

Accepted: 26<sup>th</sup> December 2025

Online: 27<sup>th</sup> December 2025

### KEYWORDS

Ob-havoni modellashtirish,  
Nave-Stoks tenglamasi, MPI,  
OpenMP, CUDA, GPU.

### ABSTRACT

Ob-havoni modellashtirish zamonaviy ilm-fanning eng murakkab va ko'p resurs talab qiladigan masalalaridan biridir. U atmosfera, okeanlar, yer yuzasi va iqlim tizimining boshqa tarkibiy qismlari dinamikasini tavsiflovchi tenglamalar tizimlarini yechishni o'z ichiga oladi. Bunday hisoblashlarni samarali bajarish uchun parallel dasturlash va yuqori unumli hisoblash tizimlari arxitekturasi ilg'or usullari qo'llaniladi.

Ushbu maqolada meteorologik modellarni ishlab chiqish va amalga oshirish uchun parallel dasturlash modellaridan qanday foydalanilishi ko'rib chiqiladi, shuningdek, asosiy yondashuvlar va misollar muhokama qilinadi.

### Введение

Моделирование погоды базируется на физических законах, которые описывают динамику атмосферы, океанов и земной поверхности. В основе лежат системы дифференциальных уравнений, являющихся математическим выражением законов сохранения: массы, импульса и энергии.

Почему необходимо параллелить моделирование погоды?

1. Высокая сложность и объем данных: В моделировании погоды задействованы тысячи переменных, например, температура, влажность, ветер, давление, и требуется учитывать глобальные и локальные процессы.
2. Быстродействие: Анализ погоды требует получения результатов за короткое время, особенно для прогнозов в реальном времени.



3. Масштабируемость: Для повышения точности модели необходимо увеличивать ее пространственное и временное разрешение, что существенно увеличивает вычислительные требования.

Параллельные модели позволяют распараллелить вычисления, существенно ускорить обработку и повысить качество прогнозов.

### **Основы моделирования погоды**

Метеорологические модели основываются на физических законах — уравнениях Навье-Стокса, уравнениях энергетического баланса и уравнениях переноса. Их решение ведется по сетке, делящей глобальную или локальную область на ячейки. Каждая ячейка содержит состояние атмосферы и взаимодействует с соседними.

Главные уравнения в метеорологии это:

- Уравнение сохранения массы: уравнение непрерывности;
- Уравнение импульса: уравнение Навье-Стокса;
- Уравнение энергии: баланс тепловой энергии;
- Уравнения состояния: уравнения, связывающие давление, температуру и плотность.

### **Уравнение Навье-Стокса**

Это ключевое уравнение, описывающее движение вязкой жидкости, то есть воздушных масс в атмосфере. Оно выводится из закона сохранения импульса и выражает баланс сил, действующих на воздушную частицу.

Общий вид уравнения Навье-Стокса для атмосферных потоков:

$$\rho(\partial_t \mathbf{v} + (\mathbf{v} \cdot \nabla) \mathbf{v}) = -\nabla p + \mu \nabla^2 \mathbf{v} + \rho \mathbf{g} + \mathbf{F}_{\text{отчистки}}$$

где:

$\rho$  — плотность воздуха (кг/м<sup>3</sup>);

$\mathbf{v}$  — вектор скорости потока ( $u, v, w$ );

$t$  — время;

$\nabla p$  — градиент давления;

$\mu$  — динамическая вязкость воздуха;

$\nabla^2 \mathbf{v}$  — лапласиан скорости (диффузионный член);

$\mathbf{g}$  — вектор силы тяжести;

$\mathbf{F}_{\text{отчистки}}$  — другие силы (корреляционные, влажность, магнитные и др.)

Упрощения для моделирования погоды:

- Обычно используют приближение (ставив скрытым третий компонент с учетом вращения Земли)
- Вводят корректирующие силы (например, сила Кориолиса)
- Рассматривают потоки на больших масштабах, игнорируя мелкие эффекты вязкости.

### **Решение уравнения Навье-Стокса**

Решение уравнений представляет значительные трудности: это нелинейные дифференциальные уравнения, не имеющие общего аналитического решения и требуют использования численных методов.

Обычно применяют численные методы как:



- ✚ Метод разностных схем
- ✚ Метод конечных элементов
- ✚ Метод конечных объемов

Общий подход к численному решению:

- ✓ Дискретизация пространства: сетка ячеек или узлы (например, по сетке широты, долготы, высоты);
- ✓ Дискретизация времени: по шагам  $\Delta t$ ;
- ✓ Итеративное решение: на каждом временном шаге вычисляют новое состояние атмосферы, основываясь на текущем.

Пример: простая схема Эйлера для уравнения движения:

$$v_{n+1} = v_n + \Delta t \times (-\rho_1 \nabla_p + v \nabla_v + g)$$

где  $v_n$  — скорость на текущем шаге, а  $v_{n+1}$  — на следующем.

*Уравнение энергии и уравнение состояния*

Дополнительно решают уравнение энергии для учета тепловых процессов и воздействий солнечного излучения, а также используют уравнение состояния воздуха:

$$p = \rho R T$$

где:

- $p$  — давление;
- $\rho$  — плотность;
- $R$  — газовая постоянная воздуха;
- $T$  — температура.

Моделирование погоды основывается на системе уравнений: уравнении Навье-Стокса, уравнении энергии и уравнении состояния.

Эти уравнения трудно решить аналитически; поэтому применяются численные методы. Решение состоит в дискретизации и последовательном обновлении состояния атмосферы по временным шагам с помощью компьютерных моделей.

**Функциональная схема моделирования:**

1. Инициализация: Загрузка данных наблюдений, спутниковых снимков.
2. Расчет: Решение дифференциальных уравнений в каждой ячейке при помощи численных методов.
3. Обновление: Передача данных на следующую временную ступень.
4. Анализ: Постобработка данных, визуализация результатов.

