

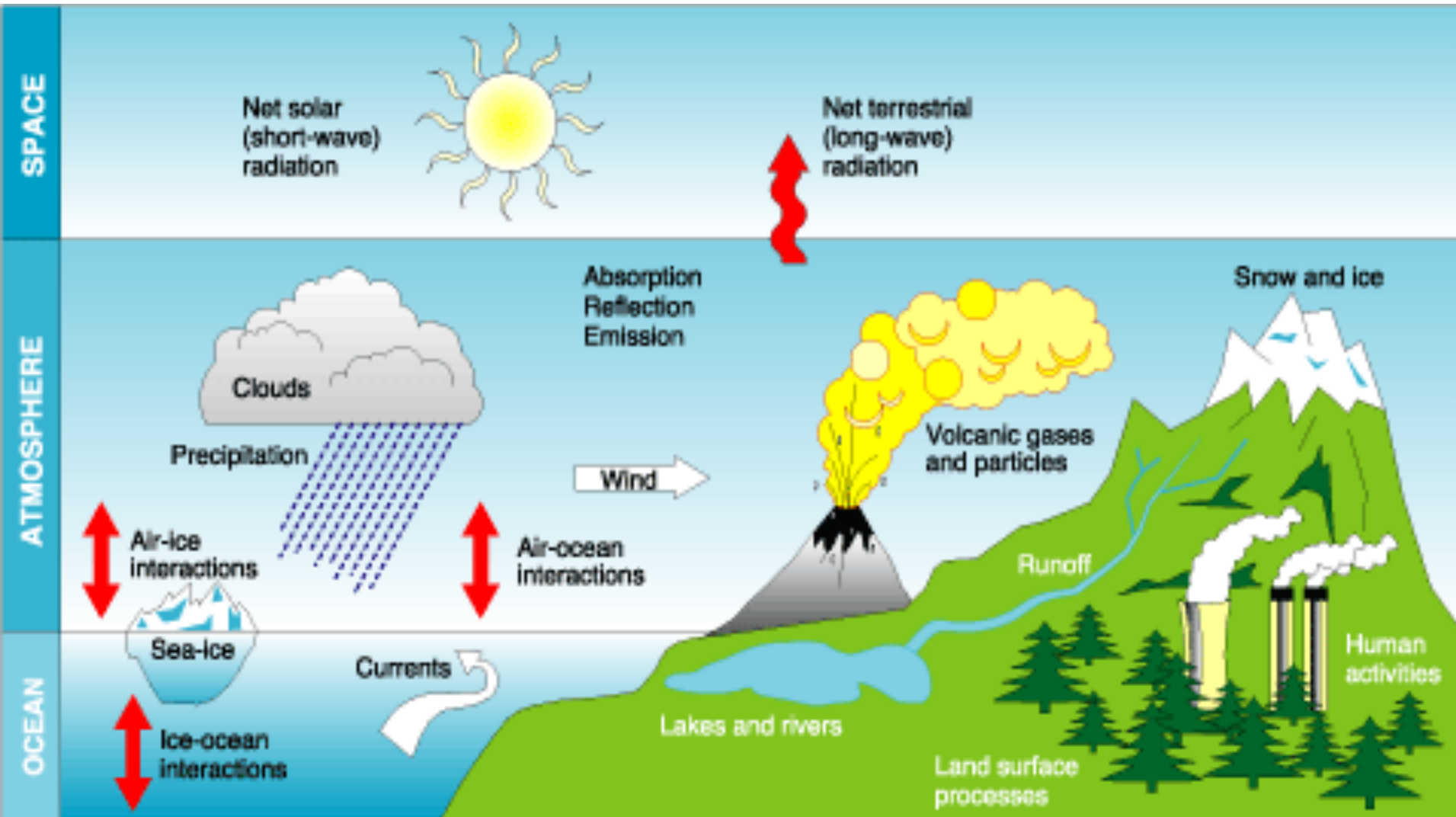
A scenic view of a mountain valley. In the foreground, a calm lake reflects the surrounding landscape. The middle ground shows steep, grassy slopes leading up to a series of jagged, snow-capped mountain peaks in the background. The sky is blue with scattered white clouds. The overall scene is peaceful and majestic.

Моделирование климата и его изменений

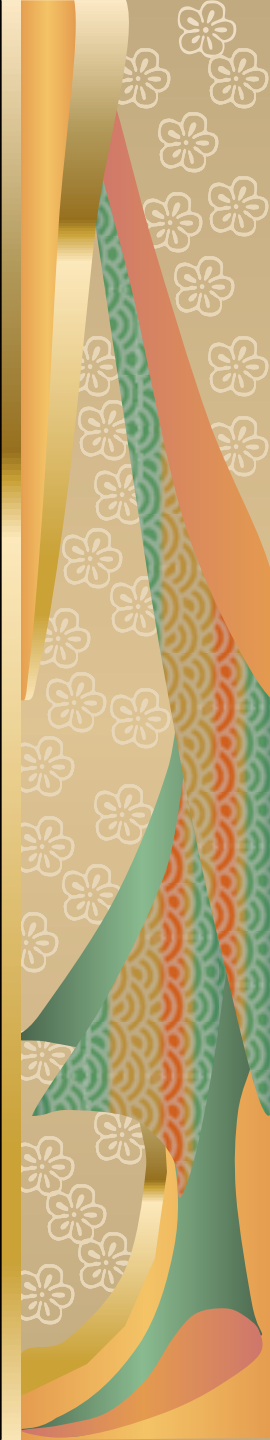
В.П. Дымников

Институт вычислительной математики РАН

Климатическая система (Т. Slingo, 2002)



Физико-математические основы построения моделей климата



Климатическая система Земли включает в себя взаимодействующие между собой атмосферу, океан, сушу, криосферу и биоту.

Климатическая система характеризуется конечным множеством параметров, значения которых в фиксированный момент времени определяют ее **состояние**.

Климат определяется как ансамбль состояний, принимаемый климатической системой за достаточно большой интервал времени, который с математической точки зрения удобно выбрать очень большим (в пределе бесконечным). В практических приложениях часто под климатом понимаются некоторые характеристики части траектории климатической системы, проходимой ею за определенный промежуток времени (~ 30 лет). В общем случае, под ансамблем понимается не только множество состояний, но и некоторая вероятностная мера, заданная на этом множестве и определяющая вероятность того, что система может находиться на некотором подмножестве данного множества.

Центральной проблемой современной теории климата является проблема предсказания его изменений, вызванных антропогенной деятельностью. Эта проблема не может быть решена традиционными методами, многократно опробованными в естественных науках, поскольку климатическая система как физический объект обладает рядом специфических особенностей.

I. Краткий исторический обзор

Vilhelm Bjerknes (1862 – 1951)

“Das Problem von der Wettervorhersage, betrachtet vom Standpunkt der Mechanik und der Physik”, 1904, Meteor. Z., 21, 1-7.



