

Моделирование и анализ климата с помощью моделей климатической системы.

Градов В. С.

аспирант 3 курса ММФ НГУ,

м.н.с. ИВМиМГ СО РАН

Научный руководитель:

Платов Г. А.

д.ф.-м.н., г.н.с. ИВМиМГ СО РАН

27 октября 2022

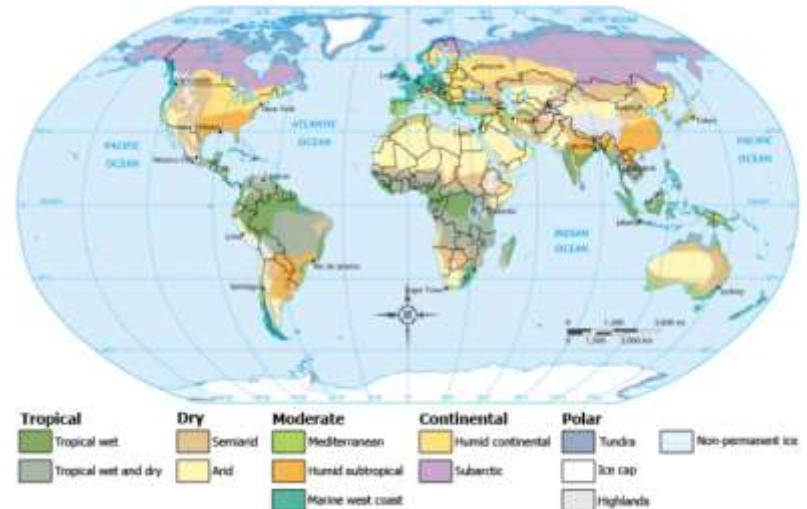
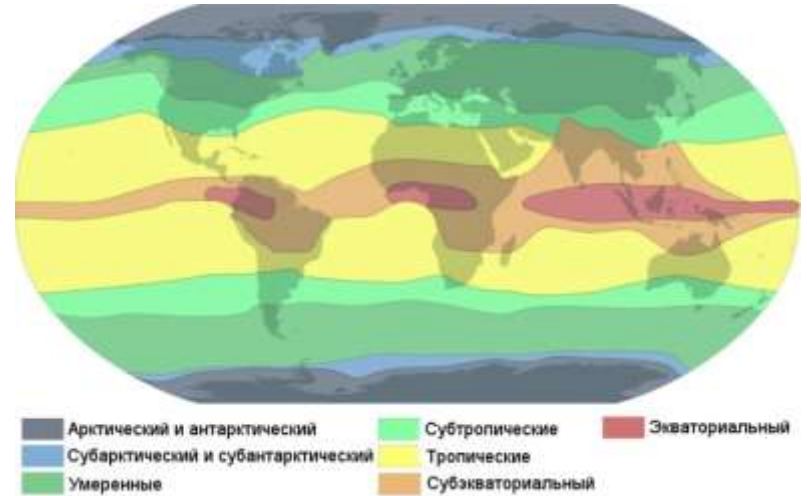
Климат



Климат

Можно выделить локальный и глобальный климат.

- Локальный климат характеризуется географическим положением
- Глобальный климат характеризуется элементами окружающей среды: океан, атмосфера, солнечное излучение, ледяной покров, суша биогеохимия и т.д.



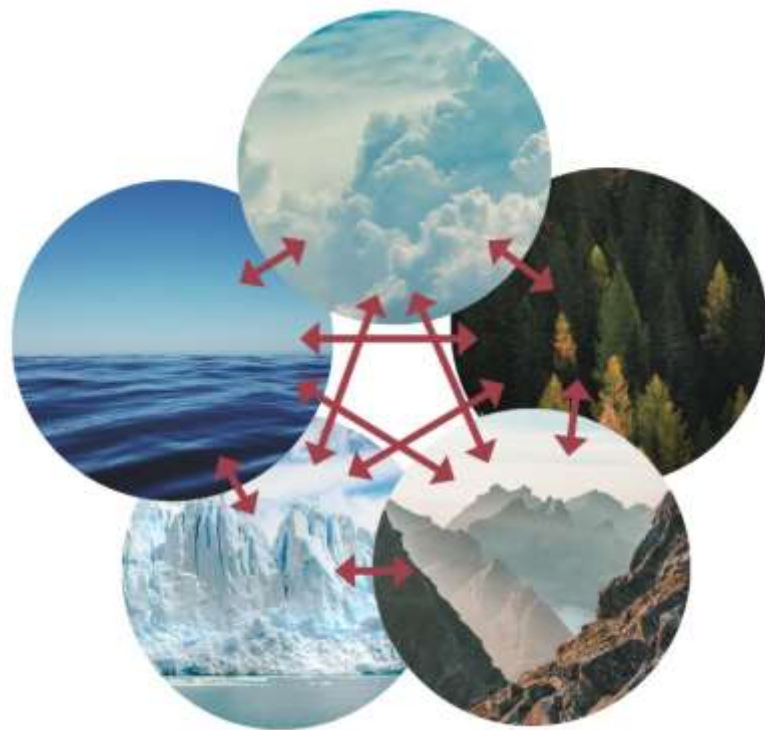
Климатическая система

Определение 1.

Климатическая система – система, объединяющая атмосферу, океан, сушу, криосферу и биоту.

Определение 2.

Климат – ансамбль состояний, проходящий климатической системой за достаточно большое время



Важный вопрос: Что такое *состояние климатической системы, ансамбль состояний, «достаточно большое время»?*

Климатическая система

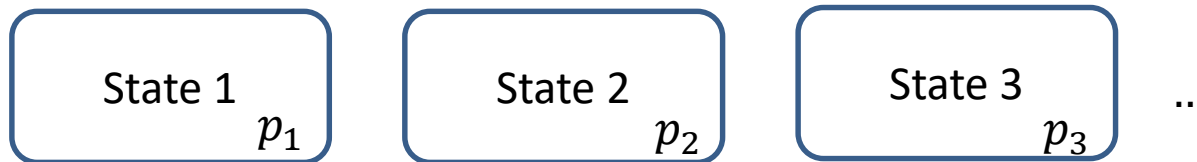
Определение 2.

Климат – ансамбль состояний, проходящий климатической системой за достаточно большое время

- Состояние климатической системы определяется конечным числом параметров системы.

$$T(t_0), P(t_0), \rho(t_0), u(t_0), v(t_0), w(t_0), S(t_0), \dots$$

- Ансамбль состояний – набор состояний из множества из множества состояний с введенной на нем вероятностной мерой.

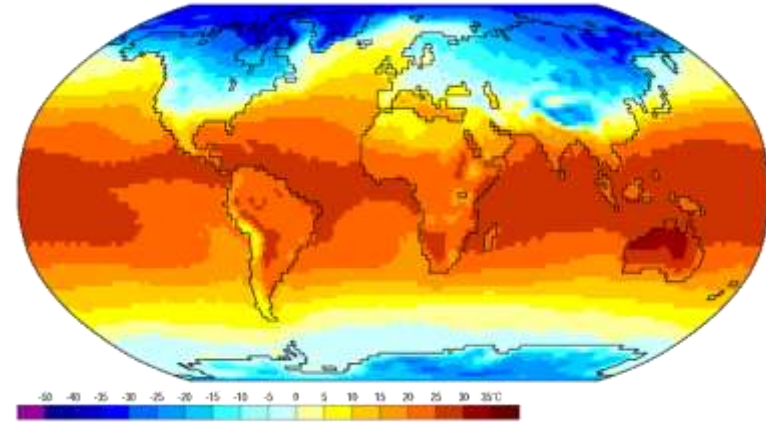


- «Достаточно большое время». Может быть разным в зависимости от поставленной задачи.

Основные задачи теории климата

- Воспроизведение современного климата (понимание физических механизмов его формирования).
- Оценка возможных изменений климата под влиянием малых внешних воздействий (проблема чувствительности климатической системы).
- Прогноз изменений климата.

Изменение поверхностной температуры



Возраст морского льда в Арктике

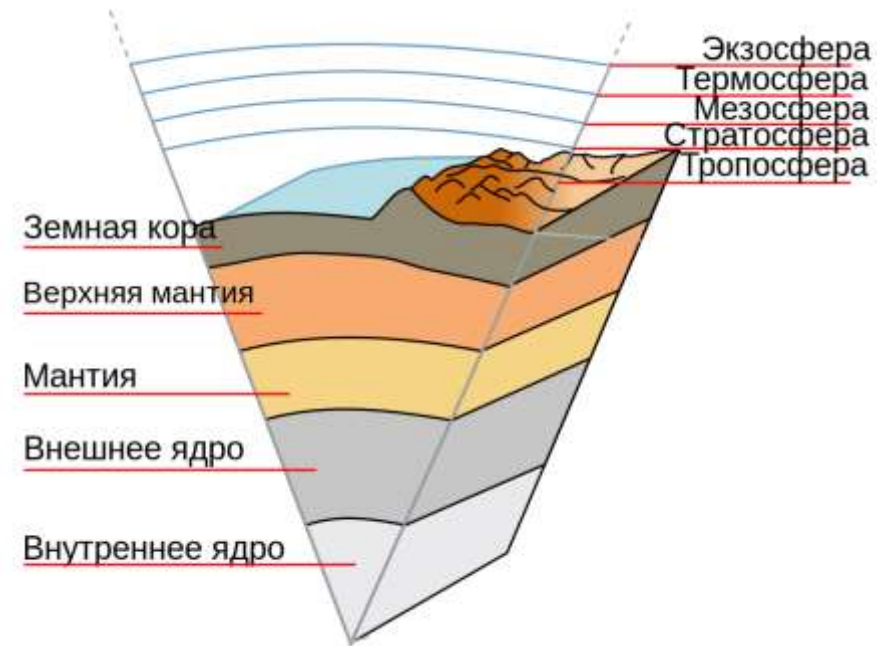


Физические особенности климатической системы

- Океан и атмосфера – тонкие пленки.

