

# МОДЕЛИРОВАНИЕ ТЕРМИЧЕСКИ ОБУСЛОВЛЕННЫХ МЕЗОМАСШТАБНЫХ ЦИРКУЛЯЦИЙ ТРЕХМЕРНОЙ НЕГИДРОСТАТИЧЕСКОЙ АТМОСФЕРНОЙ МОДЕЛЬЮ

## Задание 1. Моделирование динамики морского и берегового бриза

Провести численный эксперимент по воспроизведению бризовой циркуляции, возникающей в окрестности прямой береговой линии (эксперимент 1) и прямой береговой линии с «заливом» (эксперимент 2, рис. 1).

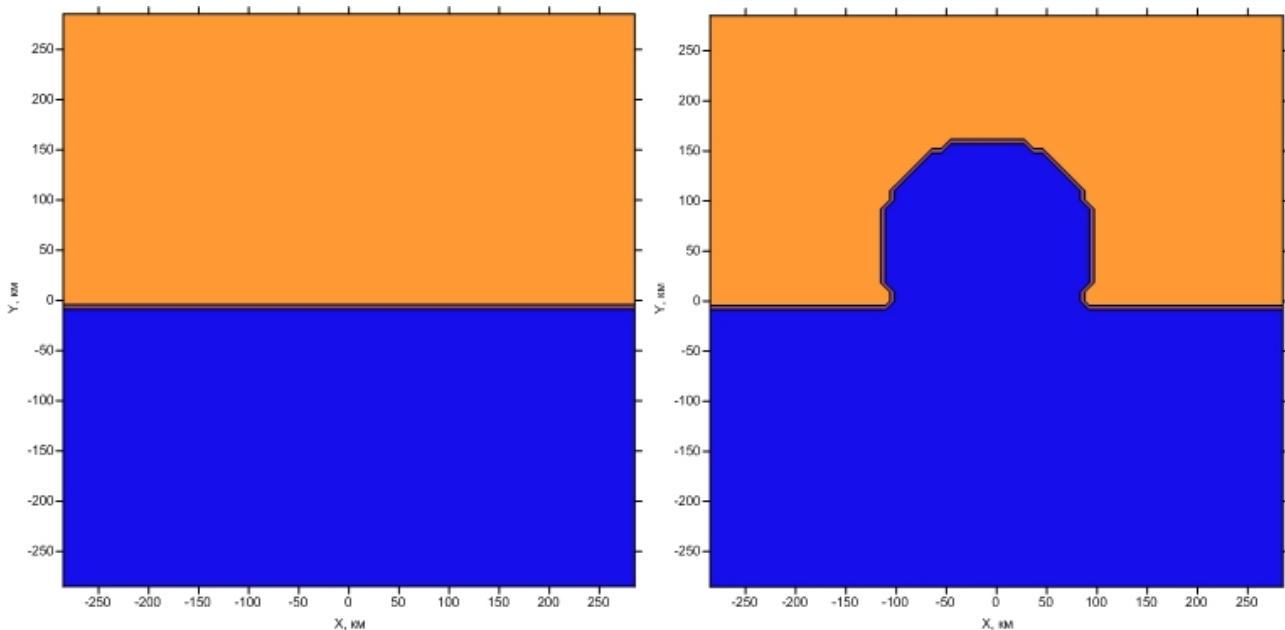


Рис. 1. Распределение воды и суши в двух численных экспериментах (синим цветом показана вода, оранжевым — суша).

1. Провести контрольный численный эксперимент (распределение суши и воды показано на рис.1, левое изображение). Построить карты распределения горизонтального вектора ветра на разных уровнях модели, карту температуры поверхности, потоков явного и скрытого тепла в приземном (приводном) слое. Объяснить качественные закономерности наблюдаемых распределений. Определить, развивается ли антибриз и какой интервал высот охватывает. Рассмотреть суточную динамику приземной скорости ветра.
2. Провести численный эксперимент с параметрами контрольного эксперимента, за исключением широты, которую следует задать равной  $20^\circ$  с.ш. (ключевое слово `xlatit` в файле `nh3d.dat`). Построить те же карты, объяснить отличия результатов от результатов контрольного эксперимента в терминах абсолютной величины скорости, ее направления, температуры поверхности и атмосферы, потоков тепла в приземном слое.
3. Провести численный эксперимент с параметрами контрольного эксперимента, за исключением широтной компоненты геострофического ветра, которую следует задать равной  $5$  м/с (ключевое слово `ug0` в файле `nh3d.dat`).

