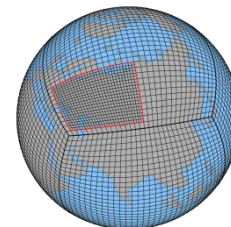


Параллельная эффективность модели атмосферы на сетке кубическая сфера с подключенным блоком параметризаций физических процессов подсеточного масштаба

*В. Шашкин, Г. Гойман, Д. Марханов, И. Третьяк
при участии: М. Толстых, Р. Фадеев*

Москва, 28.09.2026



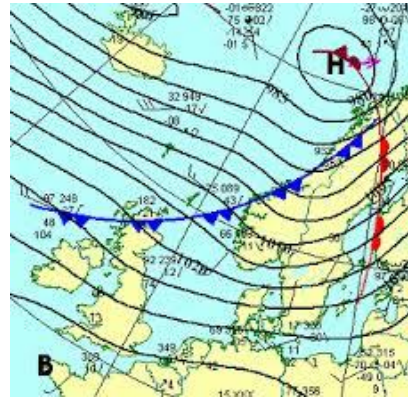
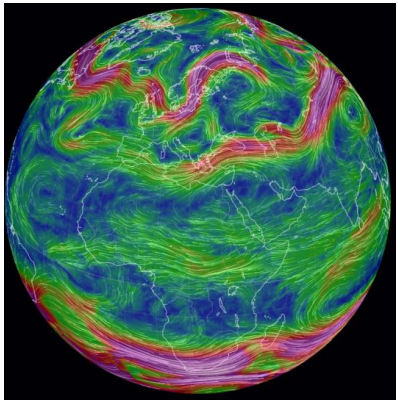
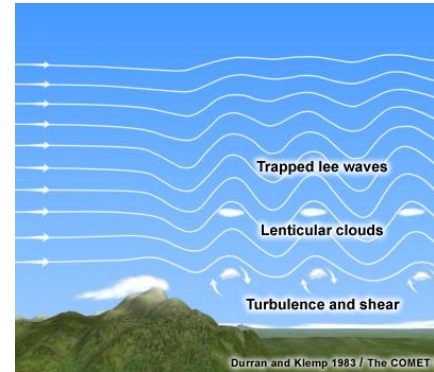
Введение

Динамическое ядро – часть модели атмосферы, которая решает уравнения гидротермодинамики для явлений, разрешаемых на сетке

$$\begin{aligned} \frac{d\vec{v}}{dt} &= -2\Omega \times \vec{v} - \vec{g} - \frac{1}{\rho} \nabla p + \Phi_{\vec{v}} \\ \frac{dT}{dt} &= -RT \nabla \cdot \vec{v} + \Phi_T \\ \frac{d\rho}{dt} &= -\rho \nabla \cdot \vec{v} + \Phi_{\rho} \end{aligned}$$

«динамика»

«физика»



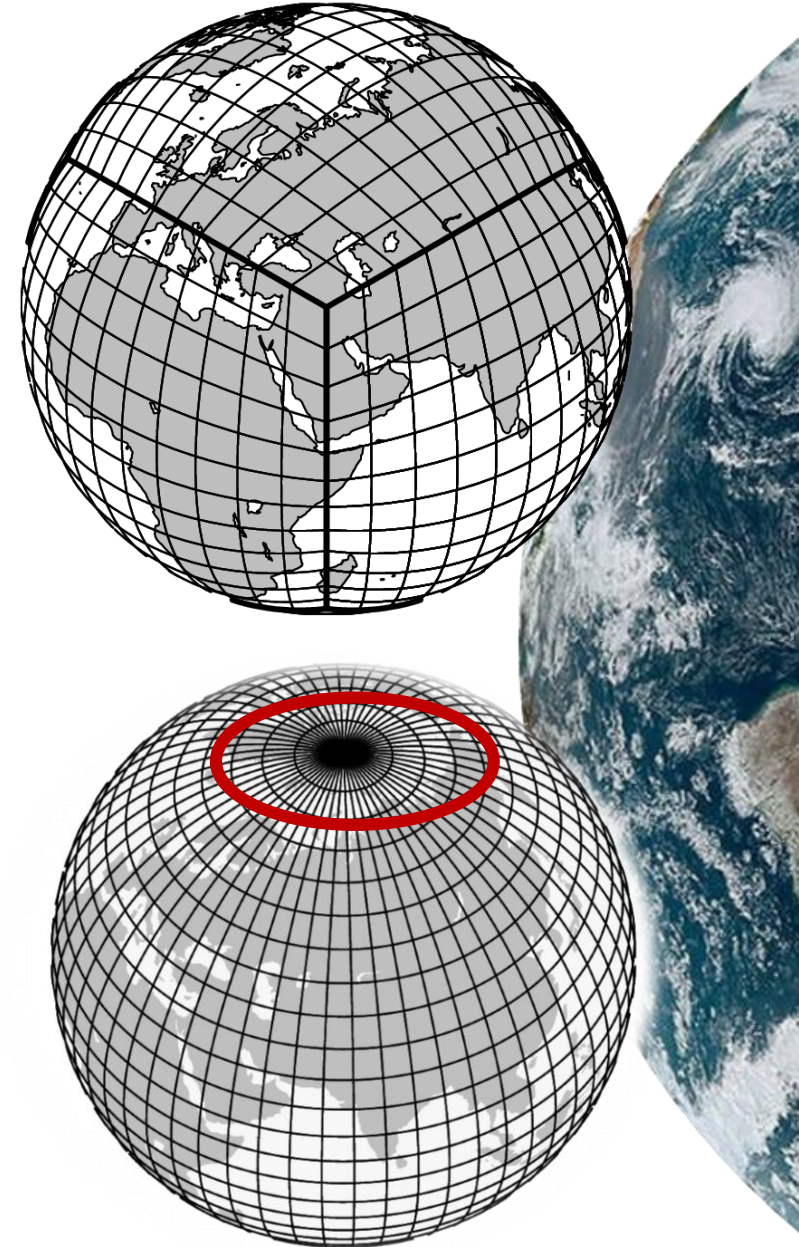
- 
- Универсальный блок численного решения уравнений динамики атмосферы для разных задач:
 - Прогноз погоды, климат, (средняя и верхняя атмосфера?)
 - Новые возможности:
 - Высокое разрешение (вплоть до 1км)
 - Негидростатический вариант
 - Параллельная эффективность, вычисления на GPU
 - Локальное повышение разрешения
 - Один код – «зоопарк» моделей (гидростатическая, негидростатическая, блок переноса)
 - Технологичность, лучший код (структурируемость, тестируемость, возможности адаптации к архитектуре, расширяемость...)

Новый динамический блок + существующие параметризации (ПЛАВ, INMCM)

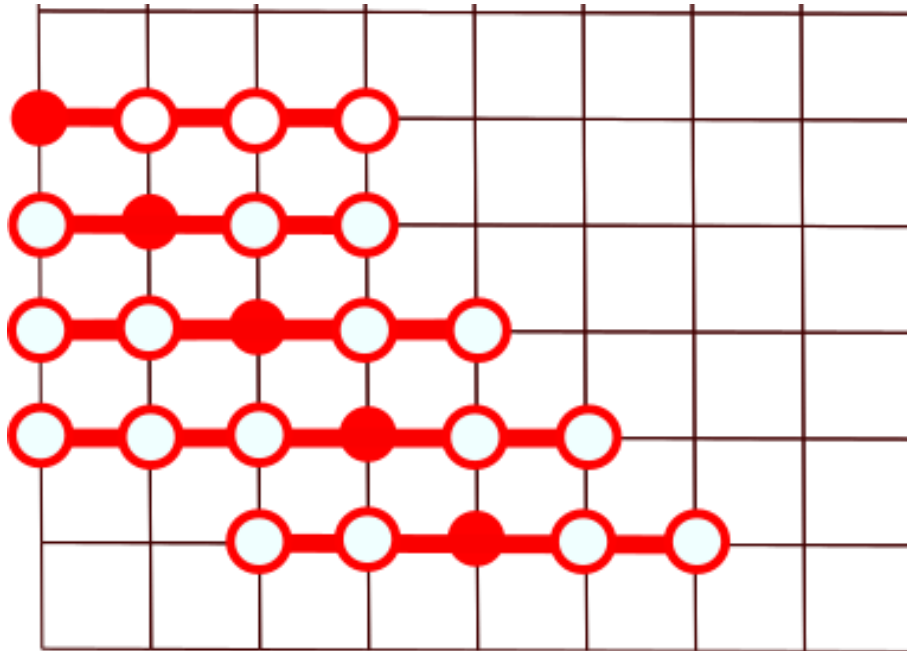
- **Сетка кубическая сфера** – квазиравномерное разрешение на сфере (нет полюса, критично для расчетов в высоком разрешении)
- **SBP конечно-разностный метод** => высокий порядок аппроксимации, устойчивость, выполнение законов сохранения на квазиравномерной сетке

Основное требование к дискретным операторам:

$$\int_{\Omega} (\vec{v} \cdot \nabla p + p \nabla \cdot \vec{v}) d\Omega = 0$$



Аппроксимация по пространству: SBP конечно-разностный метод



Шаблон (для закрашенных точек)
SBP-оператора вычисления
производной порядка 4/2

$$\Delta x^{-1} \begin{pmatrix} -\frac{1}{2} & \frac{59}{96} & -\frac{1}{12} & -\frac{1}{32} & & & \\ -\frac{59}{96} & 0 & -\frac{59}{96} & 0 & & & \\ \frac{1}{12} & -\frac{59}{96} & 0 & \frac{59}{96} & -\frac{1}{12} & & \\ \frac{1}{32} & 0 & -\frac{59}{96} & 0 & \frac{2}{3} & -\frac{1}{12} & \\ & & \frac{1}{12} & -\frac{2}{3} & 0 & \frac{2}{3} & -\frac{1}{12} \\ & & & \ddots & \ddots & \ddots & \ddots \\ & & & & & \ddots & \ddots \end{pmatrix}$$