$\frac{H}{L} \approx 0.1 - 0.001$, H, L – вертикальный и горизонтальный масштабы
 $T \approx 1 \text{ час} - \text{сотни лет}$

- Невозможность проведения натурального эксперимента с климатической системой.
- Недостаток данных измерений и т. д.

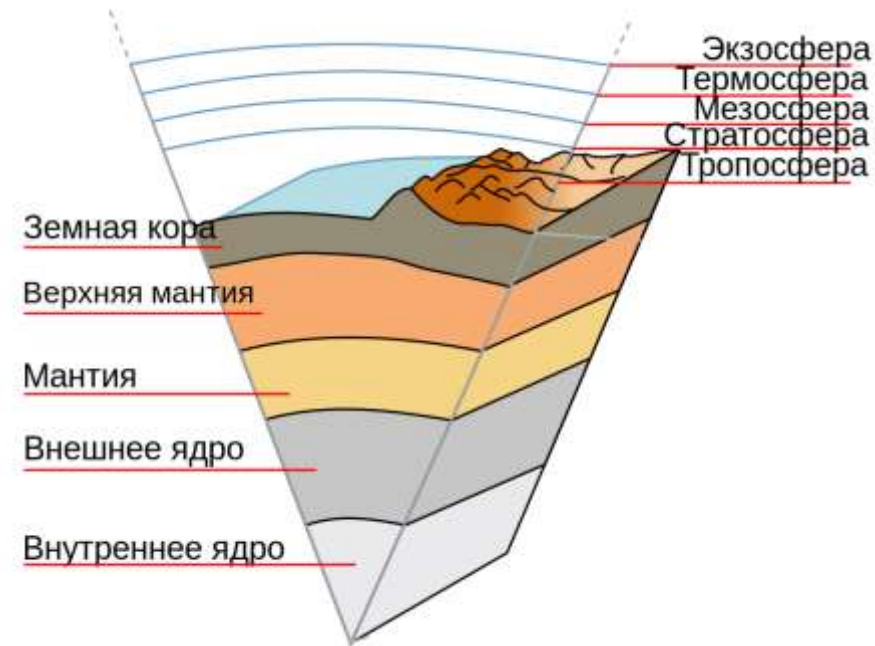


Физические особенности климатической системы

- Океан и атмосфера – тонкие пленки.

$$\frac{H}{L} \approx 0.1 - 0.001, \quad H, L - \text{вертикальный и горизонтальный масштабы}$$
$$T \approx 1 \text{ час} - \text{сотни лет}$$

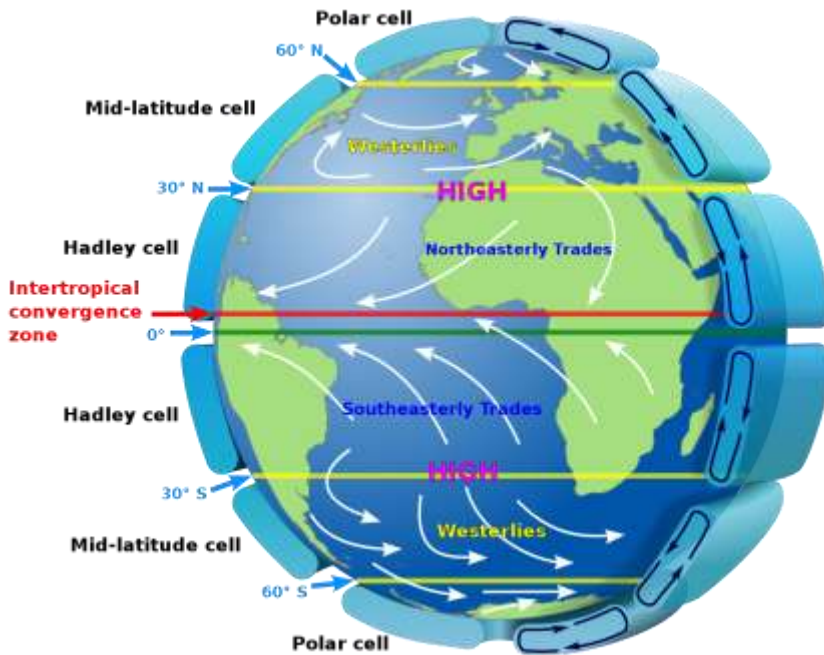
- Невозможность проведения натурального эксперимента с климатической системой.
- Недостаток данных измерений и т. д.



Основное инструмент исследования климатической системы – математическое моделирование.

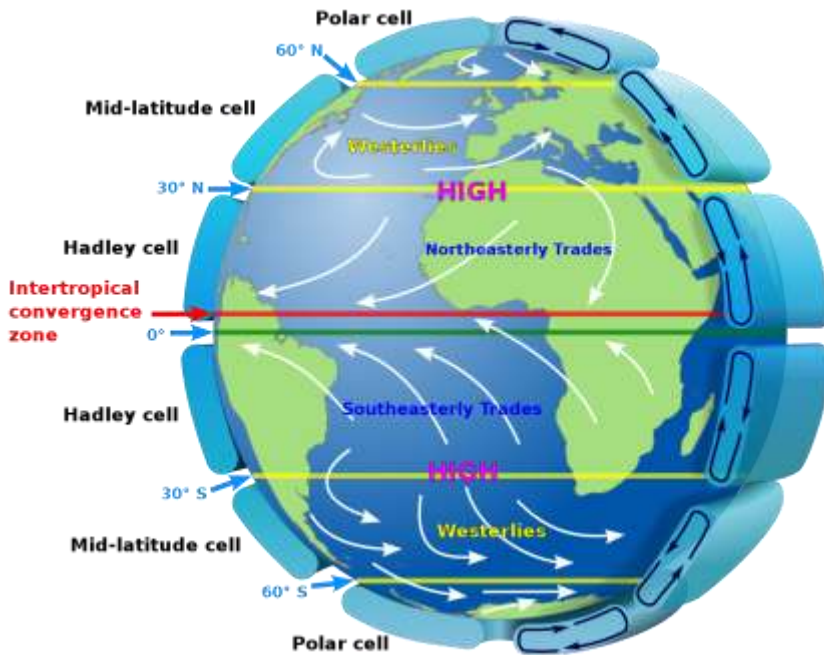
Построение математических моделей климатической системы

Модель общей циркуляции атмосферы



Построение математических моделей климатической системы

Модель общей циркуляции атмосферы



Модель общей циркуляции океана



Построение математических моделей климатической системы

Уравнения Навье-Стокса

$$\nabla \cdot \bar{u} = 0$$

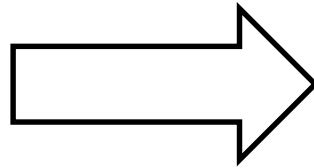
$$\rho \frac{D\bar{u}}{Dt} = -\nabla p + \mu \nabla^2 \bar{u} + \rho \bar{F}$$

Построение математических моделей климатической системы

Уравнения Навье-Стокса

$$\nabla \cdot \bar{u} = 0$$

$$\rho \frac{D\bar{u}}{Dt} = -\nabla p + \mu \nabla^2 \bar{u} + \rho \bar{F}$$



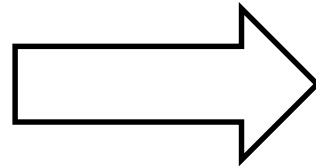
Упрощенная система уравнений,
например, уравнения Рейнольдса

Построение математических моделей климатической системы

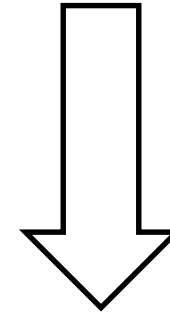
Уравнения Навье-Стокса

$$\nabla \cdot \bar{u} = 0$$

$$\rho \frac{D\bar{u}}{Dt} = -\nabla p + \mu \nabla^2 \bar{u} + \rho \bar{F}$$



Упрощенная система уравнений,
например, уравнения Рейнольдса



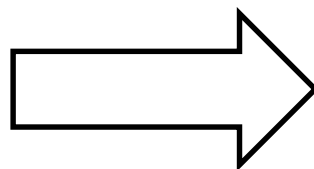
Замыкание полученной системы,
с помощью введения
параметризаций процессов
подсеточных масштабов.