Построить те же карты, объяснить отличия результатов от результатов контрольного эксперимента.

4. Провести численный эксперимент с параметрами контрольного эксперимента, но с непрямой береговой линией (с «заливом», рис. 1, правое изображение). Для этого нужно скопировать в папку `map/` набор файлов `grid_map.*` для этого эксперимента. Построить те же карты, объяснить образование вихря с вертикальной осью в области конвергенции потоков с кромки льда. Провести эксперимент для южного полушария (для этого нужно задать отрицательную широту и поменять начальное время эксперимента, чтобы оно соответствовало лету южного полушария).
5. Построить графики временной динамики интегральной в расчетной области кинетической, потенциальной и доступной потенциальной энергии, объяснить связь временной динамики этих видов энергии с развитием мезомасштабной циркуляции и взаимодействием атмосферы с подстилающей поверхностью (потоки тепла, влаги и импульса).
6. На основе расчета отдельных слагаемых уравнения завихренности (1) оценить относительный вклад различных физических механизмов в образование вихря, объяснить направление вращения в вихре.

Для проведения различных экспериментов рекомендуется скопировать модель в соответствующие папки и запустить эксперименты в них параллельно. При запуске целесообразно использовать 16 процессоров и ограничение на время счета не менее 30 минут.

**Некоторые параметры контрольного эксперимента (см. `nh3d.dat`):**

- 1) Размеры конечно-разностной сетки модели 61x61x31
- 2) Шаг сетки по осям  $x$  и  $y$  — 9.2 км
- 3) Шаг по времени — 5 с
- 4) Координаты центра расчетной области  $\phi_c=50, \lambda_c=35$
- 5) Начальный момент времени — 06:00 1 июля (определяет высоту Солнца и, соответственно, поток солнечной радиации).
- 6) Начальное поле ветра соответствует почти полному покою атмосферы
- 7) Фазовые переходы влаги в атмосфере не учитываются
- 8) Вывод трехмерных и двумерных полей в файлы производится каждый час модельного времени

## Задание 2. Моделирование динамики ледового бриза

Провести численные эксперименты по воспроизведению циркуляции бризовой природы, возникающей на прямой кромке морского льда и на кромке льда с «заливом» (рис. 2).