Lewis Fry Richardson (1881 – 1953)

“Weather Prediction by Numerical Process”, 1922, Cambridge University Press, 236 pp.



Carl-Gustaf Rossby (1898 - 1957)

“Relation between variations in the intensity of zonal circulation of the atmosphere and the displacements of the semipermanent centers of actions”,
1939, J. Mar. Res., 2, 38-55.



Илья Афанасьевич Кибель (1904 – 1970)

“Приложение к метеорологии уравнений механики бароклиной жидкости”, 1940, Изв. АН СССР, Серия геогр., 5.



R. Courant, K.O. Friedrichs, H. Lewy. “Über die partiellen Differenzengleichungen der mathematischen Physik”, 1928, Math. Annalen, 100, 32-74.

John von Neumann (1903 – 1957)

J.G. Charney, R. Fjortoft, J. von Neuman. "Numerical integration of the barotropic equation", 1950, *Tellus*, 2, 237-254.



Jule Gregory Charney (1917 – 1981)

"On the scales of atmospheric motions", 1948, Geofysiske Publikasjoner, 17, 17p.; 1949, On a physical basis for numerical prediction of large-scale motions in the atmosphere. J. Meteor., 6, 371-385.



Александр Михайлович Обухов (1918 – 1989)

"О точности предвычисления адвективных изменений полей при численном прогнозе погоды", 1957, Изв. АН СССР, серия Геоф., №9.



Ляпунов Александр Михайлович (1857 – 1918)

"Общая задача об устойчивости движения", 1892, Харьков.



Гурий Иванович Марчук

Н.И. Булеев, Г.И. Марчук. “О динамике крупномасштабных атмосферных процессов”, 1956, Труды ИФА АН СССР, вып. 2, с. 66-104.



P.D. Thompson. “Uncertainty of initial state as a factor in the predictability of large scale atmospheric patterns”, 1957, *Tellus*, 9, 275-295.

N.A. Phillips. “An example of nonlinear computational instability”, 1959, *The atmosphere and sea in motion*, Rossby memorial volume, Roc. Inst. Press, N.-Y., 501-504.

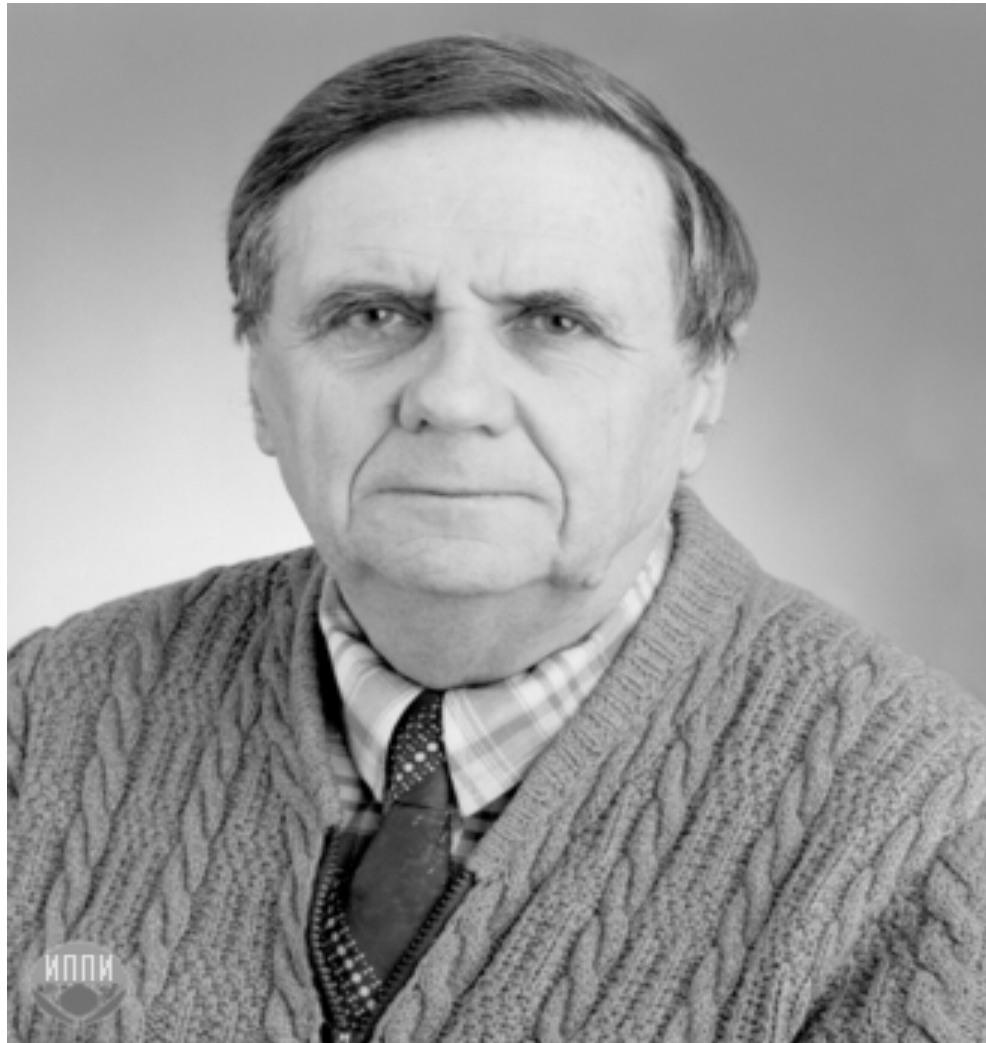
A. Arakawa. Computational design for long-term numerical integrations of the equations of atmospheric motion: Part I.”, 1966, J. Comp., Phys., 1, 119-143.

K.A. Bryan. “A scheme for numerical integration of the equation of motion on an irregular grid free on nonlinear instability”, 1966, Mon. Wea., Rev., 94, 38-40.

Г.И. Марчук. “Численные методы в прогнозе погоды”, 1967, Гидрометеоиздат, 356.

Годунов Сергей Константинович

"Метод численного расчета уравнений гидродинамики", 1959,
Математический сборник, т.47 (т.89, №3, стр.271-306).



Edward Lorenz

"Deterministic nonperiodic flow", 1963, J. Atm. Sci. 20, 2, 130-141.



J. Charney. “The dynamics of long waves in a barocline westerly current”, 1947, J. Meteor., 4, 135-162.

E. Eady. “Long waves and cyclone waves”, 1949, Tellus, 1, 33-52.

А.М. Обухов. “О точности предвычисления адвективных изменений полей при численном прогнозе погоды”, 1957, Изв. АН СССР, серия Геоф., №9.