Построение математических моделей климатической системы

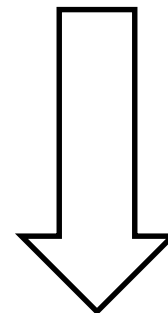
Уравнения Навье-Стокса

$$\nabla \cdot \bar{u} = 0$$

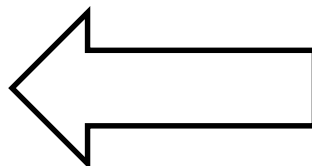
$$\rho \frac{D\bar{u}}{Dt} = -\nabla p + \mu \nabla^2 \bar{u} + \rho \bar{F}$$



Упрощенная система уравнений, например, уравнения Рейнольдса



Дискретизация полученной системы и программирование для вычисления на ЭВМ.



Замыкание полученной системы, с помощью введения параметризаций процессов подсеточных масштабов.

Модель SibCIOM. Siberian Coupled Ice-Ocean Model)

Совместная модель океана и морского льда, разработанная в ИВМиМГ СО РАН.

- **ОКЕАН (ИВМиМГ СО РАН)**

Разрешение: $1^\circ \times 1^\circ$ ниже $55^\circ N$,
 $\sim 0.3^\circ - 0.85^\circ$ выше $55^\circ N$;
38 вертикальных уровней.

E.N.Golubeva, G.A.Platov, 2007, E.N.Golubeva, G.A.Platov, 2009

- **ЛЁД**

Ледовая модель CICE 3

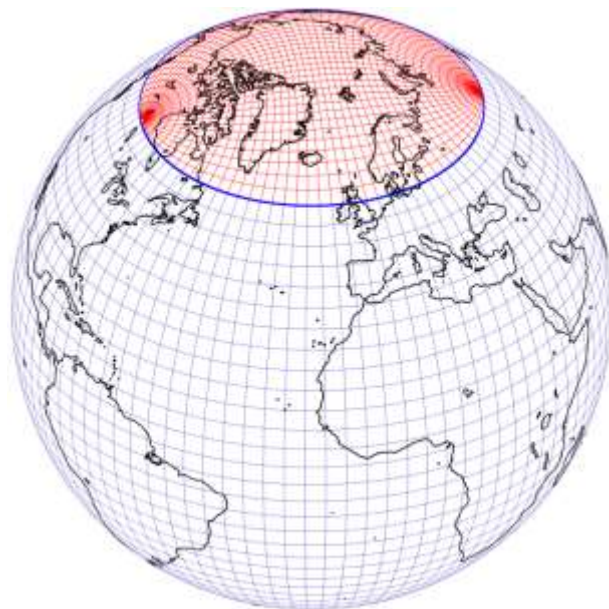
G.A.Maykut, 1971, W.D.Hibler, 1979, E.C.Hunke, J.K.Dukowicz, 1997, C.M.Bitz, W.H.Lipscomb, 1999, J.K.Dukowicz, J.R.Baumgardner, 2000, W.H.Lipscomb, E.C.Hunke, 2004

<https://cice-consortium-icepack.readthedocs.io/en/master/index.html>

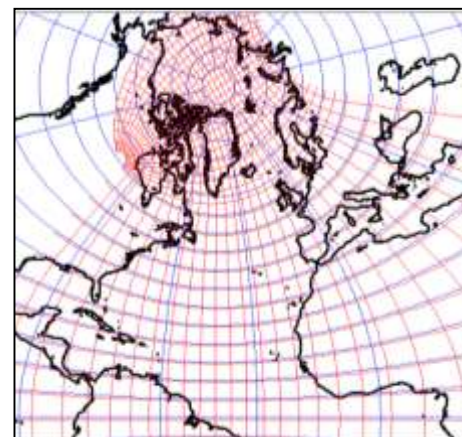
- **АТМОСФЕРА И СУША**

Данные реанализа: **NCER/NCAR**

<https://psl.noaa.gov/data/gridded/data.ncep.reanalysis.html>



Композитная сетка модели SibCIOM



Модель SibCIOM. Siberian Coupled Ice-Ocean Model). Океаническая модель.

Основные уравнения

$$\frac{\partial u}{\partial t} + L(u) - kv - lv = -\frac{1}{\rho_0 h_1} \frac{\partial p}{\partial x_1} + \frac{\partial}{\partial z} v_v \frac{\partial u}{\partial z} + F(u, \mu_v),$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + L(v) + ku + lu = -\frac{1}{\rho_0 h_2} \frac{\partial p}{\partial x_2} + \frac{\partial}{\partial z} v_v \frac{\partial v}{\partial z} + F(v, \mu_v),$$

$$\frac{\partial p}{\partial z} = -\rho g,$$

$$\frac{1}{h_1 h_2} \left[\frac{\partial(h_2 u)}{\partial x_1} + \frac{\partial(h_1 v)}{\partial x_2} \right] + \frac{\partial w}{\partial z} = 0,$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} + L(T) = \frac{\partial}{\partial z} v_T \frac{\partial T}{\partial z} + F(T, \mu_T),$$

$$\frac{\partial S}{\partial t} + L(S) = \frac{\partial}{\partial z} v_S \frac{\partial S}{\partial z} + F(S, \mu_S),$$

$$\rho = \rho(T, S, p).$$

$$L(\varphi) = \frac{1}{h_1 h_2} \left(\frac{\partial}{\partial x_1} (h_2 u \varphi) + \frac{\partial}{\partial x_2} (h_1 v \varphi) \right) + \frac{\partial}{\partial z} (w \varphi),$$

$$F(\varphi, \mu) = \frac{1}{h_1 h_2} \left(\frac{\partial}{\partial x_1} \left(\mu \frac{h_2}{h_1} \frac{\partial \varphi}{\partial x_1} \right) + \frac{\partial}{\partial x_2} \left(\mu \frac{h_1}{h_2} \frac{\partial \varphi}{\partial x_2} \right) \right).$$

Начальные и граничные условия

- в начальный момент времени:

$$(u, v, w) \Big|_{t=0} = (u^0, v^0, w^0),$$

$$T \Big|_{t=0} = T^0, \quad S \Big|_{t=0} = S^0.$$

- на поверхности океана:

$$-v_u \left(\frac{\partial u}{\partial z}, \frac{\partial v}{\partial z} \right) = \left(\frac{\tau_{x_1}}{\rho_0}, \frac{\tau_{x_2}}{\rho_0} \right),$$

$$v_T \frac{\partial T}{\partial z} = F_T, \quad v_S \frac{\partial S}{\partial z} = F_S,$$

$P - E$ – массовый поток пресной воды,

(τ_{x_1}, τ_{x_2}) – напряжения трения ветра, F_T – поток

тепла, F_S – поток соли,

и один из двух вариантов задания условия на

вертикальную скорость:

$$1) \quad z = -\eta(x_1, x_2, t) : \quad 2) \quad z = 0:$$

$$w = -\left(\frac{\partial \eta}{\partial t} + \frac{u}{h_1} \frac{\partial \eta}{\partial x_1} + \frac{v}{h_2} \frac{\partial \eta}{\partial x_2} \right) + P - E \quad w = 0$$

- на дне водоема $z = H(x_1, x_2)$:

$$w = \frac{1}{h_1 h_2} \left(u \frac{\partial h_2 H}{\partial x_1} + v \frac{\partial h_1 H}{\partial x_2} \right),$$

$$v \left(\frac{\partial u}{\partial z}, \frac{\partial v}{\partial z} \right) = -C_D \sqrt{u^2 + v^2},$$

$$\vec{N}_H \cdot \text{grad } T = 0, \quad \vec{N}_H \cdot \text{grad } S = 0,$$

C_D – метрический коэффициент, \vec{N}_H – нормаль к

поверхности дна.

- на «твердых» боковых границах:

$$u = 0, \quad v = 0,$$

$$\vec{n} \cdot \text{grad } T = 0, \quad \vec{n} \cdot \text{grad } S = 0,$$

\vec{n} – нормаль к боковой поверхности.

- на «жидких» боковых границах:

$$\bar{U}_n = \frac{Q_r}{S_{sec}}, \quad \bar{U}_\tau = 0, \quad \bar{U} = (u, v),$$

$$T = T_r, \quad S = 0,$$

Q_r – расход реки, S_{sec} – площадь сечения

входного потока, T_r – температура речной воды.

(u, v, w) – компоненты скорости течения, T – температура воды, S – соленость воды,

p – давление, ρ – плотность воды, ρ_0 – средняя плотность, g – ускорение силы тяжести,

$l = 2\omega \sin \varphi$ – параметр Кориолиса, ω – угловая скорость вращения Земли, φ – географическая широта,

v_v, μ_v и v_T, μ_T – коэффициенты горизонтальной и вертикальной вязкости и диффузии, соответственно,

h_1, h_2 – метрические коэффициенты, $k = \left(-u \frac{\partial h_1}{\partial x_1} + v \frac{\partial h_2}{\partial x_2} \right) / (h_1 h_2)$.