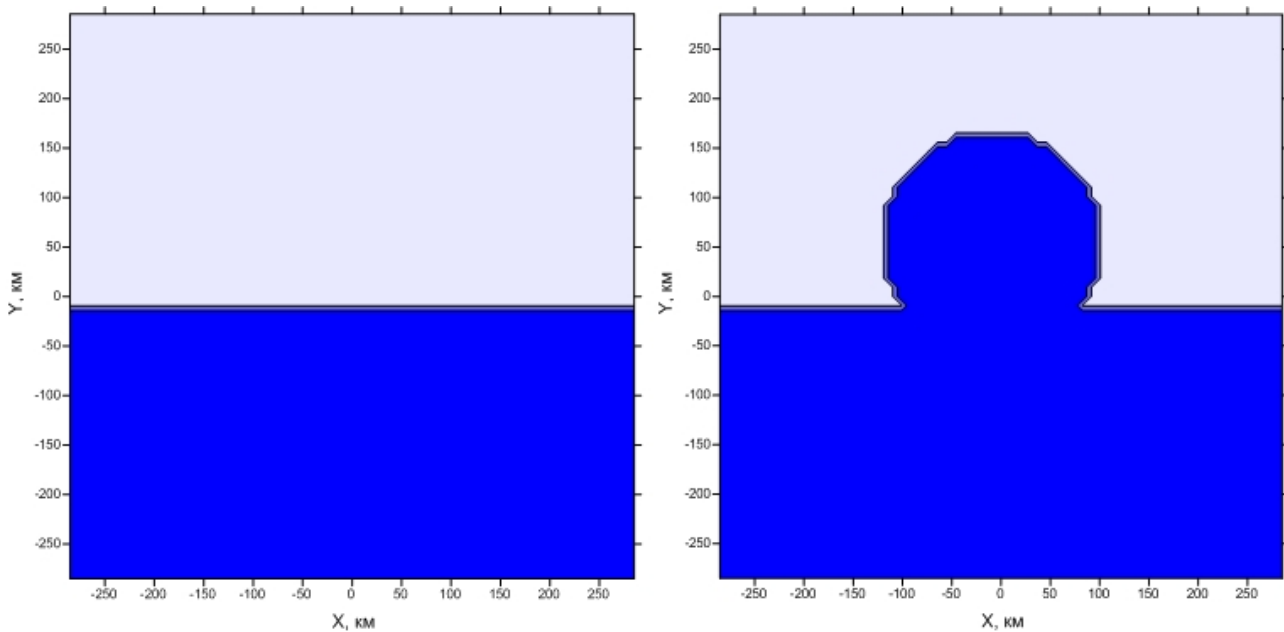


Рис. 2. Распределение открытой воды и льда в двух численных экспериментах (синим цветом показана открытая вода, белым — лед, покрытый снегом). Направления направо — восток, наверх — север.

1. Провести контрольный численный эксперимент (распределение льда и открытой воды показано на рис.2, левое изображение). Построить карту распределения горизонтального вектора ветра на разных уровнях модели, карту температуры поверхности, вертикальный разрез температуры, карту потоков явного и скрытого тепла в приземном (приводном слое). Объяснить качественные закономерности наблюдаемых распределений. Определить, развивается ли антибриз и какой интервал высот охватывает. Рассмотреть временную динамику приземной скорости ветра и сравнить ее с динамикой, которая обычно наблюдается в случае бриза на границе суши и моря в теплое время года.
2. Провести численный эксперимент с параметрами контрольного эксперимента, за исключением широты, которую следует задать равной  $40^\circ$  с.ш. (ключевое слово `xlatit` в файле `nh3d.dat`). В настоящее время ледовых бризов на таких широтах не бывает, но вполне возможно, что в прошлом Земли они были. Построить те же карты, объяснить отличия результатов от результатов контрольного эксперимента в терминах абсолютной величины скорости, ее направления, температуры поверхности и атмосферы, потоков тепла в приземном слое.
3. Провести численный эксперимент с параметрами контрольного эксперимента, за исключением широтной компоненты геострофического ветра, которую следует задать равной  $5$  м/с (ключевое слово `ug0` в файле `nh3d.dat`).

Построить те же карты, объяснить отличия результатов от результатов контрольного эксперимента.

4. Провести численный эксперимент с параметрами контрольного эксперимента, но с непрямой кромкой льда (с «заливом», рис. 2, правое изображение). Для этого нужно скопировать в папку `map/` набор файлов `grid_map.*` для этого эксперимента. Построить те же карты, объяснить образование вихря с вертикальной осью в области конвергенции потоков с кромки льда. Провести эксперимент для южного полушария (для этого нужно задать отрицательную широту и поменять начальное время эксперимента, чтобы оно соответствовало зиме южного полушария).
5. Построить графики временной динамики интегральной в расчетной области кинетической, потенциальной и доступной потенциальной энергии, объяснить связь временной динамики этих видов энергии с развитием мезомасштабной циркуляции и взаимодействием атмосферы с подстилающей поверхностью (потоки тепла, влаги и импульса).
6. На основе расчета отдельных слагаемых уравнения завихренности (1) оценить относительный вклад различных физических механизмов в образование вихря, объяснить направление вращения в вихре.

Для проведения различных экспериментов рекомендуется скопировать модель в соответствующие папки и запустить эксперименты в них параллельно. При запуске целесообразно использовать 16 процессоров и ограничение на время счета не менее 30 минут.

#### **Некоторые параметры контрольного эксперимента (см. `nh3d.dat`):**

- 1) Размеры конечно-разностной сетки модели  $61 \times 61 \times 31$
- 2) Шаг сетки по осям  $x$  и  $y$  — 9.2 км
- 3) Шаг по времени — 5 с
- 4) Координаты центра расчетной области  $\phi_c = 65, \lambda_c = 35$
- 5) Начальный момент времени — 06:00 1 января (определяет высоту Солнца и, соответственно, поток солнечной радиации).
- 6) Начальное поле ветра соответствует почти полному покою атмосферы
- 7) Фазовые переходы влаги в атмосфере не учитываются
- 8) Вывод трехмерных и двумерных полей в файлы производится каждый час модельного времени

### Задание 3. Моделирование мезомасштабных циркуляций над гидрологически неоднородной поверхностью

Предлагается провести численное воспроизведение циркуляций бризовой природы, возникающих над горизонтальной поверхностью, покрытой нерегулярно расположенными водными объектами (рис. 3).