S.A. Orzag. “Transform method for calculation of vector coupled sums. Application to the spectral form of vorticity equation”, 1970, J. Atm. Sci. 27, 890-895.

N.A. Phillips. “The general circulation of the atmosphere: numerical experiment”, 1956, Quart. J. Rog. Met. Soc., 82, 123-164.

Joseph Smagorinsky (1924 – 2005)

“General circulation experiments with the primitive equations. 1. Basic experiment”, 1963, Mon. Wea. Rev., 91, 98-164.



Г.И. Марчук, В.П. Дымников, В.Б. Залесный, В.Н. Лыкосов, В.Я. Галин. “Математическое моделирование общей циркуляции атмосферы и океана”, 1984, Л.: Гидрометеиздат, 320 стр.

В.П. Дымников, А.Н. Филатов. “Основы математической теории климата”, 1994, Москва, ВИНТИ, 253 стр. (V. Dymnikov. A. Filatov. “Mathematics of climate modeling”, 1997, Birkhäuser, Boston, pp.264.

Дальнейшее развитие моделей циркуляции атмосферы и океана было направлено на создание на их основе глобальной **климатической** модели. Были разработаны новые версии этих моделей, обладающие высоким пространственным разрешением и адаптированных к новым параллельным вычислительным системам.

2002 г.: модель климатической системы, построенная на основе объединения моделей общей циркуляции атмосферы и океана **без** использования процедуры **коррекции потоков** на поверхности океана, использована в исследованиях по чувствительности климата к изменениям в содержании парниковых газов.

2005 г.: В.П. Дымников, В.Н. Лыкосов, Е.М. Володин, В.Я. Галин, А.В. Глазунов, А.С. Грицун, Н.А. Дианский, М.А. Толстых, А.И. Чавро. Моделирование климата и его изменений. – Сб. «Современные проблемы вычислительной математики и математического моделирования», т. 2, М.: Наука.

Крупномасштабная гидротермодинамика атмосферы

$$\frac{du}{dt} - \left(f + \frac{u}{a} \operatorname{tg} \varphi \right) v + \frac{1}{a \cos \varphi} \left(\frac{\partial \Phi}{\partial \lambda} + \frac{RT}{\pi} \frac{\partial \pi}{\partial \lambda} \right) = F_u,$$

$$\frac{dv}{dt} + \left(f + \frac{u}{a} \operatorname{tg} \varphi \right) u + \frac{1}{a} \left(\frac{\partial \Phi}{\partial \varphi} + \frac{RT}{\pi} \frac{\partial \pi}{\partial \varphi} \right) = F_v,$$

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

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

$$\frac{dT}{dt} - \frac{RT}{c_p \sigma \pi} \left[\pi \dot{\sigma} + \sigma \left(\frac{\partial \pi}{\partial t} + \frac{u}{a \cos \varphi} \frac{\partial \pi}{\partial \lambda} + \frac{v}{a} \frac{\partial \pi}{\partial \varphi} \right) \right] = F_T + \varepsilon,$$

$$\frac{dq}{dt} = F_q - (C - E),$$

где

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

Параметризация
процессов
подсеточных
масштабов

Параметризация процессов подсеточных масштабов

Турбулентность в пограничном слое атмосферы, верхнем слое океана и придонном пограничном слое

Конвекция и гравитационные волны

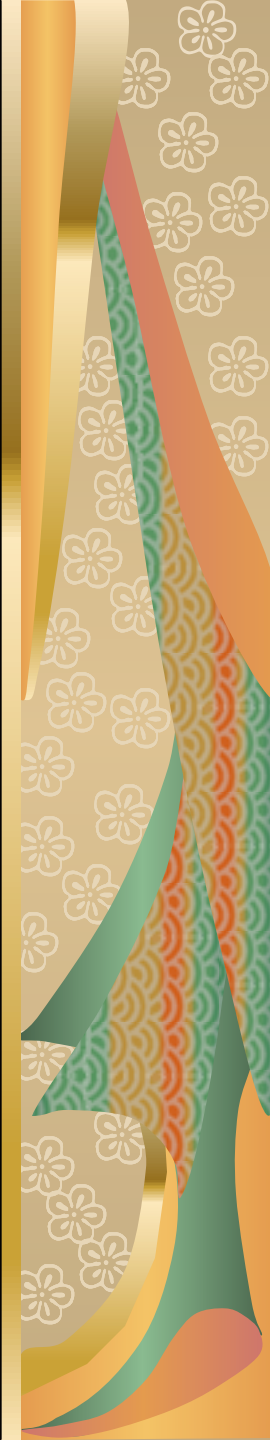
Неадиабатические источники тепла (радиация, фазовые переходы влаги, облачность, осадки и т.д.)

Цикл углерода и фотохимические процессы

Перенос тепла и влаги в почве, растительном и снежном покрове

И т.д.

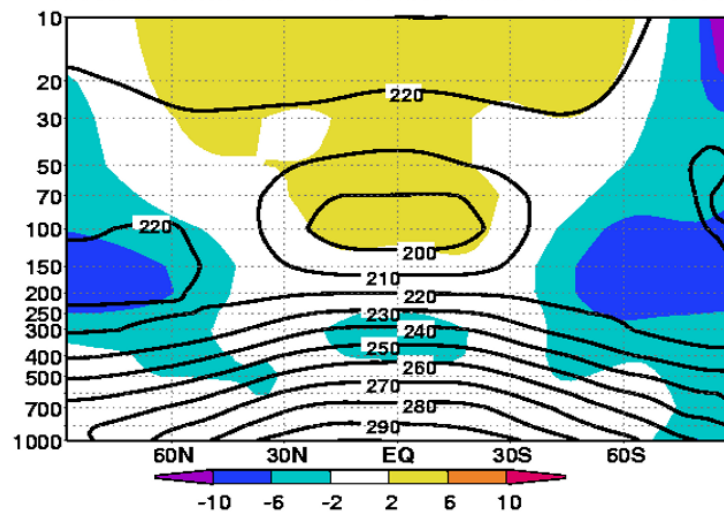
Воспроизведение современного климата



All CMIP Models averaged

Temperature

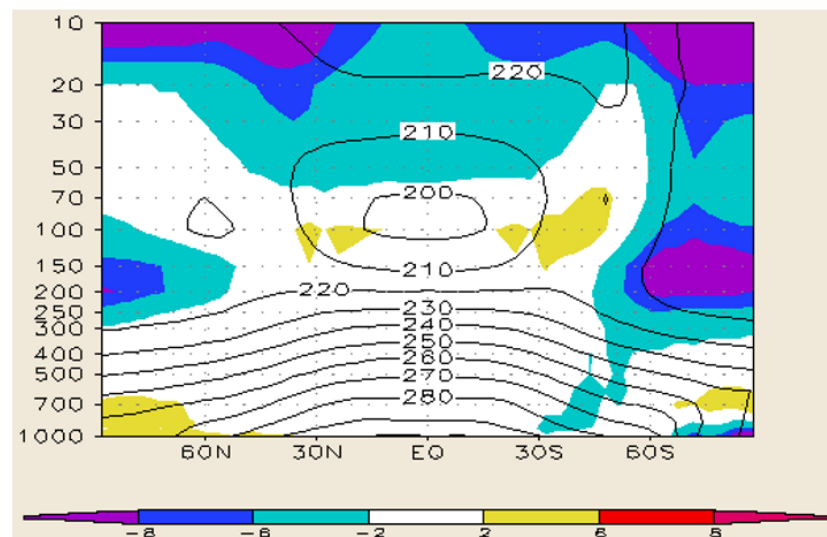
Observed Contoured Model Mean Minus Observed Shaded