Модель SibCIOM. Siberian Coupled Ice-Ocean Model). Структура модели.

Модель состоит из пяти независимых модулей или блоков:

- Блоки компонент климатической системы: атмосферный, океанический, ледовый и блок суши.
- Блок взаимодействия каплер (от англ. coupler)

<https://github.com/vsgradov/SibCIOM-coupler.git>

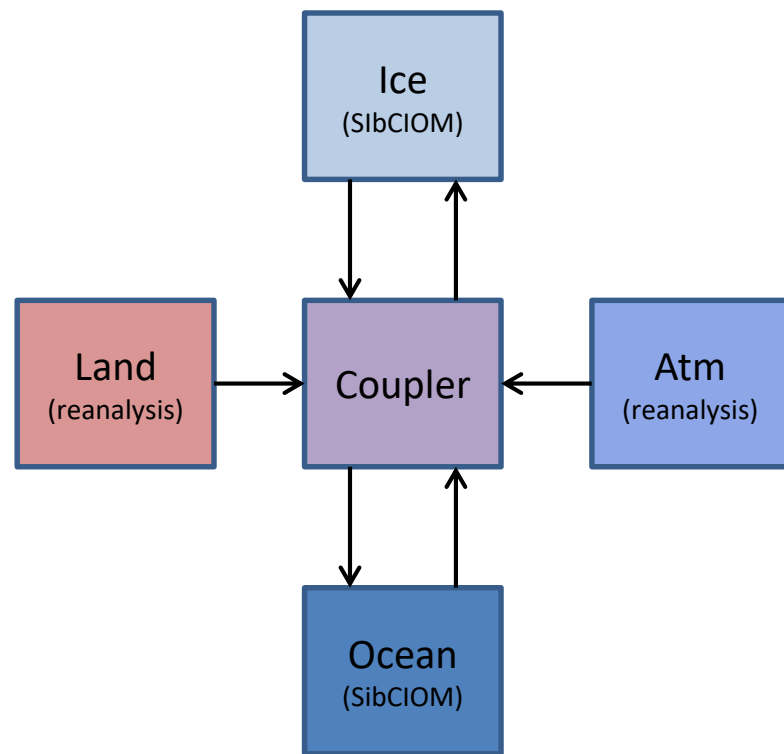


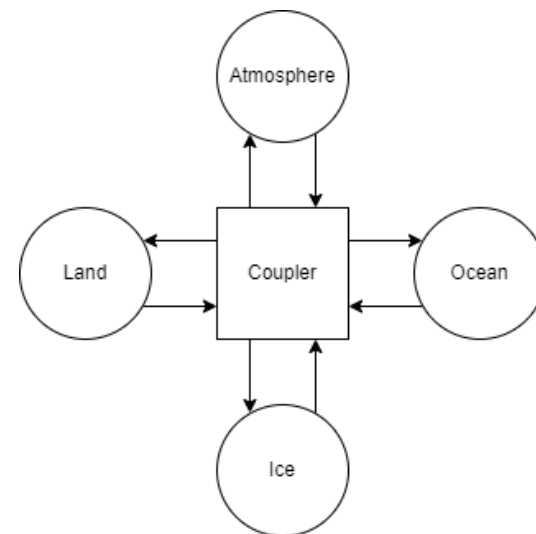
Схема взаимодействия блоков модели SibCIOM.

Модель SibCIOM. Siberian Coupled Ice-Ocean Model). Каплер.

Каплер – специальный модуль взаимодействия, который выполняет следующие функции:

Модель SibCIOM. Siberian Coupled Ice-Ocean Model). Каплер.

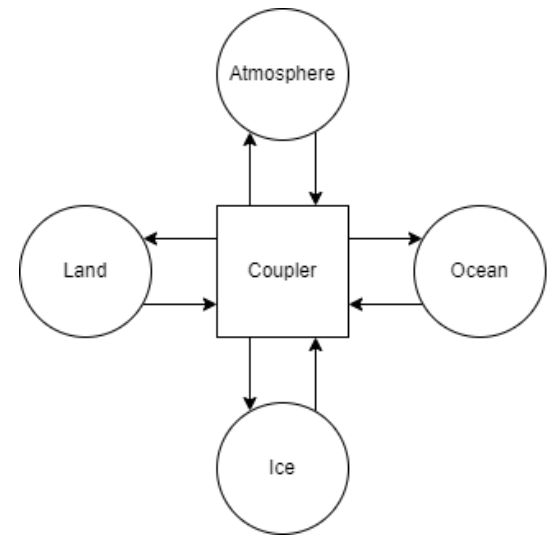
Каплер – специальный модуль взаимодействия, который выполняет следующие функции:



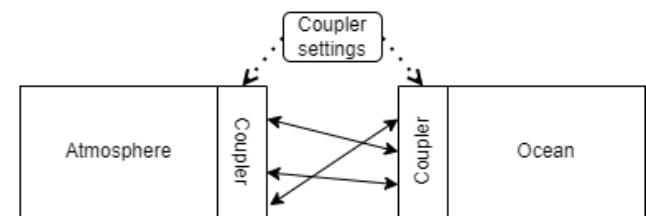
Модульный каплер

Модель SibCIOM. Siberian Coupled Ice-Ocean Model). Каплер.

Каплер – специальный модуль взаимодействия, который выполняет следующие функции:



Модульный каплер

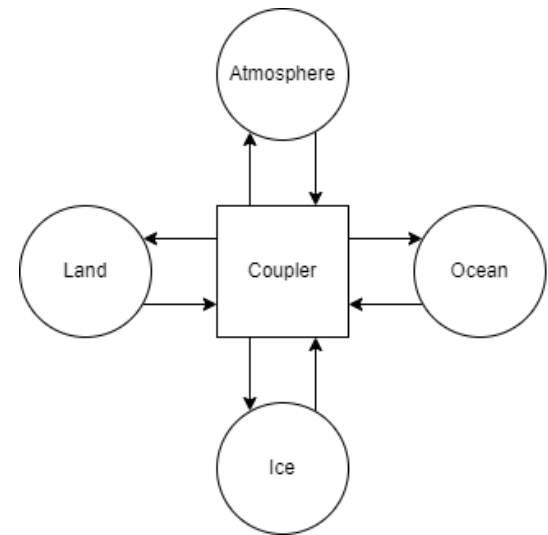


Каплер библиотека

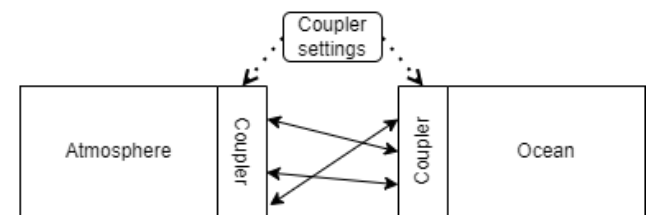
Модель SibCIOM. Siberian Coupled Ice-Ocean Model). Каплер.

Каплер – специальный модуль взаимодействия, который выполняет следующие функции:

- Синхронизированный обмен данными с блоками климатических компонент(получение и отправка).



Модульный каплер

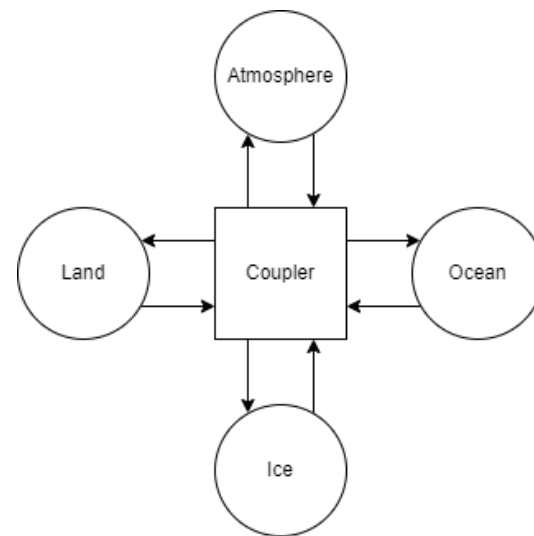


Каплер библиотека

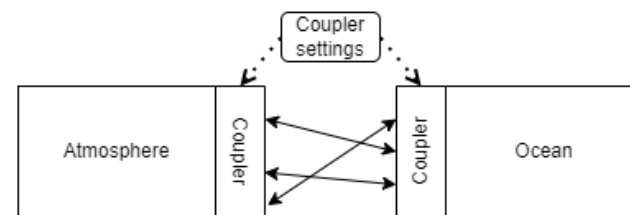
Модель SibCIOM. Siberian Coupled Ice-Ocean Model). Каплер.