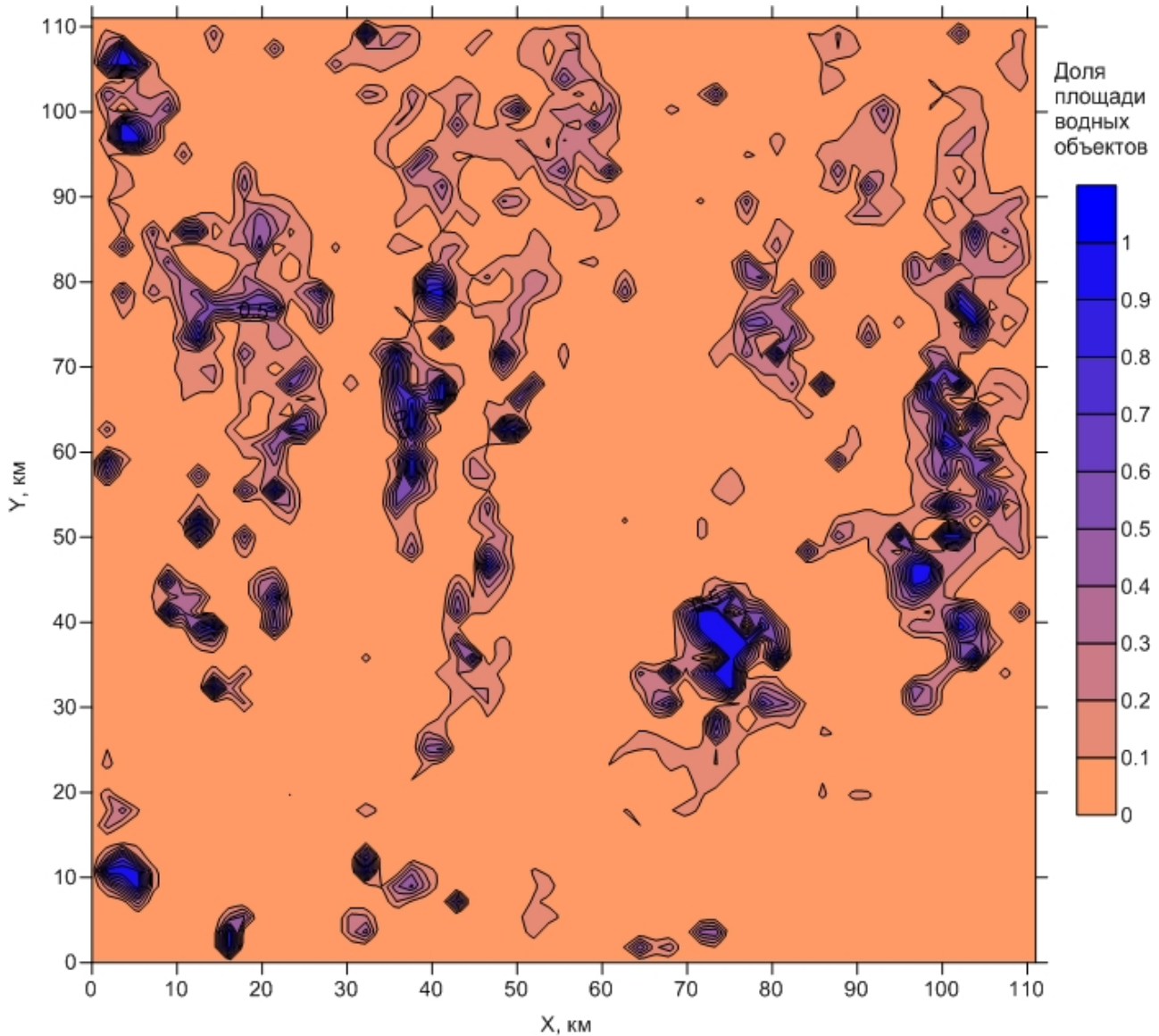


Рис. 3. Доля площади подстилающей поверхности, занятая водными объектами. Центр изображенной области ( $62^\circ$  с.ш.,  $75^\circ$  в.д.) расположен в бассейне среднего течения р.Обь (Западная Сибирь).