INM Model results

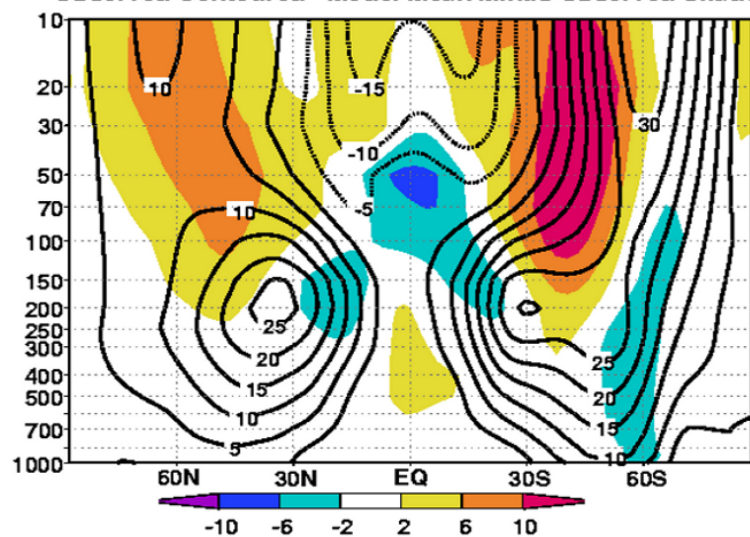
INM Zonally averaged Temperature (K)

Model mean contoured. Model mean - Obs. shaded



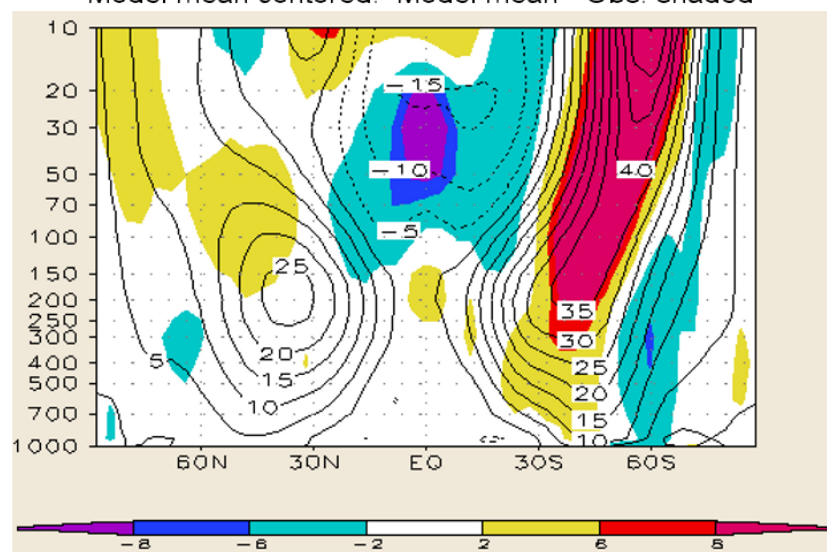
Zonal Wind

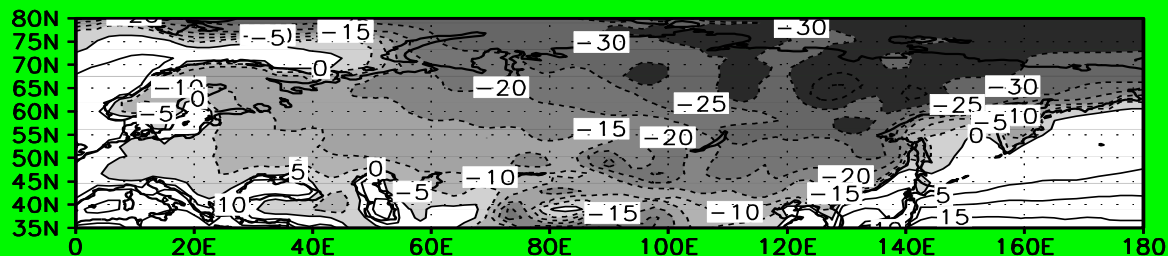
Observed Contoured Model Mean Minus Observed Shaded



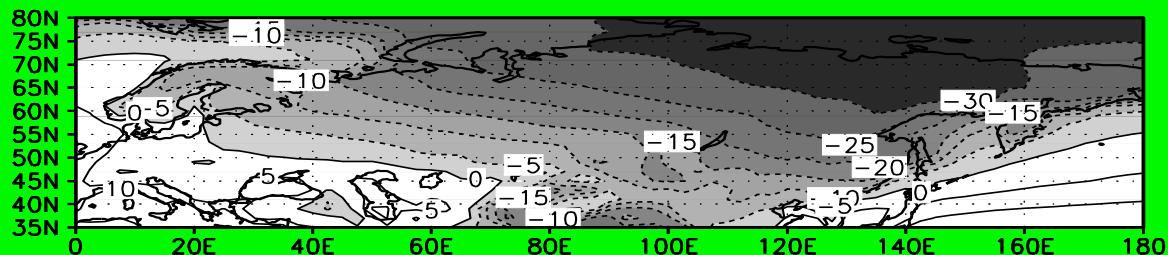
INM Zonally averaged zonal wind(m/s)