Каплер – специальный модуль взаимодействия, который выполняет следующие функции:

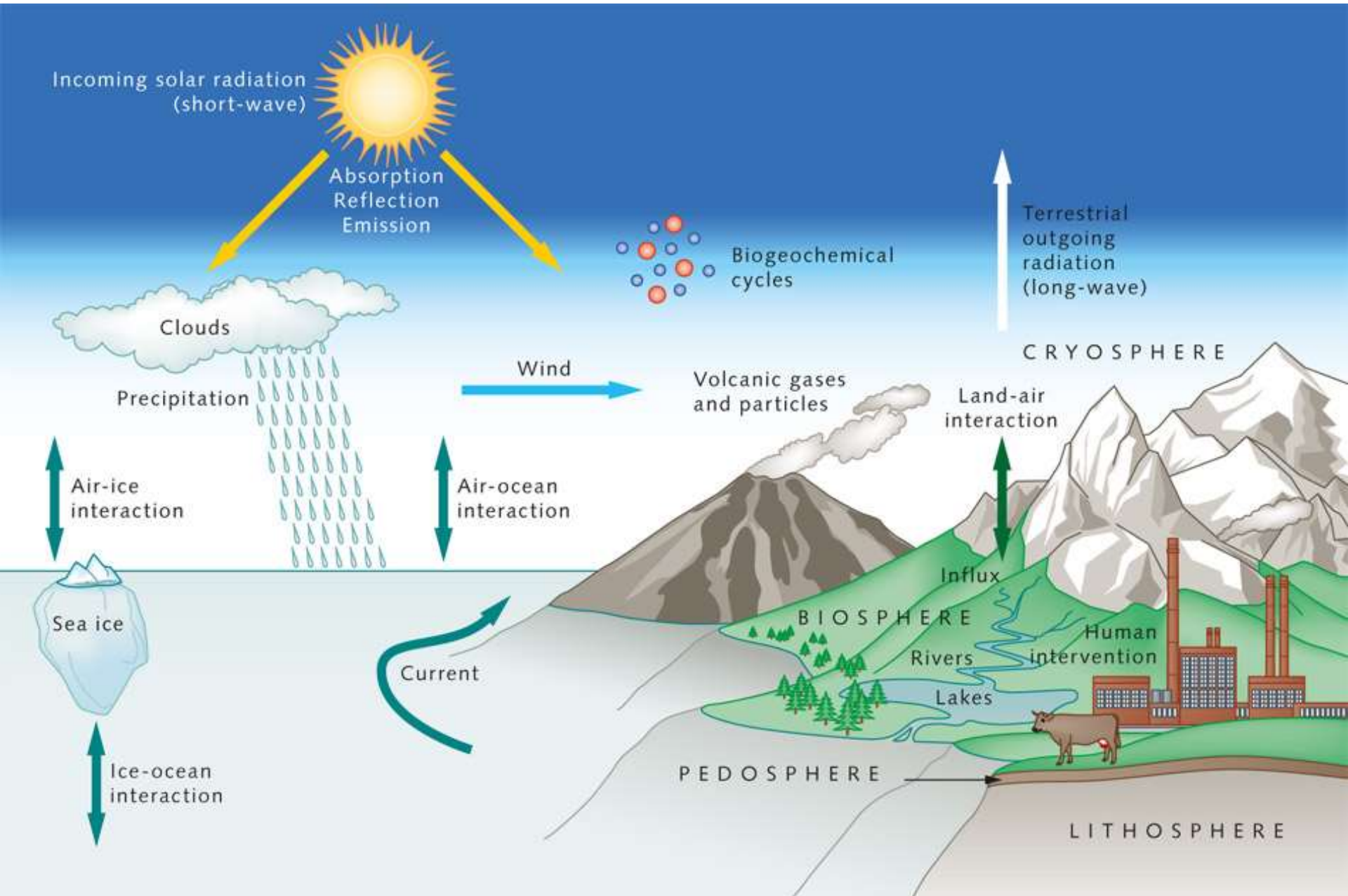
- Синхронизированный обмен данными с блоками климатических компонент(получение и отправка).
- Расчет потоков между компонентами.



Модульный каплер



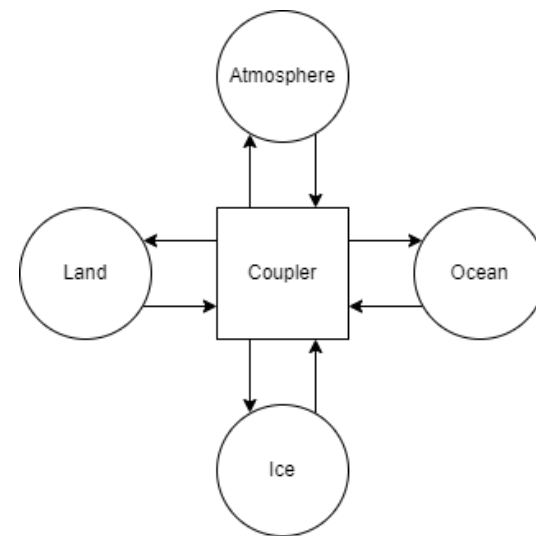
Каплер библиотека



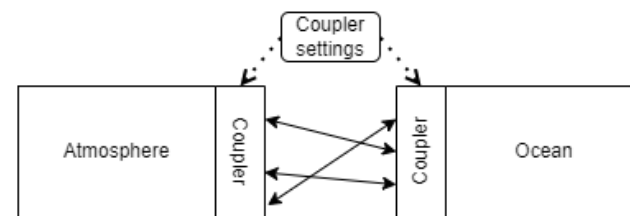
Модель SibCIOM. Siberian Coupled Ice-Ocean Model). Каплер.

Каплер – специальный модуль взаимодействия, который выполняет следующие функции:

- Синхронизированный обмен данными с блоками климатических компонент(получение и отправка).
- Расчет потоков между компонентами.
- Интерполяция данных с одной сетки на другую.



Модульный каплер



Каплер библиотека

Модель INMCM48 (Institute of Numerical Mathematics Climate Model)

Глобальная климатическая модель,
созданная в ИВМ РАН им. Марчука.

- **АТМОСФЕРА (атм. + аэрозольный блок + суша + раст.)**

Разрешение: $2^\circ \times 1.5^\circ$,
21 вертикальных σ — уровней
до $\sigma = 0.01$

- **ОКЕАН (океан + лед)**

Разрешение: $1^\circ \times 0.5^\circ$,
40 вертикальных уровней

1) Volodin, Evgeny M., Mortikov, Evgeny V., Kostykin, Sergey V et al., "Simulation of the modern climate using the INM-CM48 climate model" *Russian Journal of Numerical Analysis and Mathematical Modelling*, vol. 33, no. 6, 2018, pp. 367-374. <https://doi.org/10.1515/rnam-2018-0032>

2) Математическое моделирование Земной системы / Володин Е.М., Галин В.Я., Грицун А.С. и др. Под ред. Яковлева Н.Г. — М.: МАКС Пресс, 2016. — 328 с. https://istina.msu.ru/media/publications/book/e9f/c88/38758225/Volodin_i_dr._Matematicheskoe_modelirovanie_Zemnoj_sistemyi.pdf

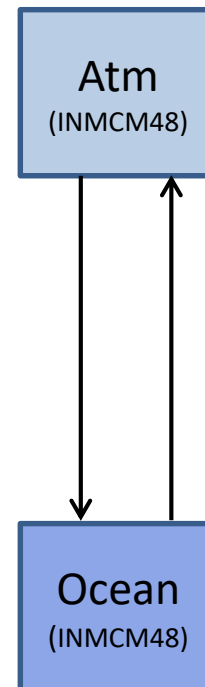


Схема взаимодействия блоков модели INMCM48.

Модель INMCM48 (Institute of Numerical Mathematics Climate Model). Атмосферная модель.

Основные уравнения

$$\frac{\partial u}{\partial t} + \left(f + \frac{u}{a} tg\phi\right)v + \frac{1}{a \cos\phi} \left(\frac{\partial \Phi}{\partial \lambda} + \frac{RT}{\pi} \frac{\partial \pi}{\partial \lambda}\right) = F_u,$$

$$\frac{\partial v}{\partial t} + \left(f + \frac{u}{a} tg\phi\right)u + \frac{1}{a} \left(\frac{\partial \Phi}{\partial \phi} + \frac{RT}{\pi} \frac{\partial \pi}{\partial \phi}\right) \frac{\partial \Phi}{\partial \phi} = F_v,$$

$$\frac{\partial \Phi}{\partial \sigma} = -\frac{RT}{\sigma},$$

$$\frac{\partial T}{\partial t} - \frac{RT}{\pi c_p} \left(\frac{\partial \pi}{\partial t} + \frac{u}{a \cos\phi} \frac{\partial \pi}{\partial \lambda} + \frac{v}{a} \frac{\partial \pi}{\partial \phi} + \frac{\pi \dot{\sigma}}{\sigma}\right) = F_T + \varepsilon,$$

$$\frac{\partial q}{\partial t} = F_q - (C - E),$$

$$\frac{\partial \pi}{\partial t} + \frac{1}{a \cos\phi} \left(\frac{\partial \pi u}{\partial \lambda} + \frac{\partial \pi v \cos\phi}{\partial \phi}\right) + \frac{\partial \pi \dot{\sigma}}{\partial \sigma} = 0,$$

$$\frac{d}{dt} = \frac{\partial}{\partial t} + \frac{u}{a \cos\phi} \frac{\partial}{\partial \lambda} + \frac{v}{a} \frac{\partial}{\partial \phi} + \dot{\sigma} \frac{\partial}{\partial \sigma} = 0.$$