1. Провести контрольный численный эксперимент. Построить карту распределения горизонтального вектора ветра на разных уровнях модели, карту температуры поверхности, потоков явного и скрытого тепла в приземном слое. Объяснить качественные закономерности наблюдаемых распределений. Определить, развивается ли антибриз и на какой высоте. Рассмотреть суточную

динамику приземной скорости ветра и сравнить ее с динамикой, которая обычно наблюдается в случае бриза на границе суши и моря в теплое время года.

2. Провести численный эксперимент с параметрами контрольного эксперимента, за исключением широты, которую следует задать равной  $20^\circ$  с.ш. (ключевое слово `xlatit` в файле `nh3d.dat`). Построить те же карты, объяснить отличия результатов от результатов контрольного эксперимента в терминах абсолютной величины скорости, ее направления, температуры поверхности и атмосферы, потоков тепла в приземном слое.
3. Провести численный эксперимент с параметрами контрольного эксперимента, за исключением широтной компоненты геострофического ветра, которую следует задать равной  $5$  м/с (ключевое слово `ug0` в файле `nh3d.dat`). Построить те же карты, объяснить отличия результатов от результатов контрольного эксперимента.
4. Рассчитать вертикальный профиль мезомасштабных потоков тепла, влаги и импульса в различные моменты времени, связать максимальное по высоте значение потока с интенсивностью мезомасштабных циркуляций. В качестве меры интенсивности можно выбрать, например, интегральную в расчетной области кинетическую энергию.
5. Построить графики временной динамики интегральной в расчетной области кинетической, потенциальной и доступной потенциальной энергии, объяснить связь временной динамики этих видов энергии с развитием мезомасштабной циркуляции и взаимодействием атмосферы с подстилающей поверхностью (потоки тепла, влаги и импульса).
6. Построить поле завихренности. На основе расчета отдельных слагаемых уравнения завихренности (1) оценить относительный вклад различных физических механизмов в образование вихрей, объяснить направление вращения в вихрях.

Для проведения различных экспериментов рекомендуется скопировать модель в соответствующие папки и запустить эксперименты в них параллельно. При запуске целесообразно использовать 16 процессоров и ограничение на время счета не менее 30 минут.

#### **Некоторые параметры контрольного эксперимента (см. `nh3d.dat`):**

- 1) Размеры конечно-разностной сетки модели  $61 \times 61 \times 31$
- 2) Шаг сетки по осям  $x$  и  $y$  —  $1.8$  км
- 3) Шаг по времени —  $2$  с
- 4) Координаты центра расчетной области  $\phi_c = 62, \lambda_c = 75$
- 5) Начальный момент времени —  $06:00$  1 июля (определяет высоту Солнца и, соответственно, поток солнечной радиации).
- 6) Начальное поле ветра соответствует почти полному покою атмосферы
- 7) Фазовые переходы влаги в атмосфере не учитываются
- 8) Вывод трехмерных и двумерных полей в файлы производится каждый час модельного времени

## Уравнение завихренности

*Завихренность* — это вертикальная компонента вектора вихря. В пренебрежении бароклинностью и силами вязкости уравнение завихренности в z-системе координат имеет вид

$$\begin{aligned} \frac{d\omega_z}{dt} = \frac{\partial w}{\partial x} \omega_x + \frac{\partial w}{\partial y} \omega_y - (\omega_z + l) \left( \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} \right) - \beta v = \\ (\nabla_h w, \boldsymbol{\omega}_h) - (\omega_z + l) \left( \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y} \right) - \beta v \end{aligned} \quad (1)$$

В осесимметричном течении с восходящим потоком в центре без завихренности первое слагаемое в правой части равно 0 (горизонтальный градиент вертикальной скорости перпендикулярен горизонтальной составляющей вихря), а знак двух других слагаемых, содержащих  $l$  и  $\beta$ , определяется полушарием. Таким образом, следует ожидать, что в северном и южном полушарии в таком потоке будут возникать вихри с разным направлением вращения.