Матрица SBP-оператора
вычисления производной порядка
4/2

Конфигурации модели



Сложность динамики

Сложность вычислений			
Разрешение \ Конфигурация	Низкое (~100км)	Среднее (10-25 км)	Высокое (<10 км)
Гидростатическая явная	Аквапланета	Идеализ. тесты	
	АМИП		
Гидростатическая полулагранжева полуневная	Идеализ. тесты	Идеализ. тесты	
Негидростатическая полуневная	Идеализ. тесты	Идеализ. тесты	
Негидростатическая полулагранжева полуневная	Идеализ. тесты	Идеализ. тесты	

Дополнительное измерение – сгущения сетки

Аквапланета – планета покрытая океаном, подсеточные процессы
АМИП – «реальная планета», полный набор подсеточной физики

Эксперимент «Аквапланета»

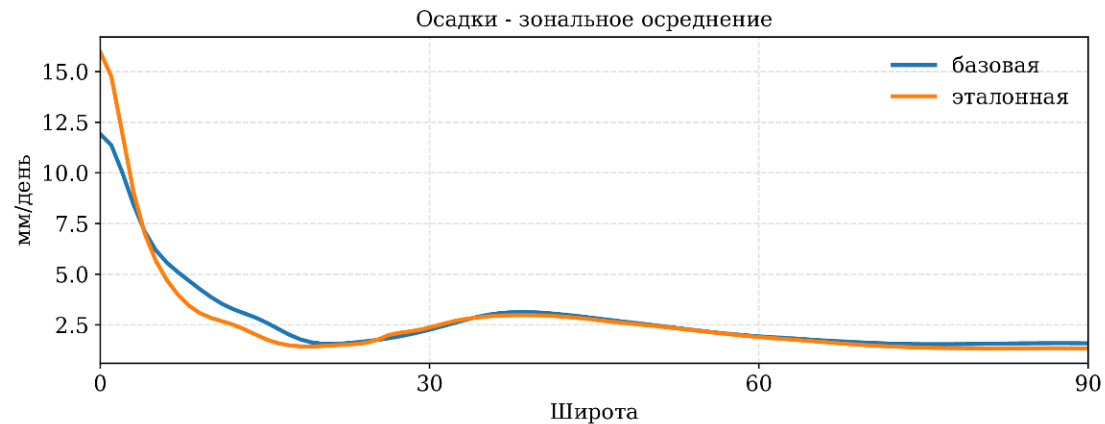
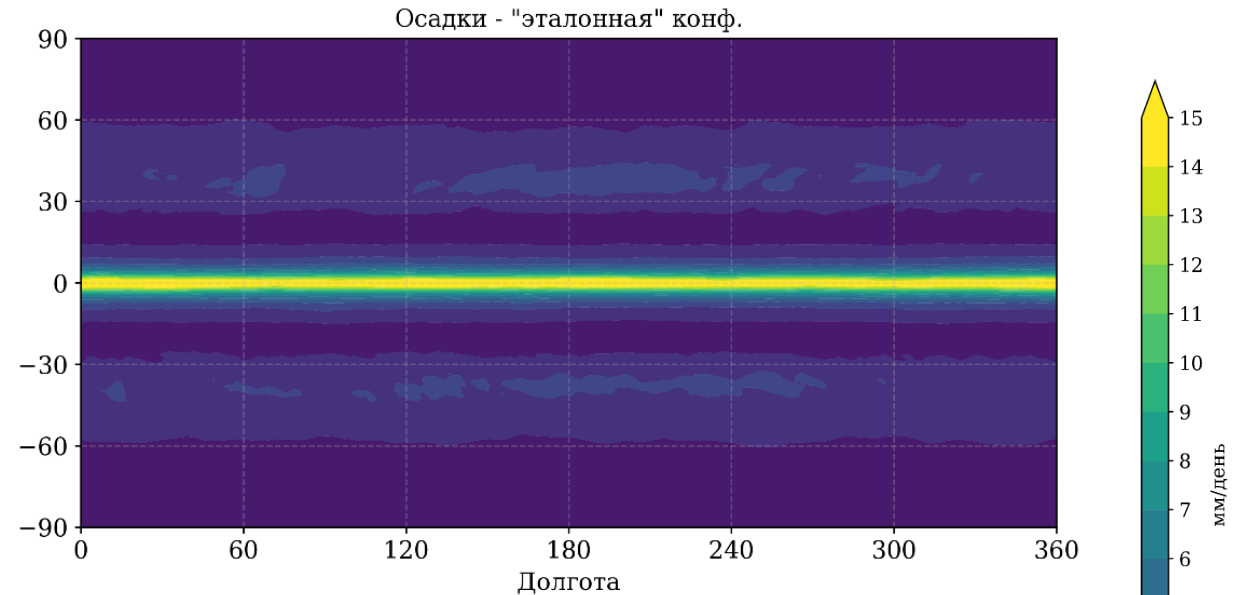
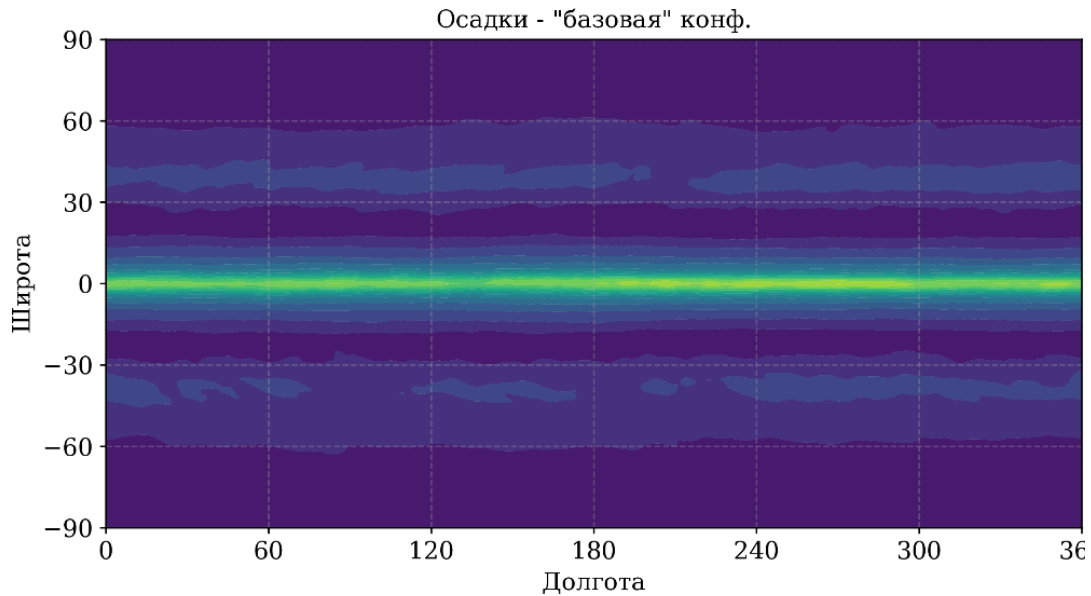
- Планета покрытая океаном, предписанная темп. пов. океана
- Суточный цикл радиации, но «вечное» равноденствие
- Полный пакет физических параметризаций модели ПЛАВ
- Изотермические начальные условия (6 мес. на раскрутку)
- Сетка кубическая сфера (1°), 96 уровней по вертикали, шаг по времени динамики 200 с
- **Эталонная конфигурация:** динамика - двойная точность, вызов физики – каждый шаг динамики
- **Базовая конфигурация:** динамика – одинарная точность, вызов физики – 1 раз в 1800 с. *Тенденции физики добавляются в неизменном виде 9 шагов динамики.*