Все эти этапы требуют значительных вычислительных ресурсов, особенно при глобальных моделях с высоким разрешением.

**Архитектуры и модели параллельного программирования в метеорологии**

Для эффективной реализации моделей погоды используются разные параллельные архитектуры и модели.

### 1. Модель разделяемой памяти (MPI)

Каждая часть области (например, одна часть глобальной сетки) обрабатывается отдельным процессором или узлом кластера.



Обмен данными между узлами происходит через передачу сообщений с помощью MPI.

Пример: крупные глобальные модели типа ECMWF или GFS используют MPI для объединения результатов вычислений на разных узлах.

## **2. Модель общего доступа к памяти (OpenMP)**

Используется для распараллеливания внутри одного узла или многоядерного процессора. Легко реализуется с помощью директив OpenMP, позволяет распараллелить циклы расчетов, обновлений данных.

Например, подготовка данных или вычисление параметров внутри одной ячейки.

## **3. Гибридные модели**

Комбинируют MPI и OpenMP для максимальной масштабируемости. Внутри узла работает OpenMP, а между узлами MPI.

Пример: современные метеорологические системы используют такую схему для реализации масштабных моделей.

### **Примеры реализации**

#### **Пример 1. Модель Глобальной циркуляции (GCM)**

Модель глобальной циркуляции использует крупномерную сетку (например, с разметкой по 1° широты и долготы). Обработывается несколько сотен тысяч ячеек с помощью MPI-распараллеливания. Каждый узел отвечает за свою часть сетки. Обмен информацией между узлами включает обмен данными о вихрях, температуре и влажности.

#### **Пример 2. Внутрядерное моделирование с использованием OpenMP**

В случае локальных моделей погоды с высоким разрешением (например, с сеткой по 100 м) каждый поток отвечает за расчет определенного региона.

Расчеты по каждой ячейке параллелятся для ускорения обработки.

#### **Пример 3. Использование GPU**

Для быстрого моделирования погоды в режиме реального времени применяют GPU ускорение. Например, моделирование волновых процессов с помощью CUDA, где тысячи ячеек обрабатываются одновременно тысячами ядер GPU.

Реализуем очень упрощенную схему - моделирование двухмерного деления атмосферы на сетку и обновление скорости по уравнению Навье-Стокса (без учета многих эффектов для простоты). Ниже приведен код на языке Python и его реализация:



```
2 import numpy as np
3 # Размер сетки
4 nx, ny = 50, 50
5 dx, dy = 1000.0, 1000.0 # метры
6 dt = 1.0 # секунда
7
8 # Инициализация полей
9 u = np.zeros((nx, ny)) # скорость по x
10 v = np.zeros((nx, ny)) # скорость по y
11 p = np.ones((nx, ny)) * 101325 # давление (Па)
12
13 # Влияние силы Кориолиса (примерные значения для зоны)
14 f = 1e-4 # 1/c
15
16 # Простая функция обновления скорости
17 def update_velocity(u, v, p, dt, dx, dy, f):
18     # Расчёт градиента давления (центровое приближение)
19     dp_dx = (np.roll(p, -1, axis=0) - np.roll(p, 1, axis=0)) / (2*dx)
20     dp_dy = (np.roll(p, -1, axis=1) - np.roll(p, 1, axis=1)) / (2*dy)
21
22     # Обновление u и v (без вязкости)
23     u_new = u + dt * ( -dp_dx / 1.225 + f * v )
24     v_new = v + dt * ( -dp_dy / 1.225 - f * u )
25     return u_new, v_new
26
27 # Итерации моделирования
28 for t in range(100):
29     u, v = update_velocity(u, v, p, dt, dx, dy, f)
30
31 # Вывод результатов
32 import matplotlib.pyplot as plt
33 plt.quiver(u, v)
34 plt.title('Упрощённая модель ветра')
```



Приведенный код очень упрощенная демонстрация концепции: решение уравнений для прогноза ветра и давления и обновление условий по времени.

Преимущества параллельного моделирования погоды:

- ускорение расчетов: Время моделирования сокращается с часов до минут.
- повышение точности: Можно повысить разрешение сетки и учесть большее число факторов.
- можно моделировать сложные системы: Внутренние взаимодействия компонентов климатической системы.

**Вызовы:**



-сложность разработки: Требуется специальные навыки параллельного программирования.

- обмен данными: Высокая нагрузка и необходимость тонкой настройки взаимодействий между процессами.

-отладка: Высокая сложность обнаружения ошибок в параллельных системах.

## **Выводы**

Использование моделей параллельного программирования значительно повышает эффективность и точность моделирования погоды. Современные системы сочетают разные архитектурные подходы, чтобы реализовать глобальные, региональные и городские прогнозы.

Развитие технологий разработки параллельных программ, увеличение вычислительной мощности суперкомпьютеров и появление новых видов аппаратных ускорителей (например, FPGA или тензорных процессоров) открывает новые горизонты для прогноза погоды и климатологических исследований.

## **References:**

1. М.А. Толстых, Р.Ю. Фадеев, В.Г. Мизяк. Параллельный программный комплекс модели атмосферы для прогноза погоды и моделирования климата. Суперкомпьютерные дни в России 2015 // Russian Supercomputing Days 2015 // RussianSCDays.org.356-366стр.
2. Корнеев В.Д. Параллельное программирование в MPI. Москва–Ижевск: Институт компьютерных исследований, 2003.
3. Gropp, W., Lusk, E., Skjellum, A. (2014). «Using MPI: Portable Parallel Programming with the Message-Passing Interface» (3rd ed.). MIT Press.