## Определения видов энергии, используемые в модели NH3D\_MPI

*Доступная потенциальная энергия* — это часть суммарной по расчетной области полной потенциальной энергии (полная потенциальная энергия в точке — сумма внутренней энергии и геопотенциала), которая переводится в кинетическую энергию при адиабатическом приведении атмосферы в баротропное состояние. При баротропном состоянии, когда температура зависит только от давления (изобарические и изотермические поверхности совпадают), в адиабатической атмосфере не происходит перехода полной потенциальной энергии в кинетическую. В сигма-системе координат приближенное выражение для доступной потенциальной энергии принимает вид:

$$E_a = -\frac{1}{2} \frac{R_d}{g p_0^k} \int_0^1 \int_0^1 p^{k-1} (p_* \theta')^2 \left( \frac{\partial \theta_s}{\partial \sigma} \right)^{-1} d\sigma dS' \quad (2)$$

из которого видно, что доступная потенциальная энергия возникает из-за отклонений потенциальной температуры  $\theta'$  от фонового (баротропного) состояния  $\theta_s$ . Эти отклонения в случае неоднородной подстилающей поверхности возникают из-за дифференцированного нагрева пограничного слоя атмосферы от разных типов поверхности, например, суши и поверхностей водных объектов.

## *Кинетическая энергия*

$$E_k = \frac{1}{2g} \int_0^1 \int_0^1 p_* (u^2 + v^2 + w^2) d\sigma dS' \quad (3)$$

*Внутренняя энергия возмущений температуры*

$$E_i = \frac{c_p}{g} \int_s^1 \int_0^1 p_* \left( \frac{p}{p_0} \right)^\kappa \theta' d\sigma dS' = \frac{c_p}{g} \int_s^1 \int_0^1 p_* T' d\sigma dS' \quad (4)$$

*Генерация кинетической энергии силой плавучести*

$$A_b = \int_s^1 \int_0^1 \left( w p_* \frac{\theta'}{\theta_s} \right) d\sigma dS' \quad (5)$$

*Источник внутренней энергии возмущений температуры (3) за счет вертикальной адвекции фоновой температуры*

$$A_s = \int_s^1 \int_0^1 \frac{c_p w p}{R_d \theta_s} \frac{\partial \theta_s}{\partial \sigma} d\sigma dS' \quad (6)$$

Нормировка интегралов (3)-(4) на  $g$  означает, что в силу соотношения гидростатики  $g^{-1} p_* d\sigma dS' = p dz dS'$ , в них производится интегрирование по массе в объеме расчетной области.

### **Мезомасштабные потоки тепла и влаги**

Мезомасштабные атмосферные циркуляции вызывают вертикальное перемешивание в тропосфере, выражаемое вертикальными потоками тепла и влаги. Мезомасштабные потоки явного и скрытого тепла определяются следующим образом:

$$\begin{aligned} H &= c_p \rho \overline{w' \theta'}, \\ LE &= L \rho \overline{w' q'}, \end{aligned} \quad (7)$$

где

$$\begin{aligned} f' &= f - \bar{f}, \\ f &= w, \theta, q \end{aligned} \quad (8)$$

и оператор осреднения по горизонтали определен следующим образом

$$\bar{f} = \frac{1}{S} \int_s f dS' \quad (9)$$



## Обозначения

$g$  - ускорение свободного падения,

$R_d$  - удельная газовая постоянная сухого воздуха,

$c_p$  - удельная теплоемкость воздуха при постоянном давлении,

$$\kappa = R_d / c_p,$$

$$p_0 = 1000 \text{ гПа},$$

$l$  - параметр Кориолиса,

$$\beta = \frac{dl}{dy},$$

$\sigma$  - вертикальная сигма-координата,

$S$  - площадь,

$\rho$  - плотность,

$p$  - давление,

$p^*$  - разность давления на подстилающей поверхности и верхней границе расчетной области,

$\theta_s(p)$  - фоновая потенциальная температура, зависит только от давления,

$\theta'$  - отклонение потенциальной температуры от фоновой,

$T_s(p)$  - фоновая температура, зависит только от давления,

$T'$  - отклонение температуры от фоновой,

$\{u, v, w\}$  - вектор скорости,

$\boldsymbol{\omega} = \{\omega_x, \omega_y, \omega_z\}$  - вихрь скорости,

$$\boldsymbol{\omega}_h = \{\omega_x, \omega_y\},$$

$$\nabla_h = \left\{ \frac{\partial}{\partial x}, \frac{\partial}{\partial y} \right\}.$$

## 2. Краткое руководство пользователя мезомасштабной атмосферной модели NH3D\_MPI

### Общие сведения о модели

#### 2.1. Требования к аппаратной среде и программному окружению

Модель работает в среде ОС Linux. В ОС должна быть установлена библиотека MPI (Intel MPI, openmpi или mvarich). Без библиотеки MPI модель компилироваться не будет. Собранный исполняемый файл модели может запускаться как на одном процессоре, так и на любом количестве процессоров, являющемся квадратом некоторого целого числа, например, 4, 9, 16, 25, 36, 49, 64, и т.д.