Эксперимент «Аквапланета» - результаты

Статистика циркуляции слабо зависит от одинарной/двойной точности в динамике

В моментальных полях нет артефактов от расчетов «физики» 1 раз в 9 шагов

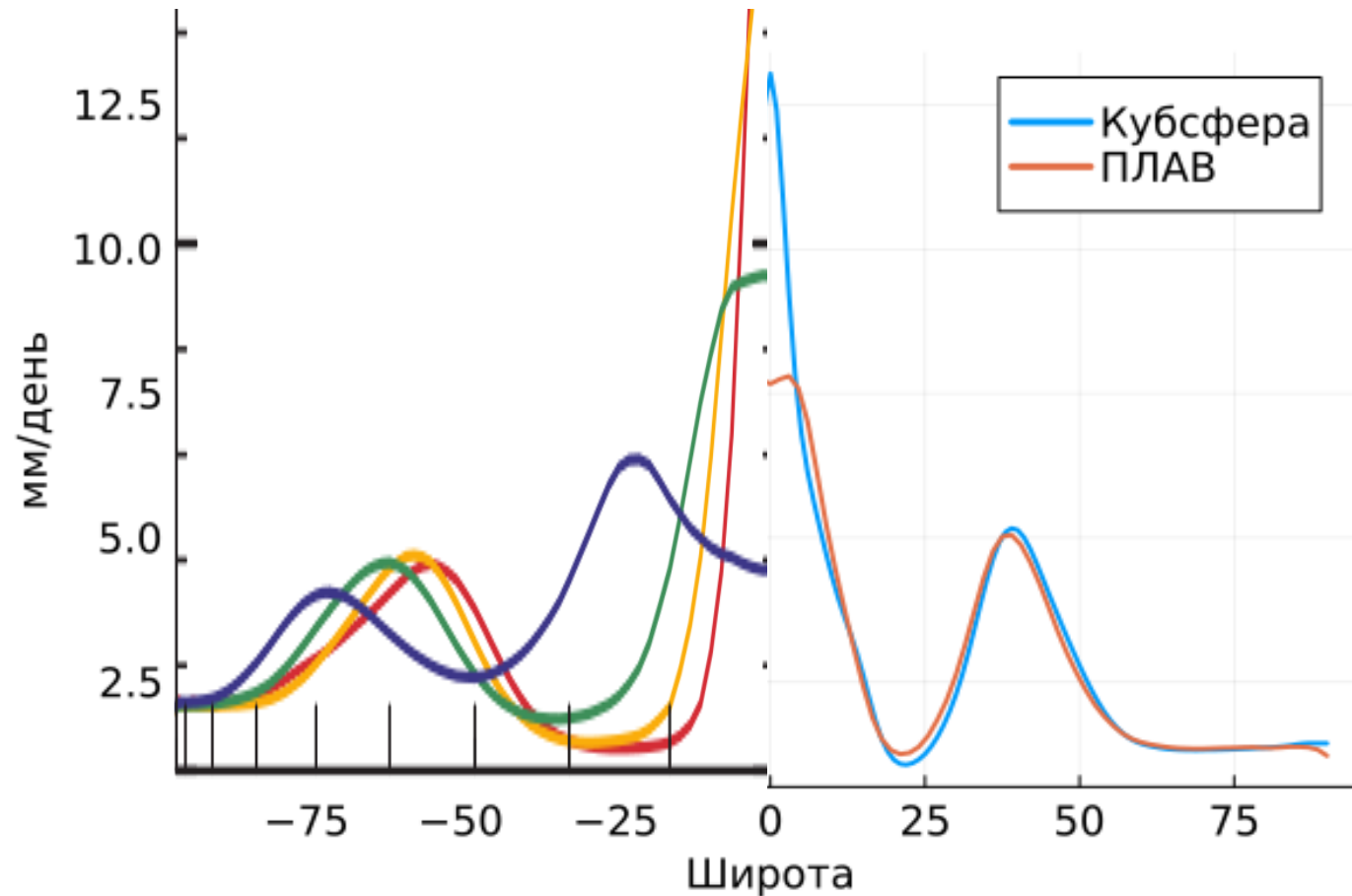


Среднее поле осадков за ~ 1500 дней эксперимента аквапланета. Снизу – зональное среднее (+ по полушариям)

Значимое отличие в тропиках. А как правильно?



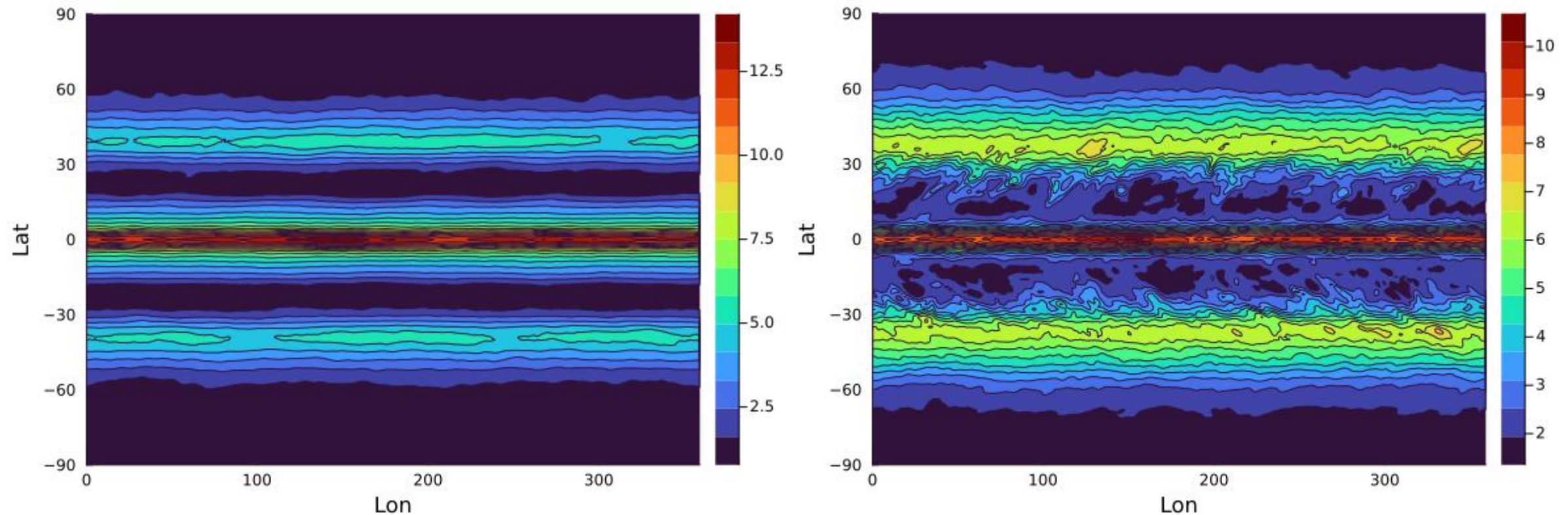
Эксперимент «Аквапланета» - осадки



Среднее за 2000 дней поле осадков (зональное осреднение) (синий – кубическая сфера, красный - ПЛАВ). Слева – мультимодельный ансамбль (см. **зеленую кривую**)

Получается, «базовая» - лучше «эталонной». Причина – настройка параметризаций ПЛАВ на $dt=1440$ с

Эксперимент «Аквапланета» - осадки

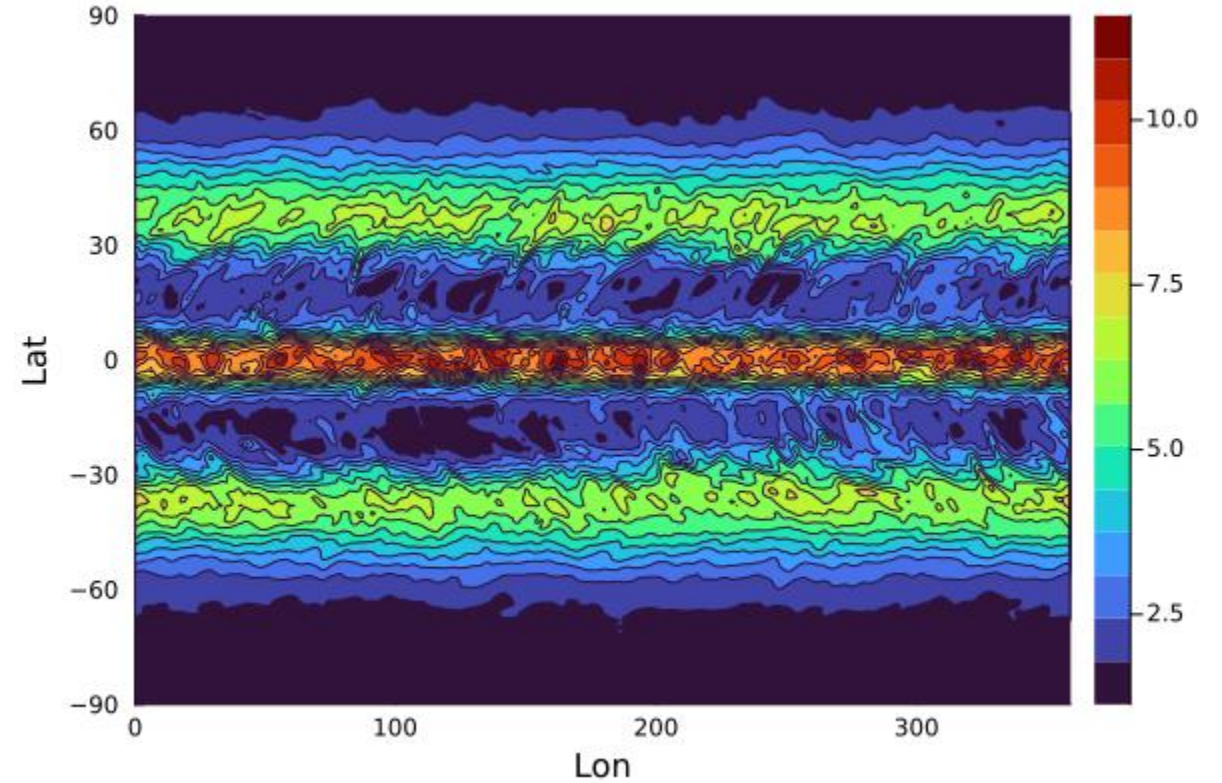
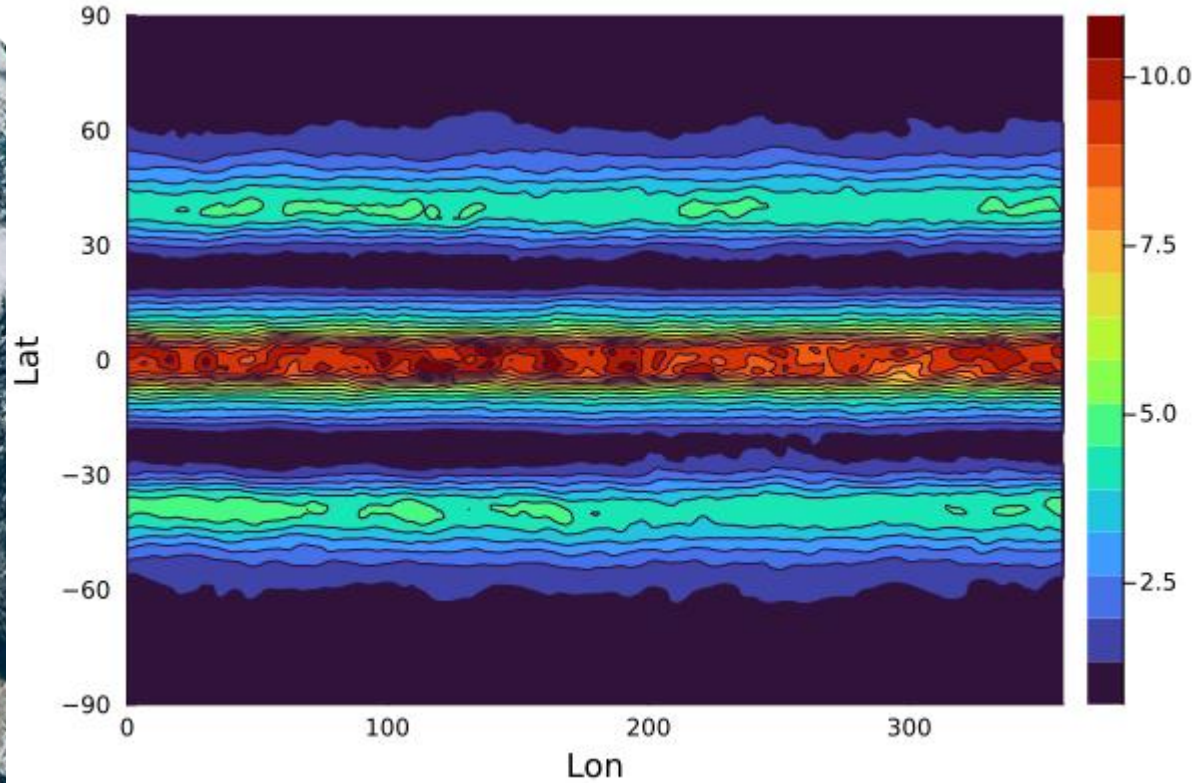