Model mean contoured. Model mean - Obs. shaded



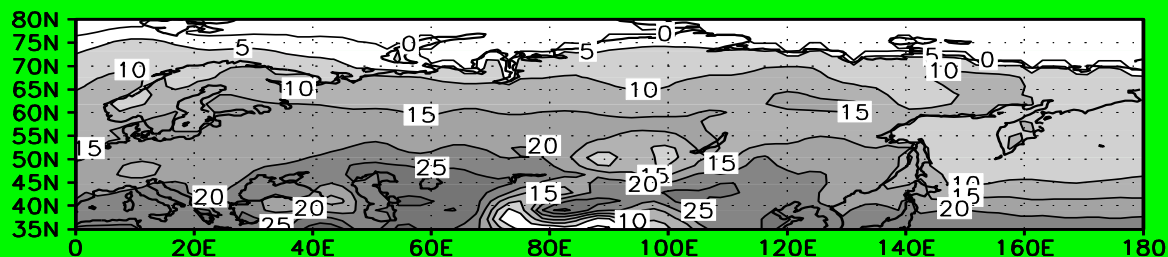


DJF T(2m) – NCEP
наблюдения

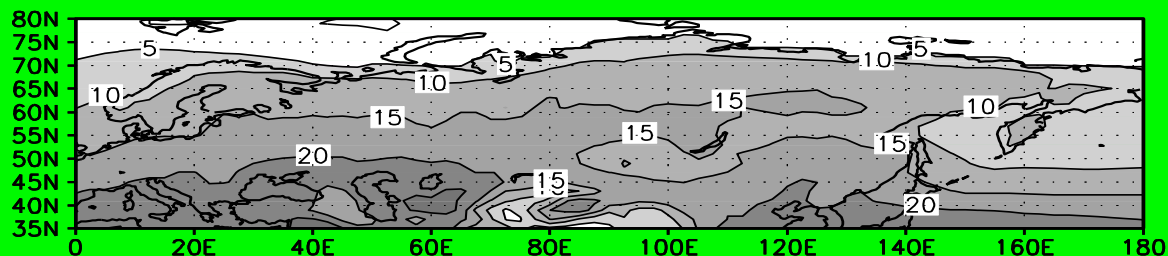


DJF T(2m) – INM
расчет

obs T2m JJA

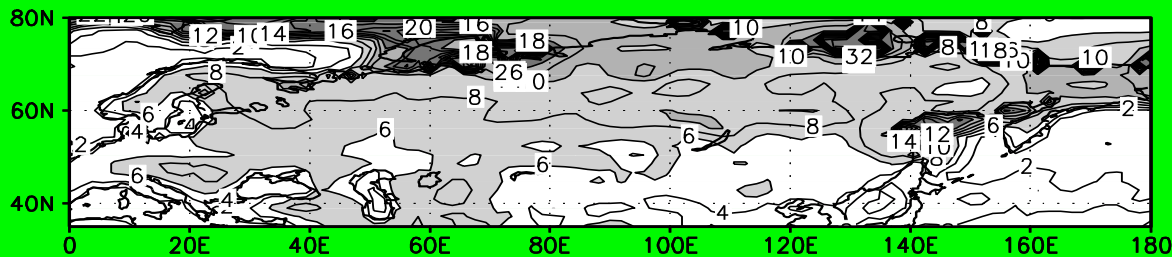


JJA T(2m) – NCEP
наблюдения

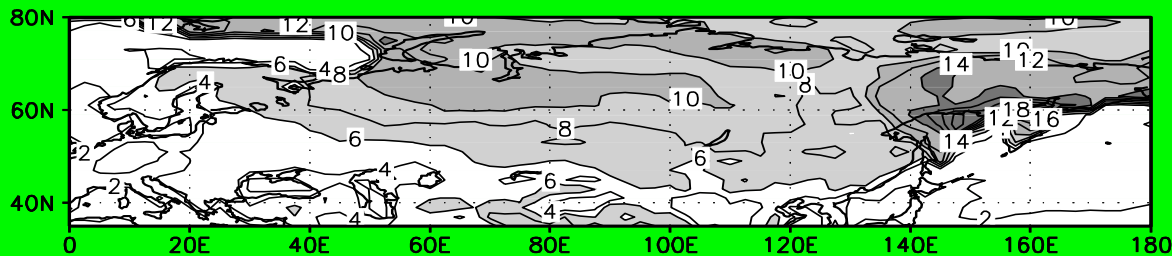


JJA T(2m) – INM
расчет

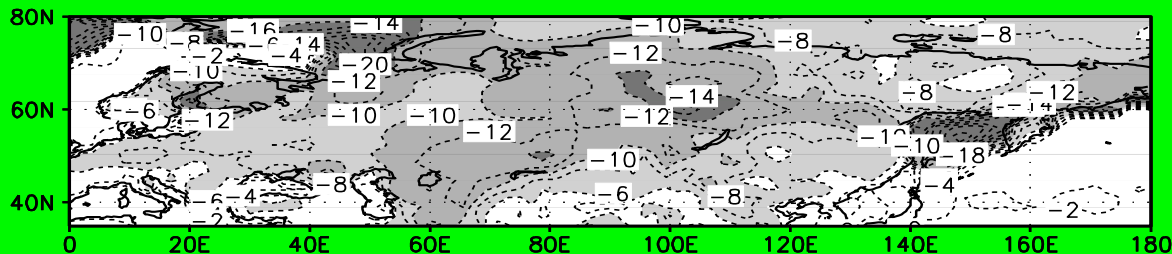
Современный климат



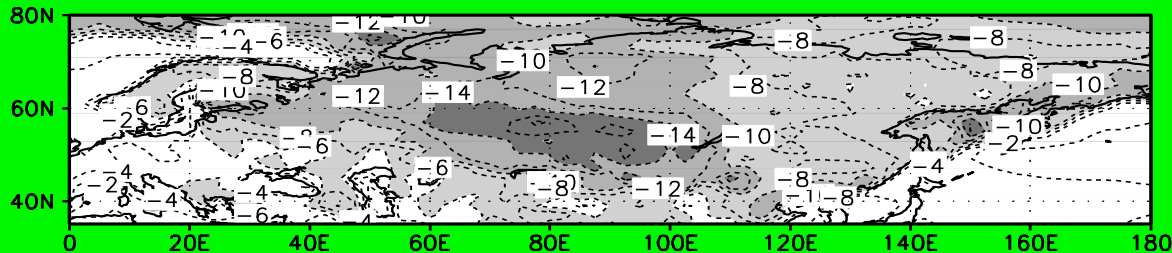
**Мах полож. DJF
аномалии T(2m)
наблюдения**