Начальные и граничные условия

Краевые условия:

- условия периодичности по долготе:

$$u(\lambda, \phi, \sigma, t) = u(\lambda + 2\pi, \phi, \sigma, t)$$

$$v(\lambda, \phi, \sigma, t) = v(\lambda + 2\pi, \phi, \sigma, t)$$

$$\pi(\lambda, \phi, \sigma, t) = \pi(\lambda + 2\pi, \phi, \sigma, t)$$

$$T(\lambda, \phi, \sigma, t) = T(\lambda + 2\pi, \phi, \sigma, t)$$

$$q(\lambda, \phi, \sigma, t) = q(\lambda + 2\pi, \phi, \sigma, t)$$

- ограниченность решения на полюсах

- на поверхности земли:

$$\dot{\sigma} = 0 \text{ при } \sigma = 1$$

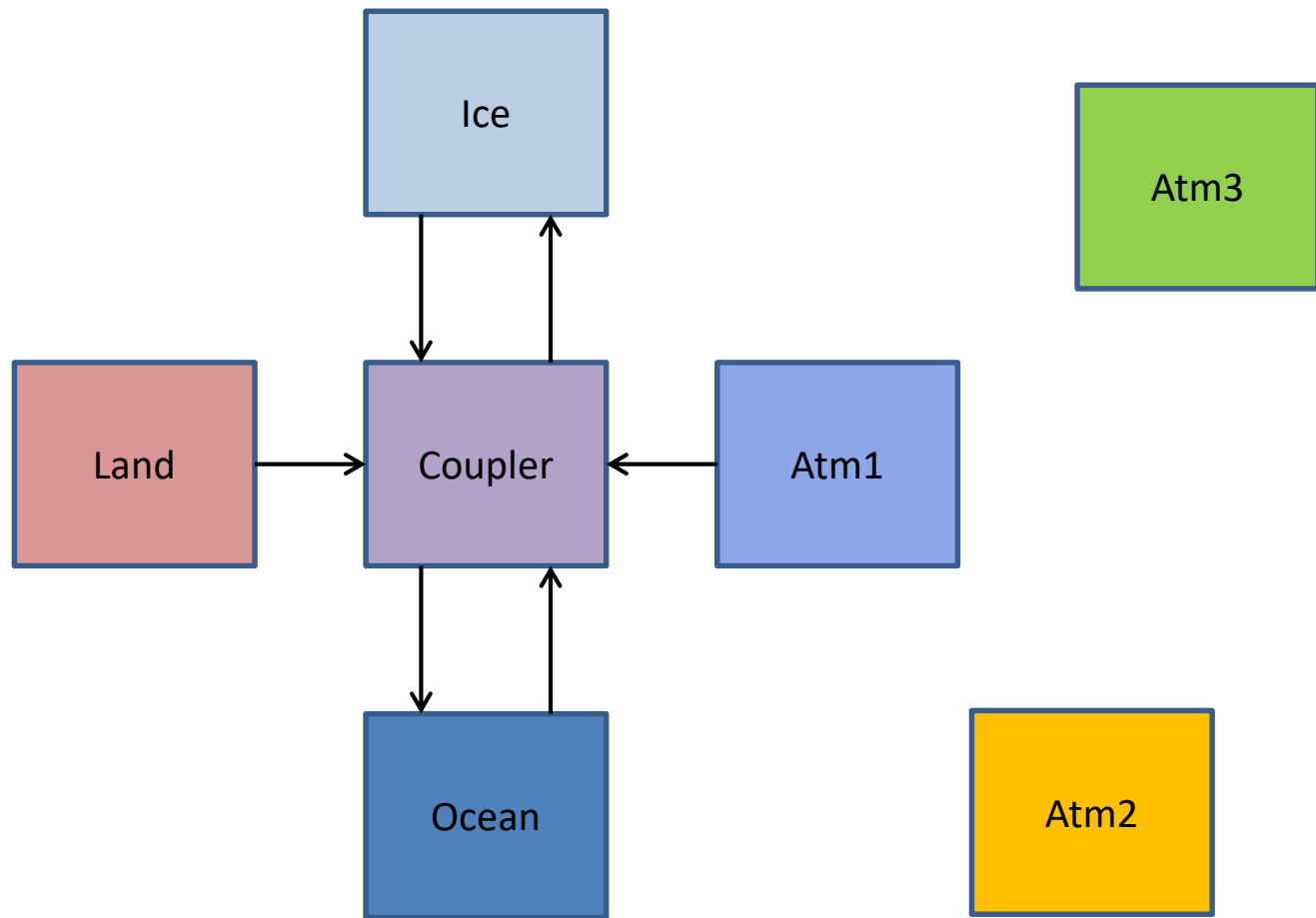
$$\Phi = hZ_s \text{ при } \sigma = 1$$

- на верхней границе атмосферы:

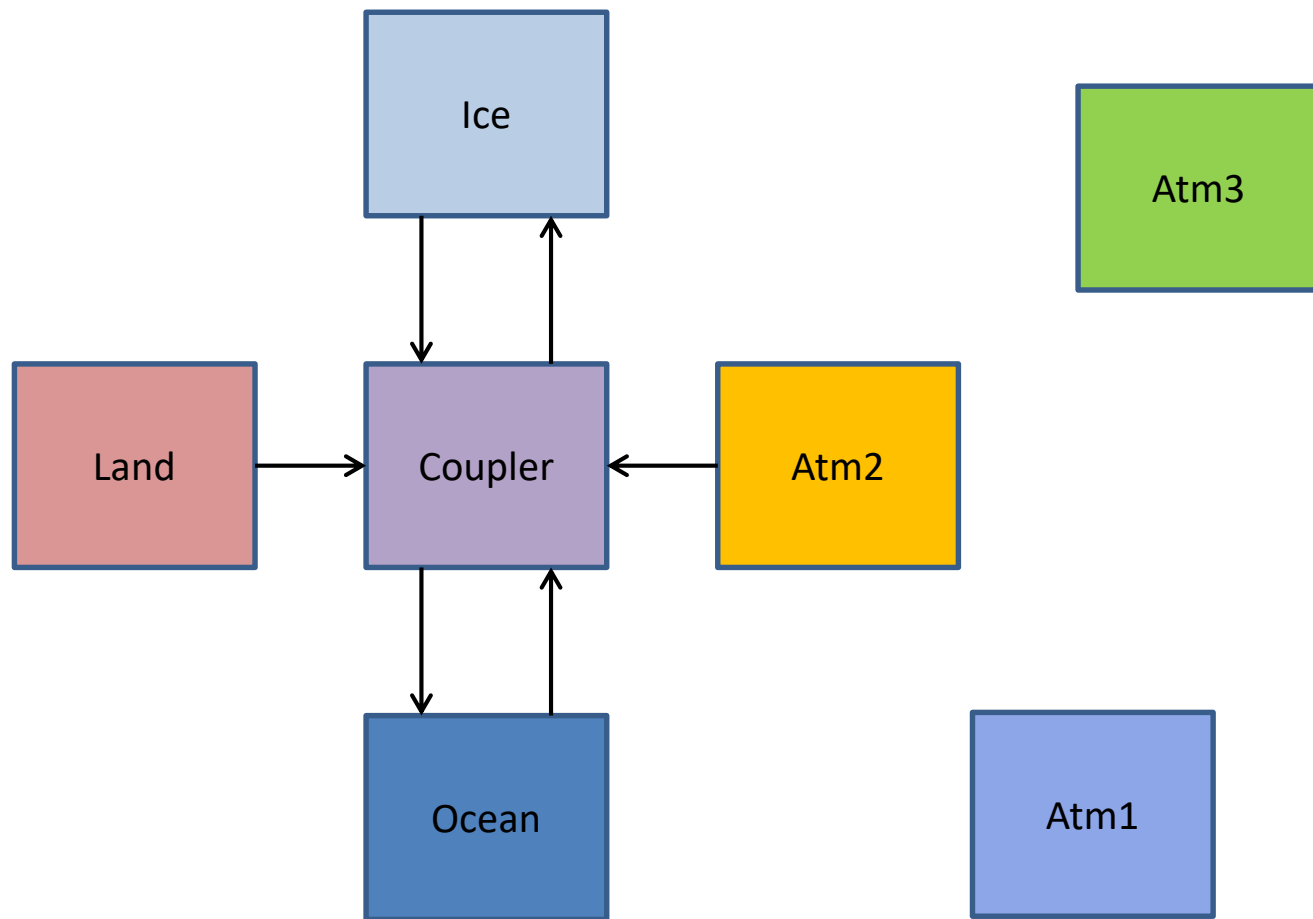
$$\dot{\sigma} = 0 \text{ при } \sigma = 0$$

λ – долгота, ϕ – широта, a – радиус Земли, $\sigma = \frac{p}{\pi}$ – вертикальная координата, p – давление, π – его значение на поверхности Земли, t – время, T – абсолютная температура, u, v – зональная и меридиональная составляющие скорости ветра, q – удельная влажность, f – параметр Кориолиса, Φ – геопотенциал, R – газовая постоянная воздуха, C_p – его теплоемкость при постоянном давлении, F_u, F_v, F_T, F_q – физические тенденции изменения импульса, температуры и влаги, C и E – члены, описывающие процессы конденсации и испарения влаги.