Слева – среднее за 2000 дней поле осадков (мм/день). Справа – стандартное отклонение поля осадков за 200 дней (мм/день).

(Обе картинки – модель на кубической сфере, схема 4-го порядка аппроксимации по пространству)

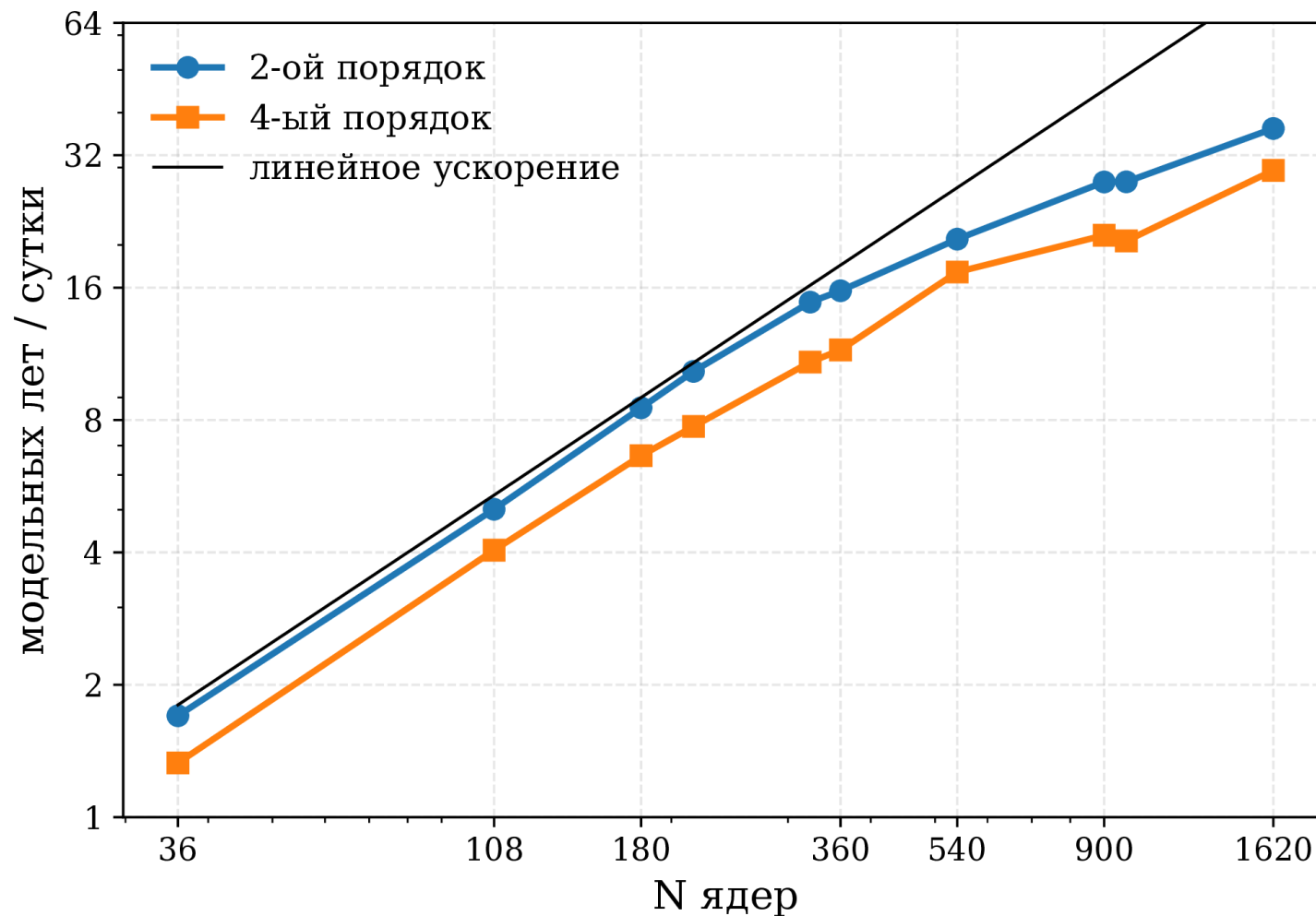
Нет выраженного эффекта отпечатка сетки

Эксперимент «Аквапланета» - осадки



Среднее за 900 дней поле осадков (слева) и стандартное отклонение осадков (справа). Схема 2-го порядка точности.

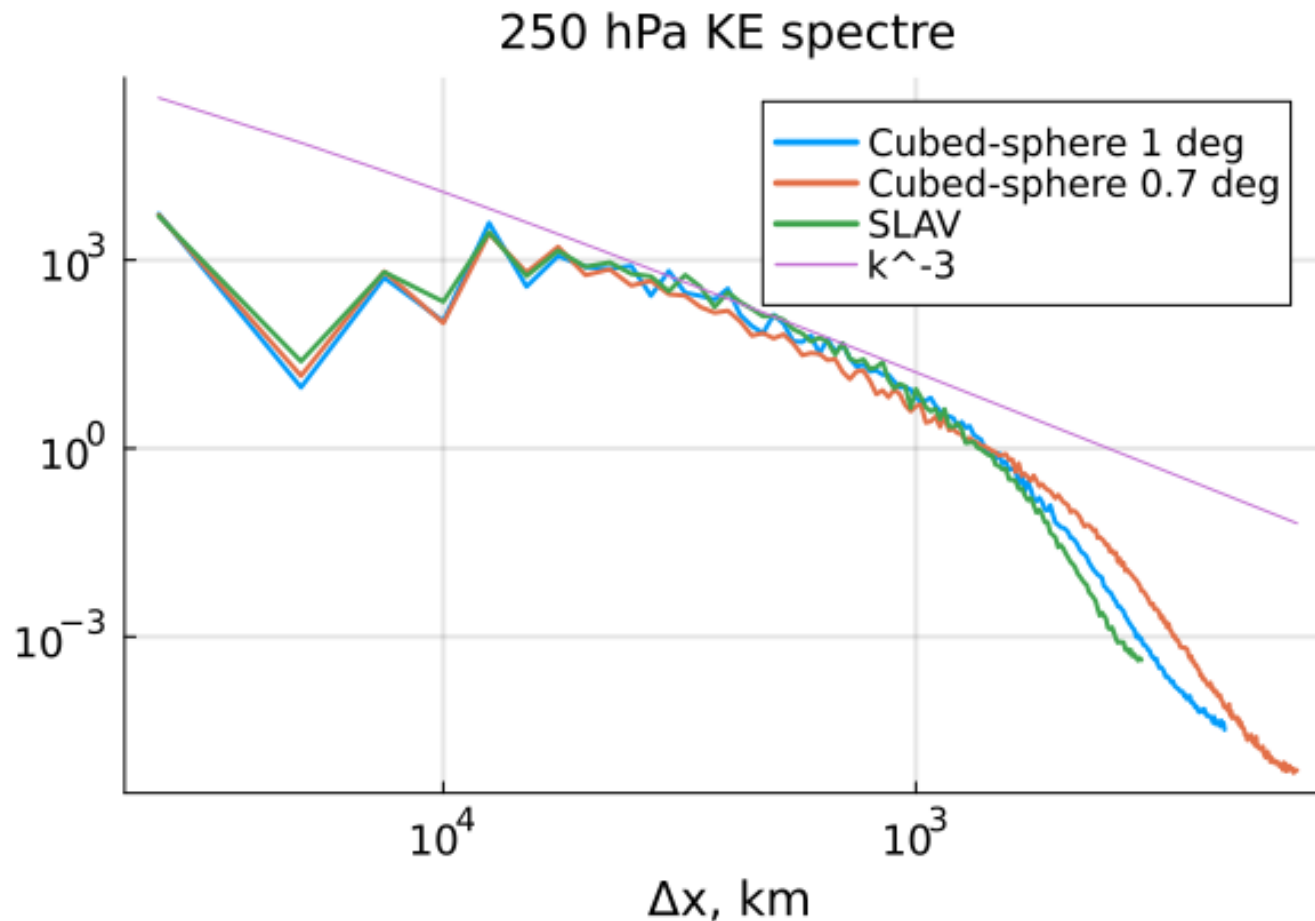
Эксперимент «Аквапланета» - масштабируемость