#### 2.2. Установка модели

Архив с моделью следует распаковать в произвольной директории. После этого устанавливаем пути к директориям модели, которые используются при компиляции. Для этого нужно в корневой директории модели выполнить следующие команды

```
$ chmod +x setpaths  
$ ./setpaths
```

#### 2.3. Компиляция модели

Компиляция модели производится в корневой директории модели командой

```
$ chmod +x ./compile.sh  
$ ./compile.sh all
```

При этом в корневой директории создается исполняемый файл `nh3d.out`. Если пользователем были изменены какие-то файлы с исходным кодом, то при повторном запуске этой команды, будет компилироваться исходный код только этих файлов.

Если по каким-то причинам необходимо перекомпилировать модель полностью, то для этого нужно сначала уничтожить все промежуточные файлы компиляции, а затем выполнить компиляцию заново:

```
$ ./compile.sh clean  
$ ./compile.sh all
```

#### 2.4. Запуск модели

Модель запускается скриптом `launch` с указанием параметров запуска:

```
$ chmod +x launch  
$ ./launch 4 4 15
```

Здесь приведен конкретный пример, в котором модель запускается на сетке  $4 \times 4 = 16$  процессоров с ограничением времени счета 15 минут.

В скрипте `launch` можно устанавливать конкретные спецификации команд запуска, действующие на данном компьютере. В текущей версии скрипта предлагаются спецификации для суперкомпьютеров МГУ «Чебышев» и «Ломоносов».

Стандартный вывод модели («на экран») и сообщения об ошибках записываются в файлы `nh3d.out.out- $\langle$ номер задачи $\rangle$`  на «Чебышеве», и в `slurm- $\langle$ номер задачи $\rangle$ .out` на «Ломоносове».

## 2.5. Особенности компиляции и запуска на файловой системе СК «Ломоносов»

Для того, чтобы скомпилировать модель, нужно сначала перейти на узел компиляции:

```
$ ssh compiler
```

зайти в папку модели и выполнить команды, указанные в п.2.4. После этого возвращаемся на основной узел:

```
$ exit
```

Запуск модели может производиться только из директории `~/_scratch`. Например, модель скомпилирована, настроена для запуска и находится в директории `~/nh3dmpi`. Тогда запуск производится следующим образом:

```
$ mkdir ~/_scratch/nh3dmpi
$ cd ~/nh3dmpi
$ cp -apr ./_* ../_scratch/nh3dmpi
$ cd ../_scratch/nh3dmpi
$ ./launch 4 4 15
```

Результаты расчетов при этом будут сохранены в `~/_scratch/nh3dmpi/results`. После каждого изменения модели (компиляции, изменения входных файлов, и т. д.), измененные файлы нужно копировать в `~/_scratch` командой

```
cp -ap ~/nh3dmpi/<путь к копируемому файлам>
../_scratch/nh3dmpi/<конечная директория для копирования>
```

и только после этого запускать из `~/_scratch/nh3dmpi` новый вариант модели.

## 2.6. Параметры численного эксперимента

Параметры численных экспериментов с моделью задаются в файле `nh3d.dat`. Параметры модели водоема задаются в файлах `map/setup_lake.dat` и `map/driver_lake.dat`. Следует отметить, что значительная часть параметров в `driver_lake.dat` не используется, поскольку эти параметры модели водоема задаются атмосферной моделью.