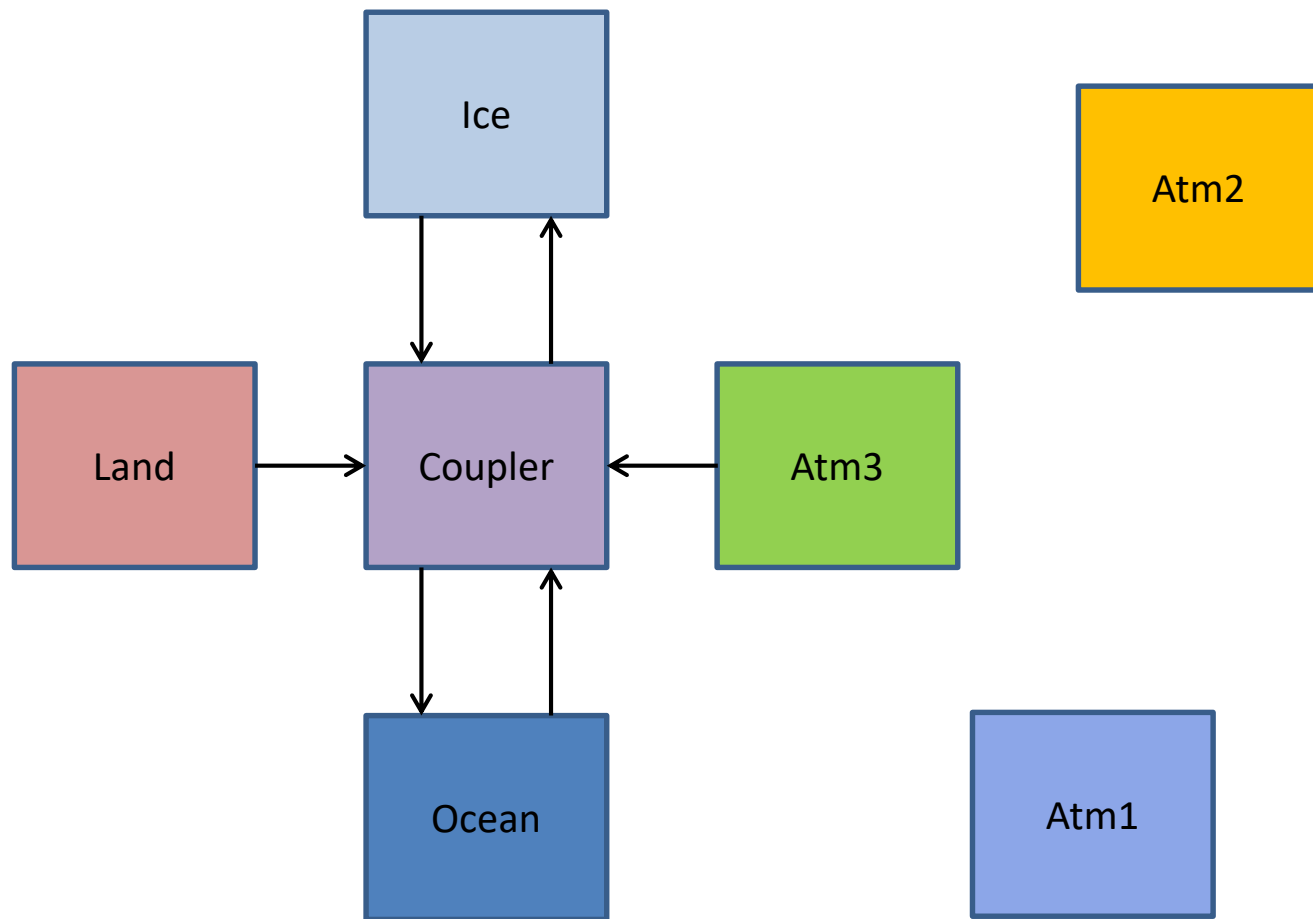
Построение климатических моделей на основе модели SibCIOM.



Построение климатических моделей на основе модели SibCIOM.



Построение климатических моделей на основе модели SibCIOM.



Модель PlaSim-ICMMG-1.0

PlaSim (Planet Simulator) - климатическая модель средней сложности, разработанная в метеорологическом институте университета Гамбурга.

<https://www.mi.uni-hamburg.de/en/arbeitsgruppen/theoretische-meteorologie/modelle/plasim.html>

PlaSim-ICMMG-1.0:

Platov, G., Krupchatnikov, V., Martynova, Y., Borovko, I., & Golubeva, E. (2017). A new earth's climate system model of intermediate complexity, PlaSim-ICMMG-1.0: Description and performance. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 96(1), [012005]. <https://doi.org/10.1088/1755-1315/96/1/012005>

- Менее детальное описание динамики атмосферы
- Скорость вычислений
- Способность обрабатывать медленные изменения климата

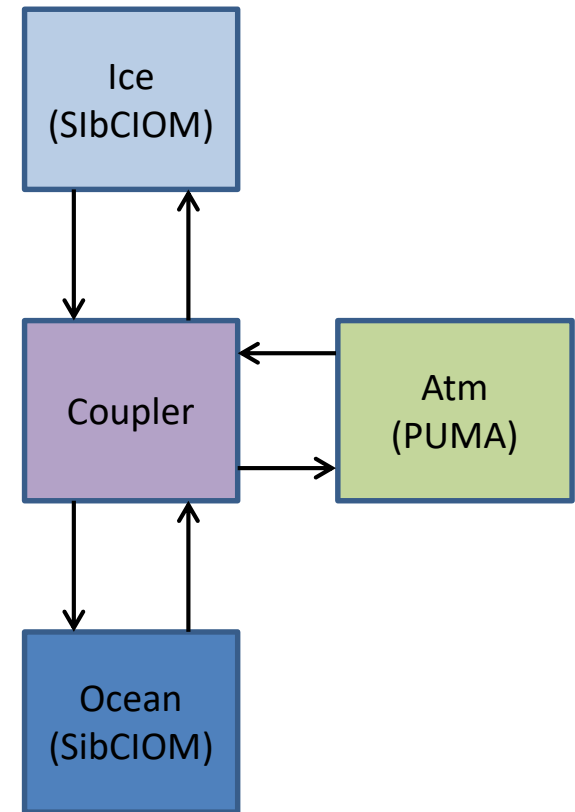


Схема взаимодействия блоков модели PlaSim-ICMMG-1.0

Модель INMCM-SibCIOM

Построена путем присоединения блока общей циркуляции атмосферы модели INMCM48.

- Детальное описание динамики атмосферы. Учет аэрозольного блока, блока суши и растительности.
- Более низкая скорость вычислений по сравнению с PlaSim-ICMMG-1.0.