Сильная масштабируемость «базовой» конфигурации на вычислительной системе CRAY XC-40 Росгидромета. На 540 ядрах скорость расчета – как у модели ПЛАВ 0,9x0,72 (но у ПЛАВ в 2 раза больше точек сетки)



Аквапланета - эффективное разрешение



Спектр кинетической энергии на уровне 250 гПа. (Синий и красный – кубическая сфера, зеленый - ПЛАВ). Кубическая сфера с разрешением 1° по эффективному разрешению соответствует модели ПЛАВ $0,9 \times 0,72$ (у ПЛАВ в 2 раза больше точек сетки)

Схема 2-го порядка аппроксимации

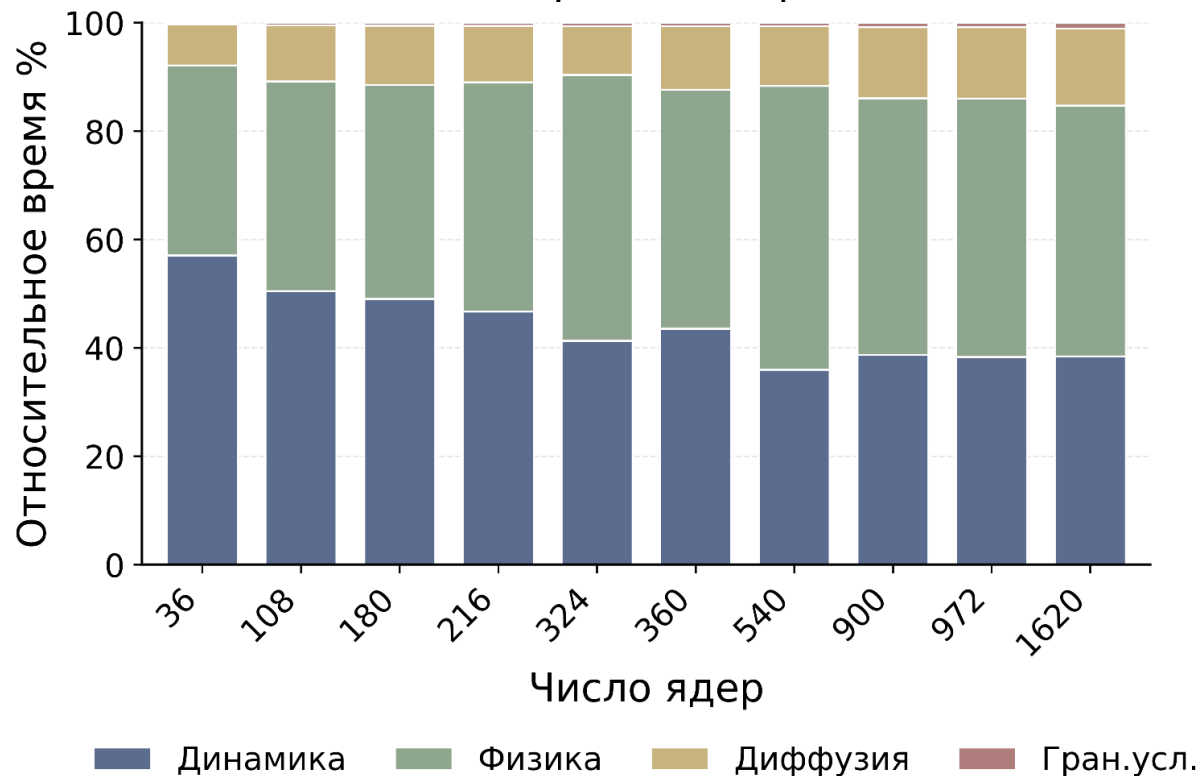
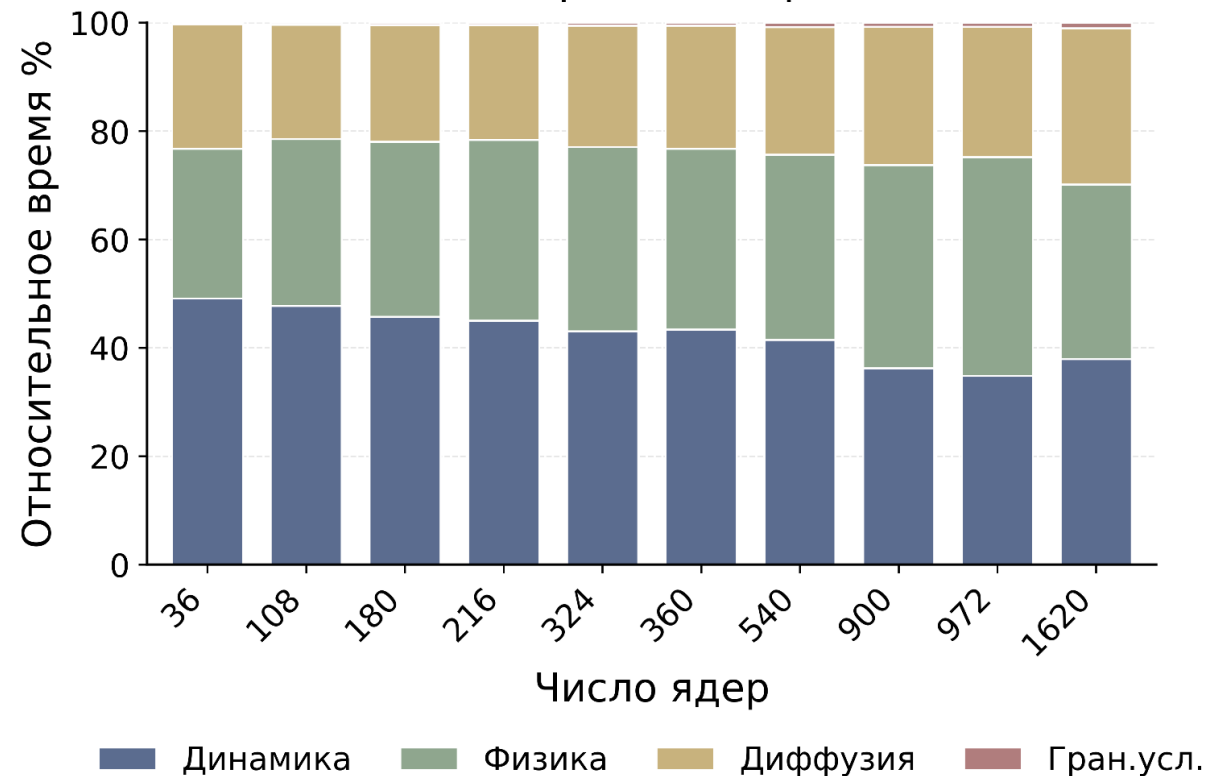