**Мах полож. DJF
аномалии T(2m)
модель**



**Мах отриц. DJF
аномалии T(2m)
наблюдения**

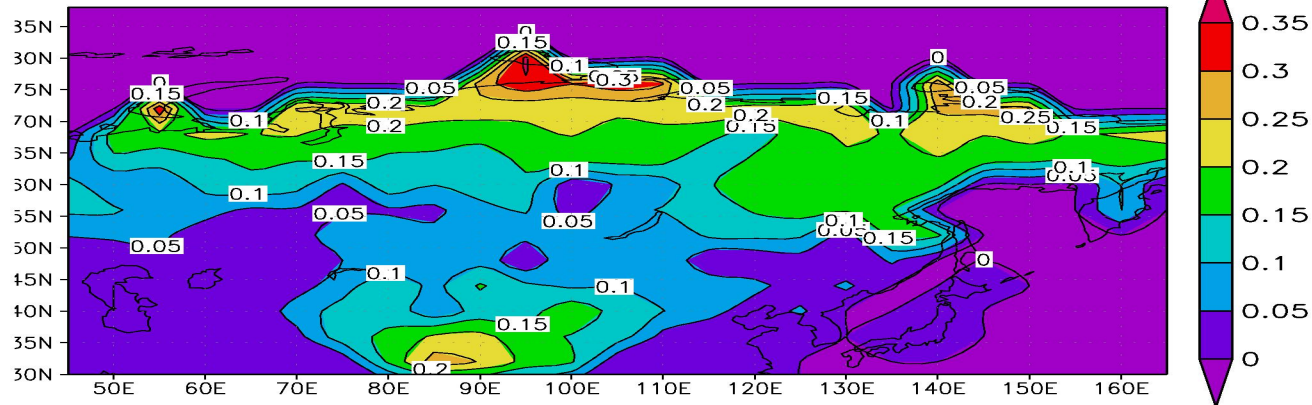


**Мах отриц. DJF
аномалии T(2m)
модель**

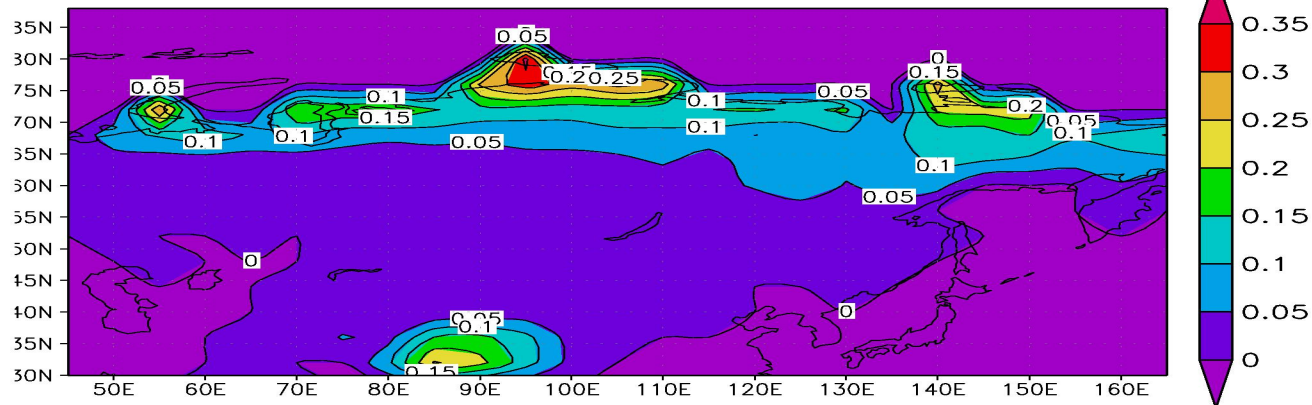
Современный климат

Воспроизведение вечной мерзлоты на территории России

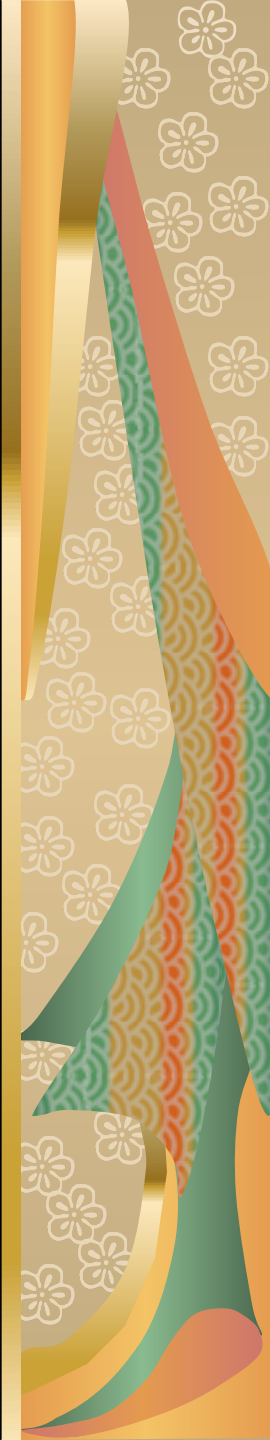
Winter 2m-mean Soil Ice: AMIP(60m)



Summer 2m-mean Soil Ice: AMIP(60m)



Теория чувствительности климата к малым возмущениям внешних воздействий



Математическая теория климата

1. Уравнения модели:
$$\frac{du}{dt} = F(u, t, \alpha)$$
2. Теоремы существования и единственности
3. Теорема существования аттрактора, оценка его размерности
4. Устойчивость аттрактора и мера на нем
5. Конечно-разностные аппроксимации и теоремы сходимости

Математическая теория климата (чувствительность)

6. Построение оператора отклика

$$\delta \langle u \rangle = M \delta f$$

(“оптимальное возмущение”, обратные задачи,....)

7. Методы аппроксимации оператора M

8. Численные эксперименты

Оператор отклика для первого момента (нелинейная теория)

Нелинейная модель:

$$\frac{du}{dt} + B(u) = \eta(t)$$

($\eta(t)$ - белый шум по времени)

«Возмущенная» модель:

$$\frac{du'}{dt} + B(u') = \eta(t) + \delta f$$

Стационарный отклик

$$\delta \langle u \rangle = \langle u' \rangle - \langle u \rangle$$

$$\delta \langle u \rangle = M \delta f$$

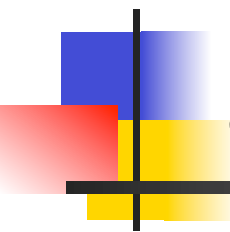
Уравнение Фоккера-Планка для плотности инвариантной меры ρ

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \operatorname{div}(B(u)\rho) = \varepsilon \Delta \rho$$

имеет единственное стационарное решение ρ^* .