## 2.7. Входные файлы с характеристиками подстилающей поверхности

Характеристики подстилающей поверхности в модели могут задаваться двумя способами, в зависимости от значения ключевого слова `esoclimap` в файле `nh3d.dat`. Если `esoclimap=0`, то характеристики считываются моделью из файлов `map/grid_map.*` формата DSAA, причем расширение этих файлов обозначает характеристику, записанную в них. Если эти файлы отсутствуют, или требуется задать другое распределение параметров поверхности, то можно заново сгенерировать эти файлы программой с исходным кодом в файле `masksoil/masksoil.f90`. Если `esoclimap=1`, то модель считывает информацию о поверхности земли из банка данных ESOCLIMAP, располагающегося в `map/ESOCLIMAP`, и при этом перезаписываются соответствующие файлы `map/grid_map.*`.

## 2.8. Выходные файлы модели

Выходные файлы модели располагаются в папке `results`. В папке `results/atmodel` лежат двоичные файлы с трехмерными полями метеорологических величин в  $\sigma$ -системе

координат, записанными во время интегрирования модели с определенными периодом (период записи измеряется в шагах по времени и задается в файле `nh3d.dat`). Эти файлы перечислены в Таблице 1.

Таблица 1. Выходные файлы модели NH3D MPI

Название файла	Размерность поля	Уровень	Переменная
<code>u.std</code>	3	-	Зональная компонента скорости, м/с
<code>v.std</code>	3	-	Меридиональная компонента скорости, м/с
<code>w.std</code>	3	-	Вертикальная компонента скорости, м/с
<code>pt.std</code>	3	-	Отклонение потенциальной температуры от фонового значения, К
<code>qv.std</code>	3	-	Удельная влажность, кг/кг
<code>qc.std</code>	3	-	Массовая доля облачных капель, кг/кг
<code>qr.std</code>	3	-	Массовая доля дождевых капель, кг/кг
<code>meth.std</code>	3	-	Концентрация метана, моль/м <sup>3</sup>
<code>us.std</code>	2	Нижний $\sigma$ -уровень модели	Зональная компонента скорости, м/с
<code>vs.std</code>	2	Нижний $\sigma$ -уровень модели	Меридиональная компонента скорости, м/с
<code>tsurf.std</code>	2	Поверхность земли	Температура подстилающей поверхности, К
<code>h.std</code>	2	Поверхность земли	Поток явного тепла, Вт/м <sup>3</sup>
<code>Te.std</code>	2	Поверхность земли	Поток скрытого тепла, Вт/м <sup>3</sup>
<code>fmeth.std</code>	2	Поверхность земли	Поток метана, моль/(м <sup>2</sup> *с)
<code>srads.std</code>	2	Поверхность земли	Суммарная солнечная радиация, Вт/м <sup>2</sup>
<code>lrads.std</code>	2	Поверхность земли	Длинноволновая радиация атмосферы, Вт/м <sup>2</sup>

Кроме файлов с трехмерными полями в  $\sigma$ -системе координат, модель может записывать трехмерные поля в z-системе координат. При этом высоты z-уровней принимаются равными высотам  $\sigma$ -поверхностей конечно-разностной сетки в начальный момент времени. При создании файлов используются имена таблицы 1 с суффиксом `_z`, например, `u_z.std`. Чтобы включить вывод полей модели на z-сетке, необходимо в `nh3d.dat` задать

`zunfout .true.`

Высоты, на которые при этом будут интерполированы трехмерные поля с  $\sigma$ -системе, выдаются в стандартный вывод модели до начала интегрирования системы уравнений (т. е.

на этапе инициализации).

Временные серии интегральных по области расчета энергетических характеристик атмосферы (2-6) записываются в файл \*.ene.

## **2.9. Визуализация результатов моделирования**

Для визуализации результатов расчетов модели понадобится пакет Surfer. Для перевода двоичных файлов (табл. 1) в формат DSAA, который читает Surfer, можно воспользоваться утилитой raw2dsaa.exe. Для этого файлы \*.std помещаются в папку /raw, затем параметры модельной сетки (обратите внимание, что нумерация вертикальных уровней начинается с подстилающей поверхности, так что ближайший к поверхности уровень в атмосфере имеет номер 2) устанавливаются в файле input.txt, и запускается raw2dsaa.exe. После успешного срабатывания утилиты, в папке /DSAA появляются файлы с названиями <обозначение переменной>\_<номер уровня>\_<номер шага по времени>.grd, например, u\_001\_000001.grd. При этом обозначения переменных в этих файлах соответствуют обозначениям в файлах табл. 1. Файлы \*.grd можно читать и визуализировать непосредственно в Surfer.