Схема 4-го порядка аппроксимации

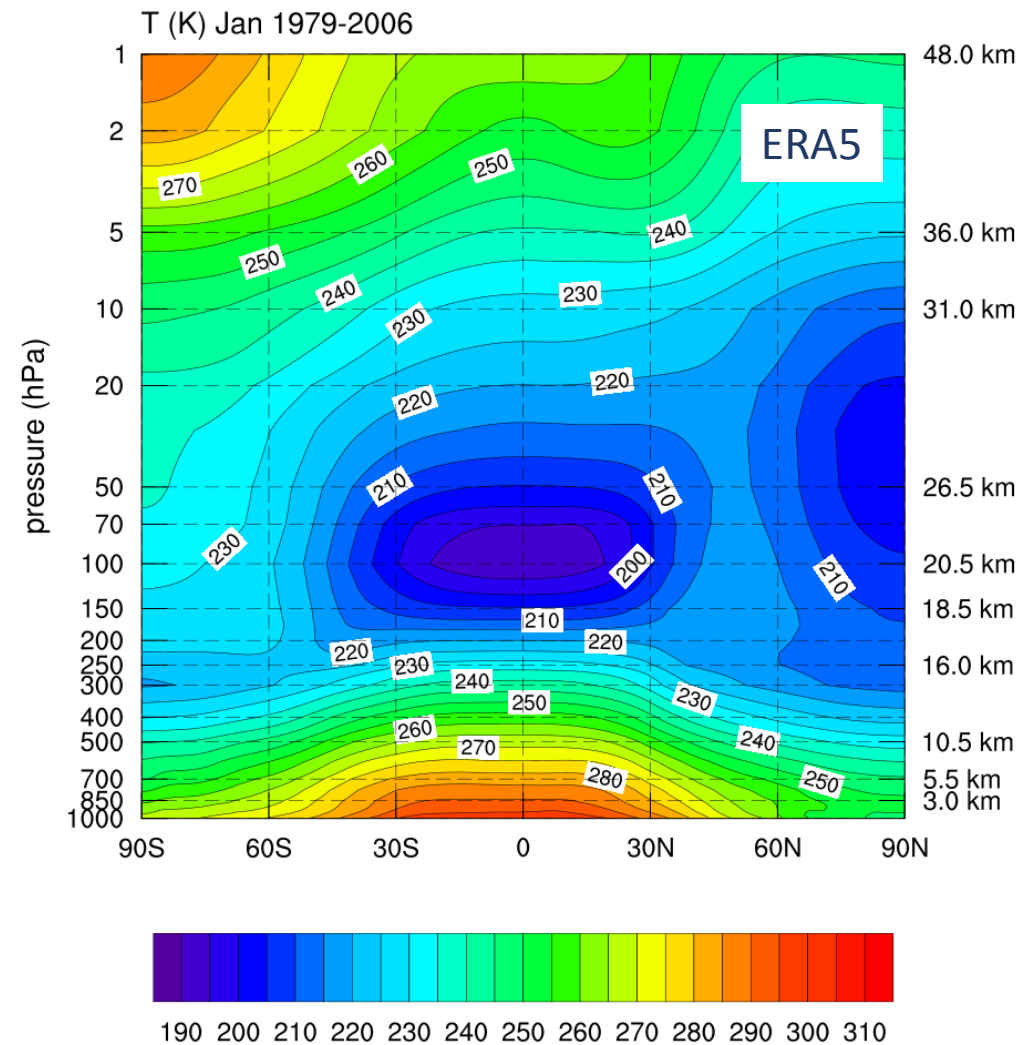
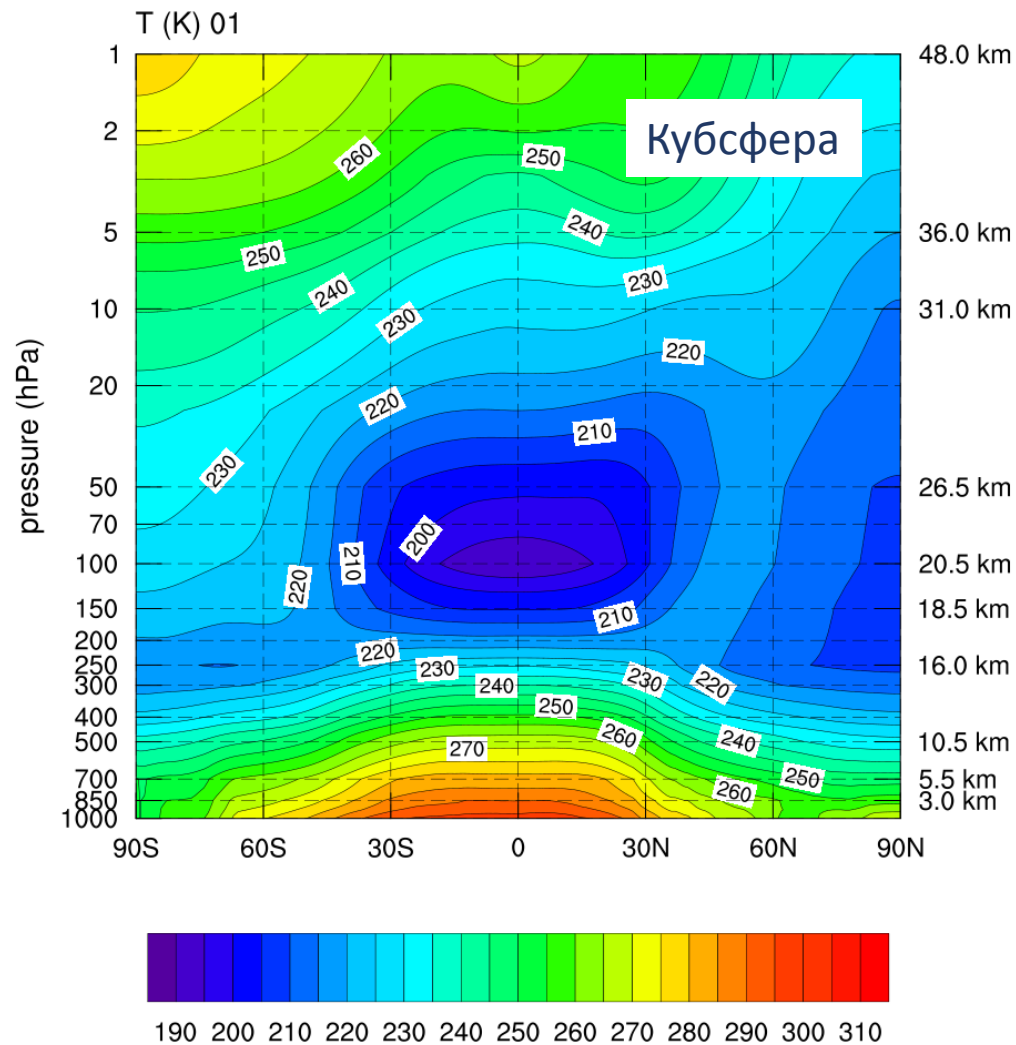


Относительное время исполнения блоков модели при разном числе ядер

- Поверхность – океан+суша, предписанная темп. пов. океана
- Модель суши в параметризация подсеточных процессов
- Полный пакет физических параметризаций модели ПЛАВ
- Начальные условия – оперативный анализ ГМЦ («реальные»)
- Суточный и годовой ход солнца (большие скорости в стратосфере)
- Сетка кубическая сфера (1°), 96 уровней по вертикали, шаг по времени динамики 180 с
- Первые результаты (еще много артефактов), но кое что уже получается

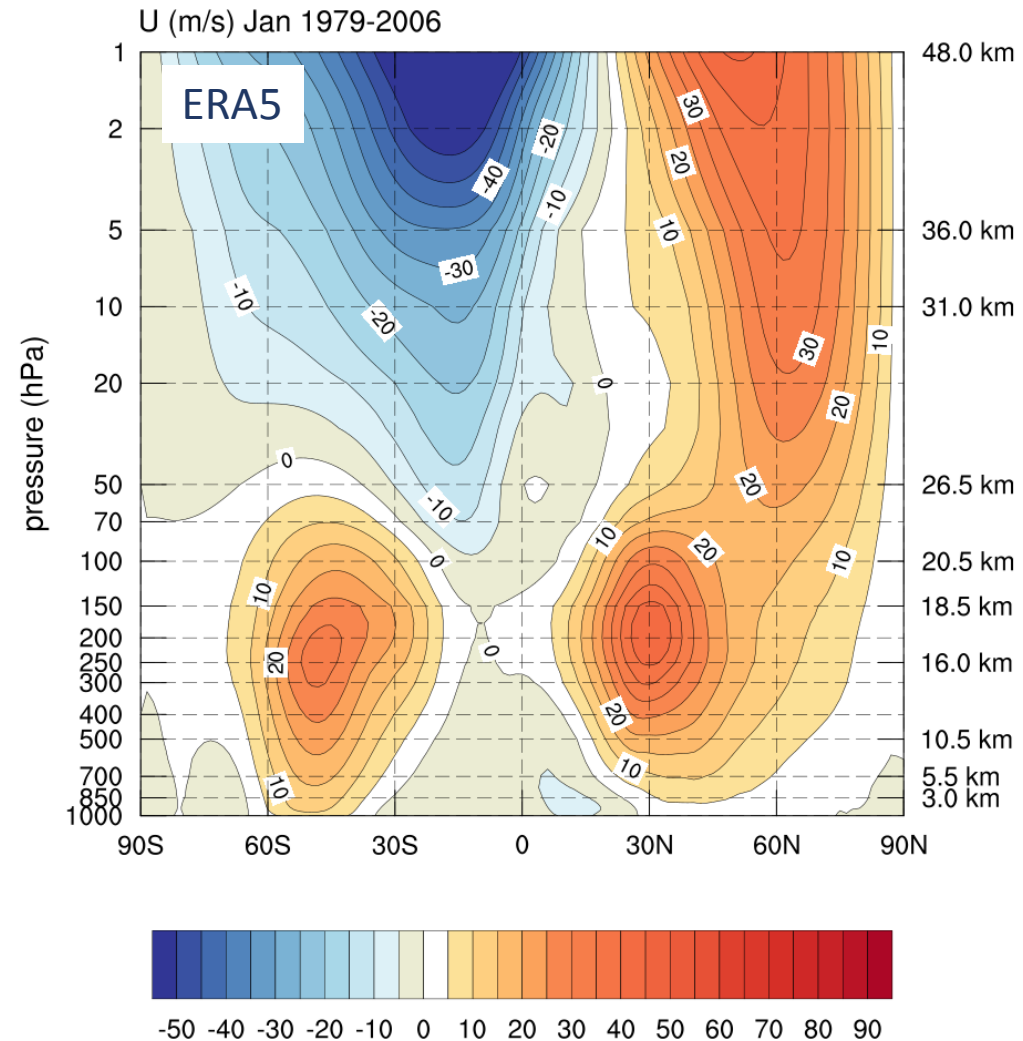
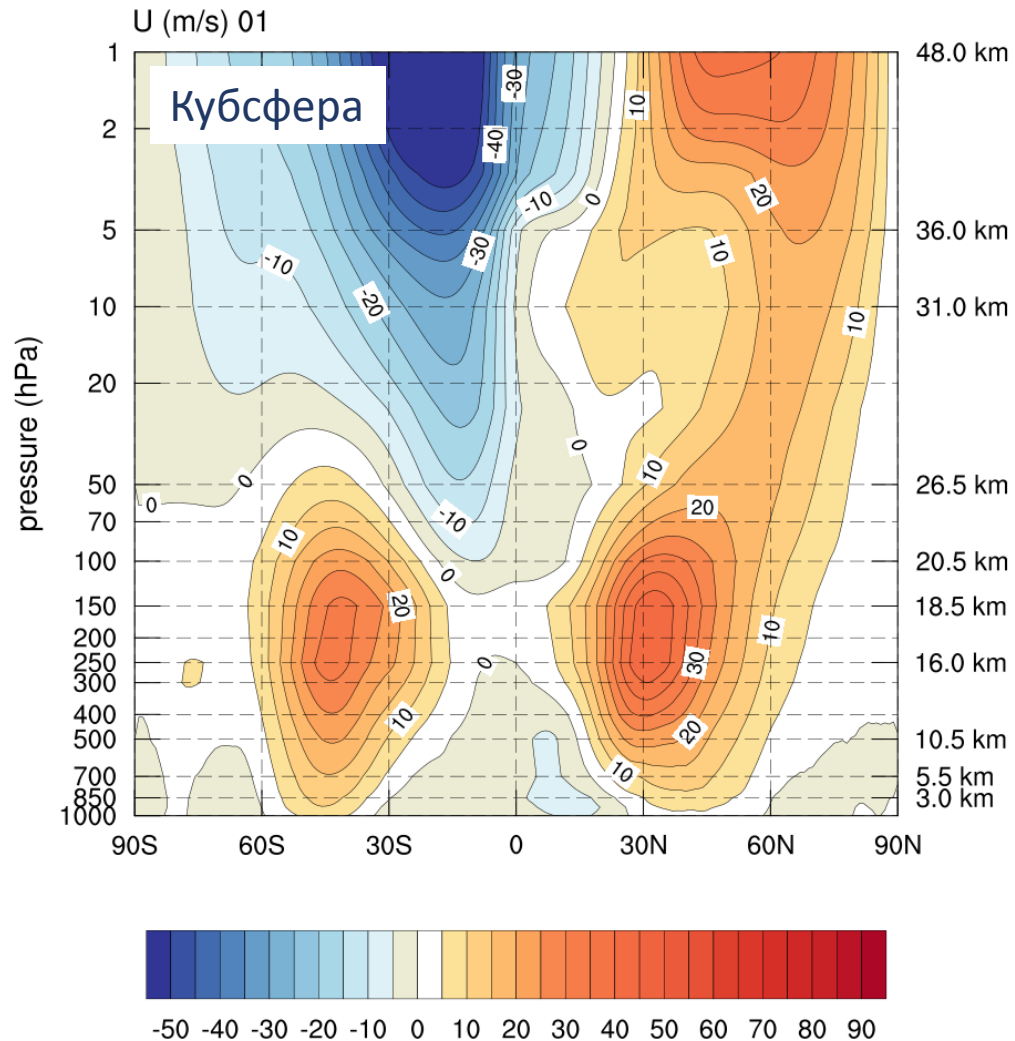