В первом приближении по δf

$$\langle \delta u \rangle_i = \sum_j \int_0^t \left\langle u_i(t) \frac{1}{\rho^*} \frac{\partial \rho^*}{\partial u_j}(t') \right\rangle dt' \delta f_j$$



Следовательно,

$$M = \int_0^t \left\langle u_i(t) \frac{1}{\rho^*} \frac{\partial \rho^*}{\partial u_j}(t') \right\rangle dt'$$

В случае нормального распределения

$$M = \int_0^{\infty} C(\tau) C^{-1}(0) d\tau$$

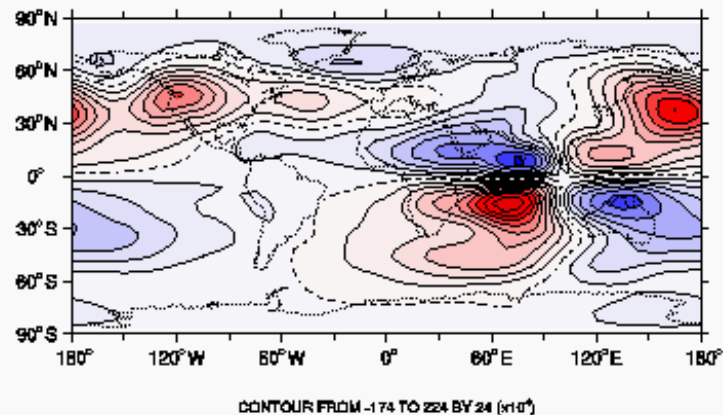
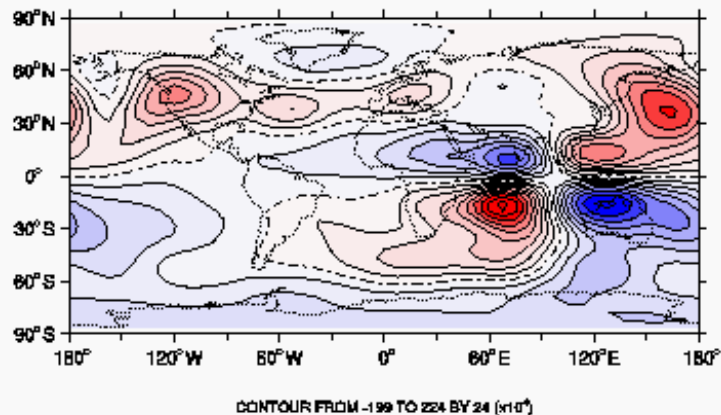
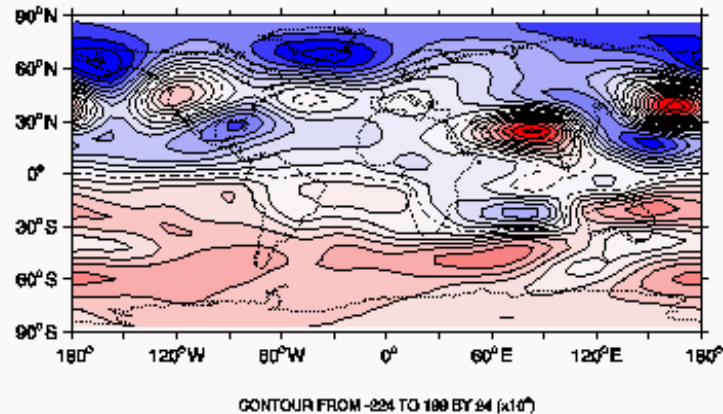
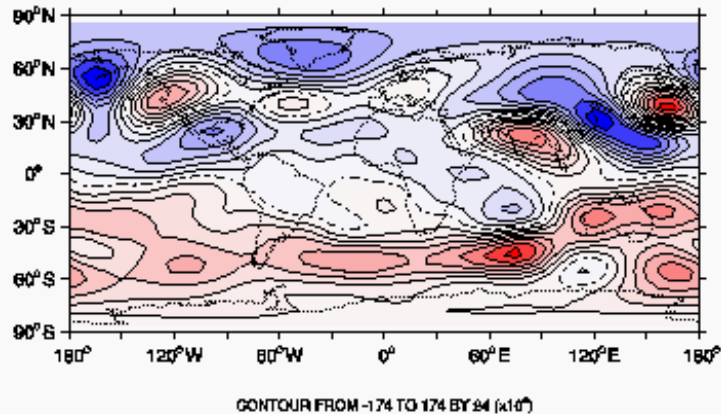
Численные эксперименты

CCM0 (E.J.Pitcher et.al., J.Atmos.Sci., (1982), v.40., p.580)

- 1) 9 уровней по σ -координате
- 2) прогностические переменные: дивергенция горизонтальной скорости, вертикальная компонента относительной завихренности, температура, относительная влажность, приземное давление
- 3) параметризация конвекции, конденсации, потоков явного и скрытого тепла, радиации, вертикальной и горизонтальной диффузии
- 4) Метод Галеркина для аппроксимации по пространству. Базисные функции – сферические гармоники, разрешение: R15. **Размерность фазового пространства: 18352**

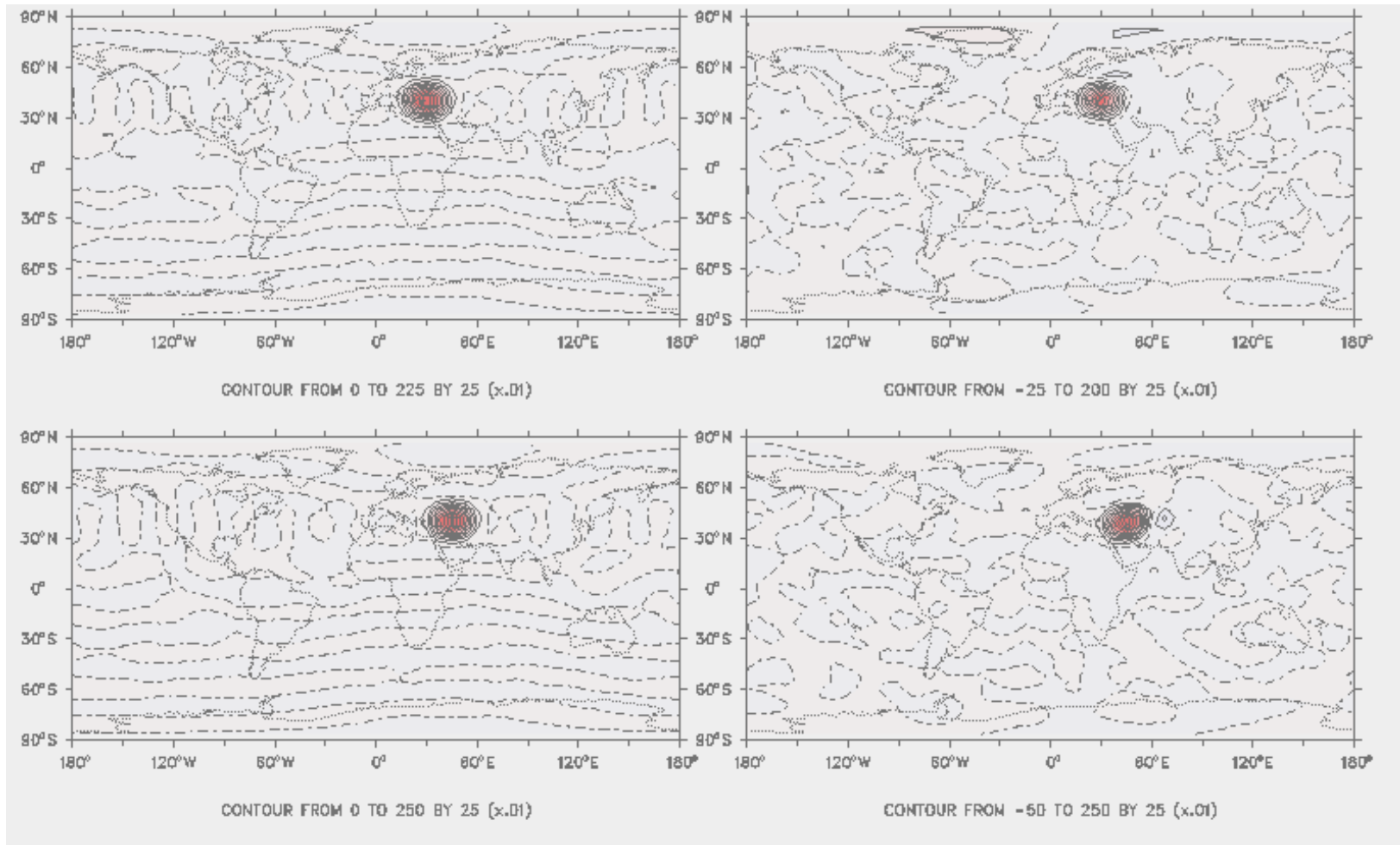
Построение приближенного оператора отклика
(A.S.Gritsoun, G.Branstator, V.P.Dymnikov,
R.J.Numer.Analysis&M.Model, (2002), v.17,p. 399)