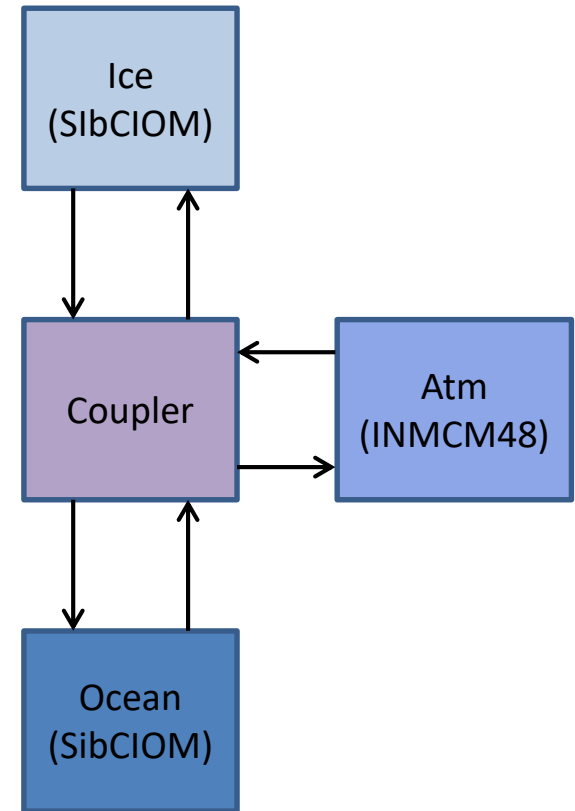


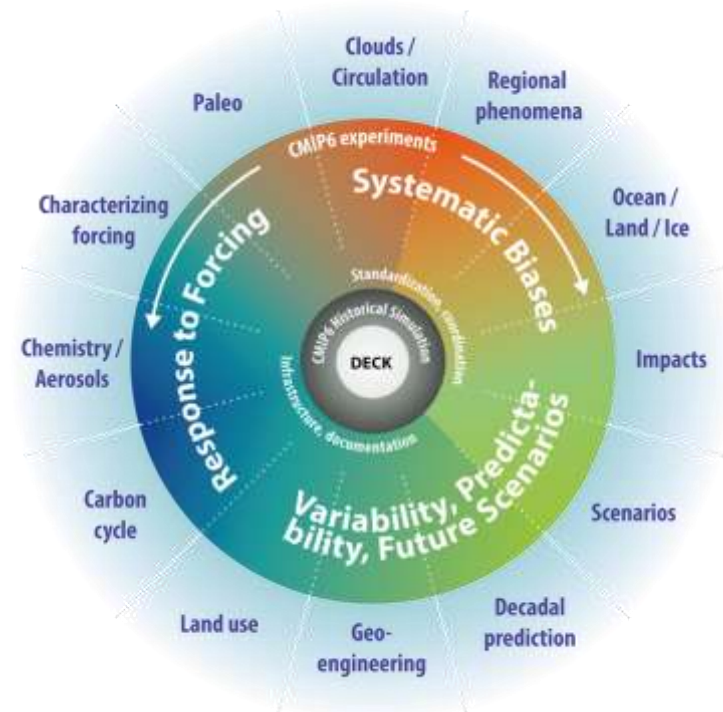
Схема взаимодействия блоков модели INMCM-SibCIOM

Численные эксперименты INMCM48

Серия численных экспериментов с помощью модели INMCM48.

Сценарии базового эксперимента соответствуют сценарию исторического эксперимента CMIP6.

- Период моделирования: 1850-1950гг.
- Начальные данные атмосферы соответствуют распределению, характерному для доиндустриального периода.
- Привязка к временному ходу концентрации малых газовых составляющих и солнечного излучения.

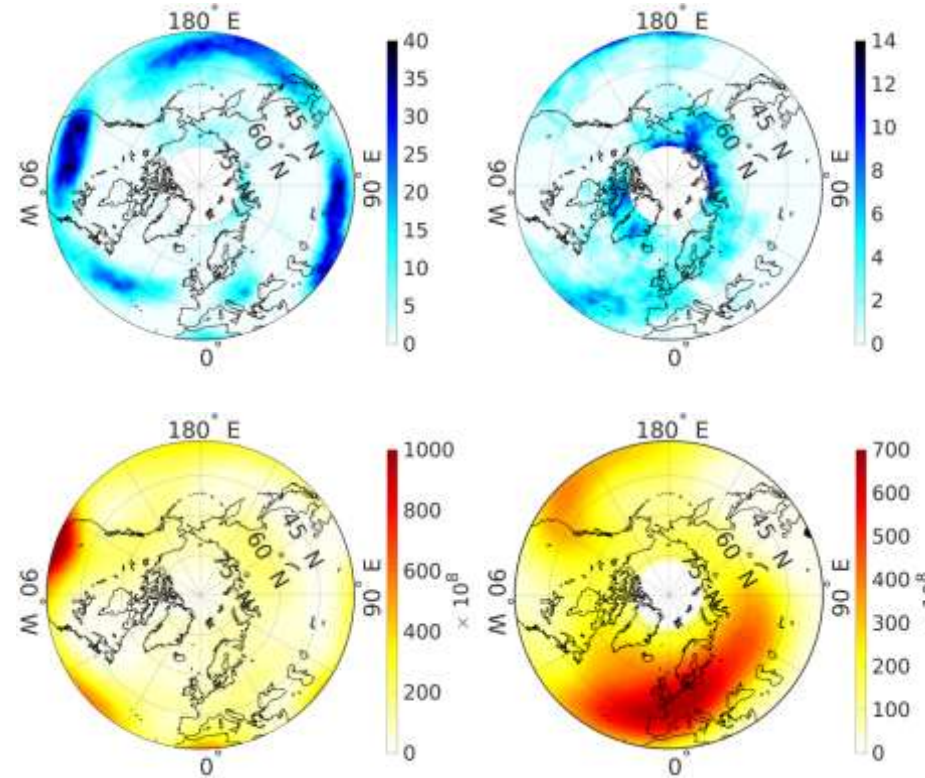


Численные эксперименты INMCM48

Исследование чувствительности циркуляции атмосферы на таяние морского льда в Арктике с помощью модели INMCM48.

Использовались два механизма таяния морского льда:

- уменьшение альбедо морского льда и снега ($B - 0.03$ и $B - 0.1$)
- увеличение общей концентрации CO_2 в атмосфере ($B \times 1.25$ и $B \times 1.66$)



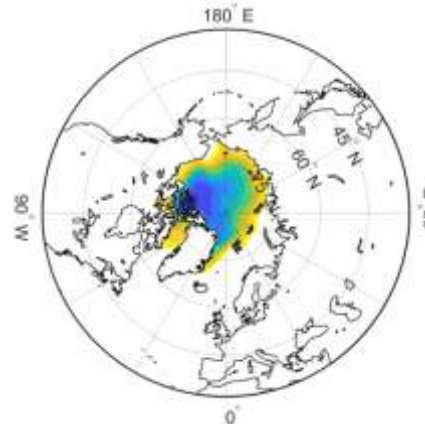
Частота блокирований и величина волновой активности для летнего и зимнего периодов в базовом эксперименте

Численные эксперименты INMCM-SibCIOM

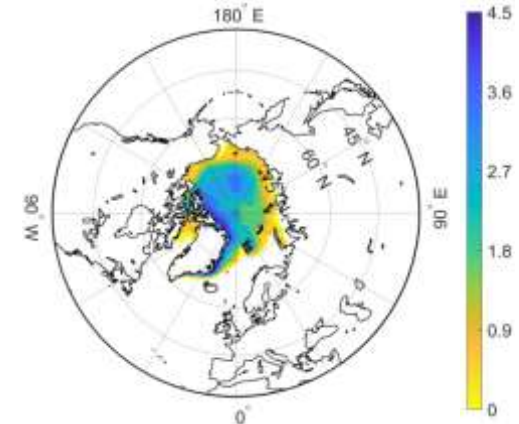
Базовый численный эксперимент, аналогичный базовому историческому эксперименту модели INMCM48, но с другими начальными данными океана.

Цель эксперимента: проверка адекватности воспроизведения моделью климата и сравнение с результатами модели INMCM48.

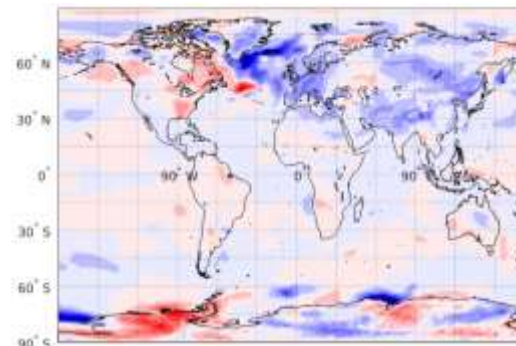
INMCM48



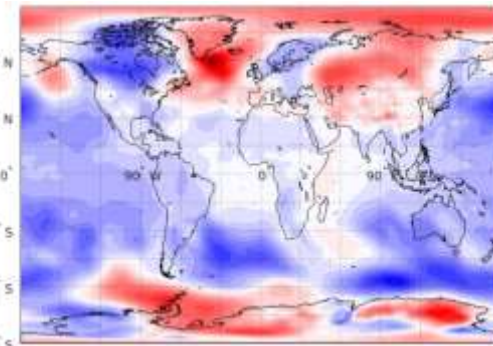
INMCM-SibCIOM



Средняя толщина льда(м) за последние 10 лет в моделях INMCM48 и INMCM-SibCIOM



Аномалия средней температуры(C°) за последние 10 лет



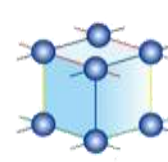
Аномалия среднего давления на уровне моря (мб) за последние 10 лет

Численные эксперименты

Численные эксперименты проводились на одном узле кластера НКС-1П. Для эксперимента использовалось 48 ядер.

Время счета для моделей INMCM48 и INMCM-SibCIOM примерно одинаковое: 10 модельных лет \approx 1 сутки.

Причина: блок общей циркуляции атмосферы модели INMCM48 занимает больше всего расчетного времени.



Сибирский
СуперКомпьютерный
Центр
ИВМиМГ СО РАН



Планы на будущее:

- Дальнейшая настройка модели INMCM-SibCIOM для проведения новых численных экспериментов.
- Построение новых расчетных сеток для модели SibCIOM для улучшения воспроизведения динамики океана и льда в районе Антарктиды.
- Модификация каплера: распараллеливание и оптимизация.
- Внедрение технологий GPU, Coarray Fortran и пр.

Спасибо за внимание!