Эксперимент «Аквапланета»



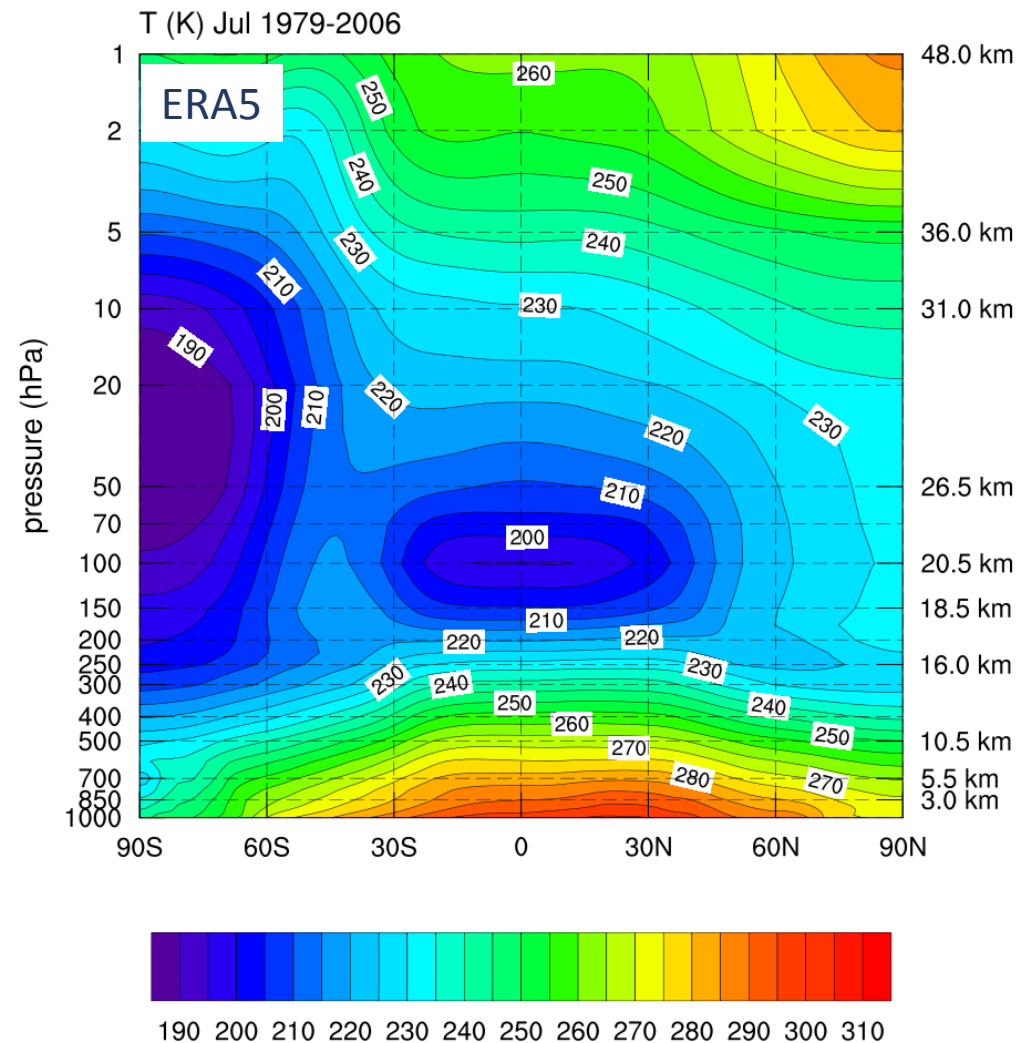
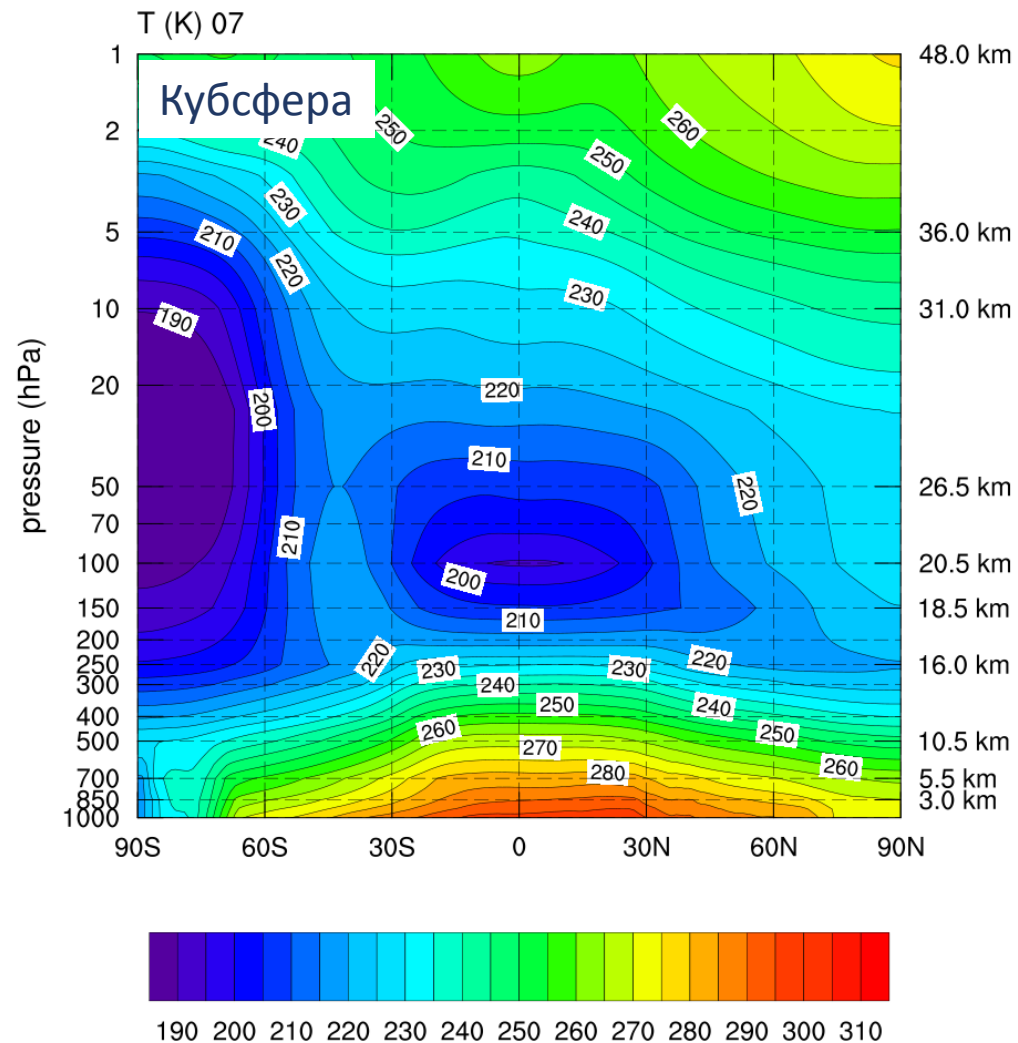
Зонально-осредненное поле температуры, январь, эксперимент AMIP. Слева – кубсферная модель, среднее за 5 лет, справа – реанализ ERA5, среднее за 27 лет

Эксперимент «Аквапланета»



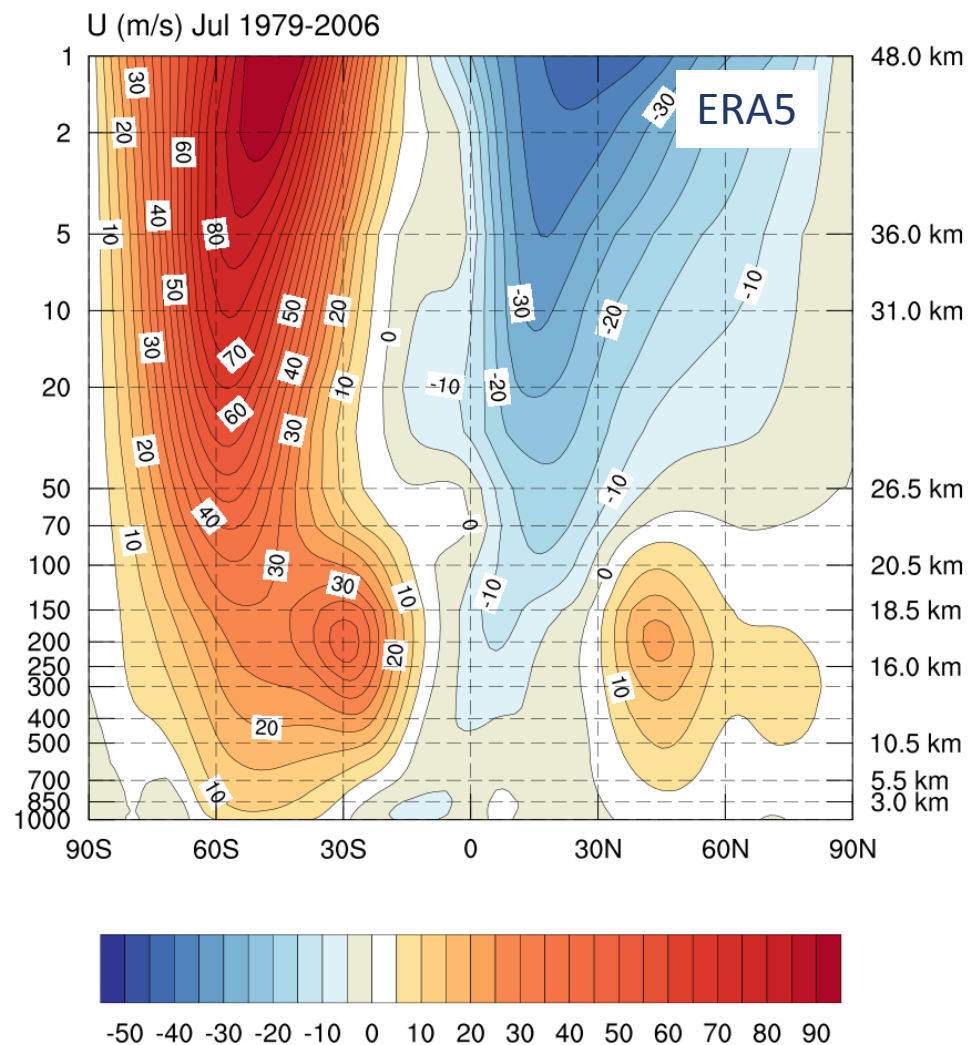
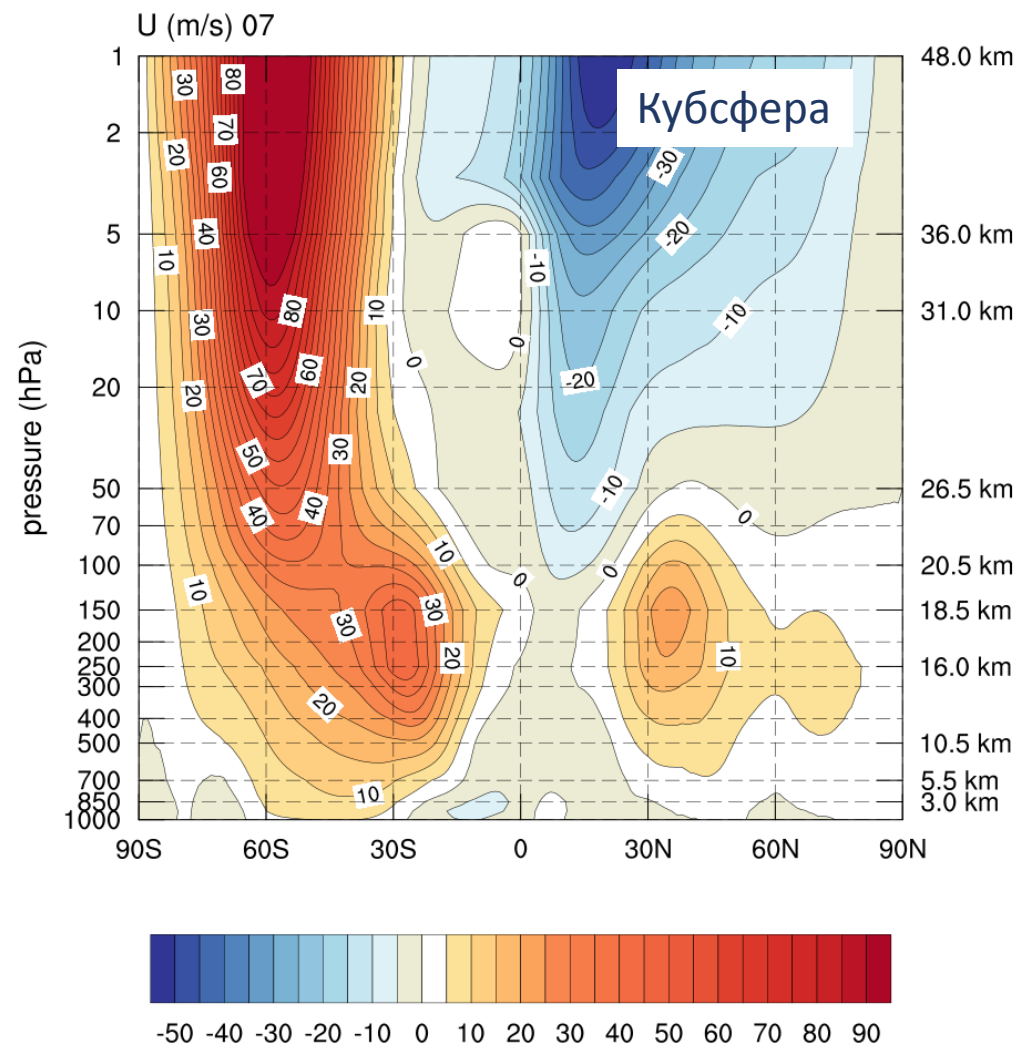
Зонально-осредненное поле скорости ветра, январь, эксперимент AMIP. Слева – кубсферная модель, среднее за 5 лет, справа – реанализ ERA5, среднее за 27 лет

Эксперимент «Аквапланета»



Зонально-осредненное поле температуры, июль, эксперимент AMIP. Слева – кубсферная модель, среднее за 5 лет, справа – реанализ ERA5, среднее за 27 лет

Эксперимент «Аквапланета»



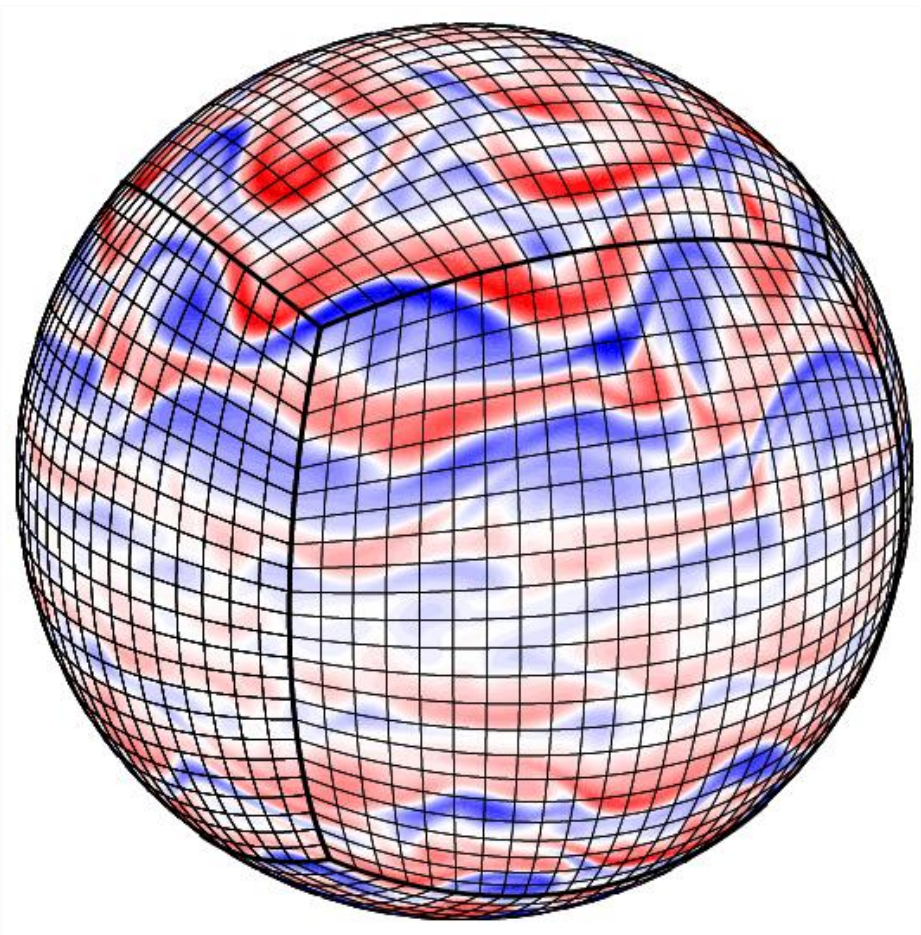
Зонально-осредненное поле скорости ветра, июль, эксперимент AMIP. Слева – кубсферная модель, среднее за 5 лет, справа – реанализ ERA5, среднее за 27 лет

- Есть конфигурация модели на сетке кубическая сфера, аналогичная по характеристикам версии модели ПЛАВ для сезонного прогноза погоды по скорости расчетов и разрешению.
- Расчет с полной физикой 17 лет/ сутки в разрешении 1°.
- **Есть конфигурация, которая считает динамику реальной атмосферы**

Дальнейшая работа:

- быстрее, выше, точнее





Владимир Шашкин



Гордей Гойман



Илья Третьяк
МФТИ



Дмитрий Марханов
МГУ

Спасибо за внимание!

Владимир Шашкин (vvshashkin@gmail.com)

<https://gitlab.inm.ras.ru/vshashkin/ParCS>