Восстановление отклика ССМ0 на синусоидальную аномалию нагрева



Отклик, рассчитанный с помощью ССМ0 (справа) и восстановленный с использованием М-оператора (слева). Аномалия нагрева задана на (60E, 00N). Верхний рисунок – $\Psi_{0.336}$, нижний – $\Psi_{0.811}$

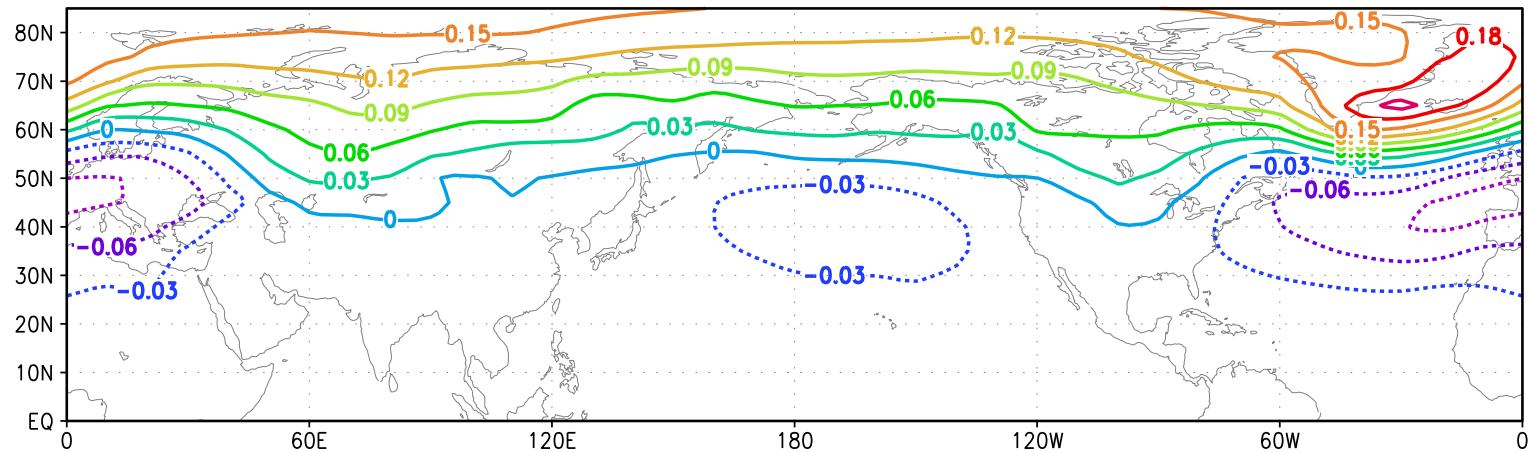
Восстановление приповерхностных аномалий нагрева с помощью обратного оператора отклика



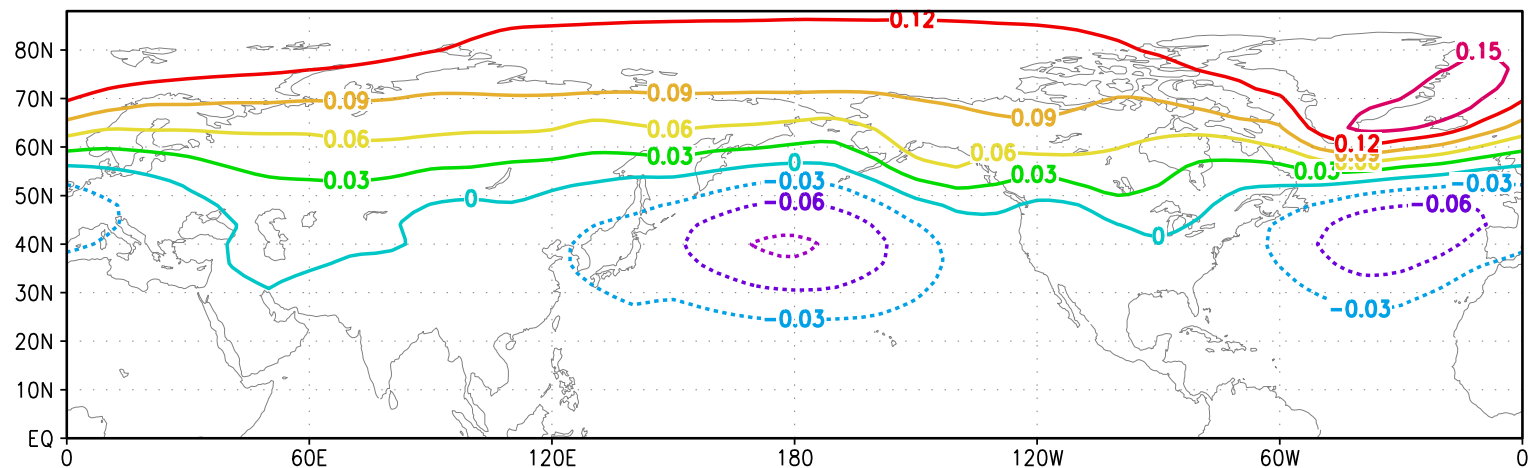
Слева: реальные аномалии при $\sigma=0.991$ (в К/сут.), справа: восстановленные аномалии. Местоположение аномалий: (30E,40N) и (45E,40N).

Восстановление источника нагрева, оптимальным образом возбуждающего АО

(данные реанализа NCEP/NCAR и результаты расчетов с моделью ИВМ РАН)

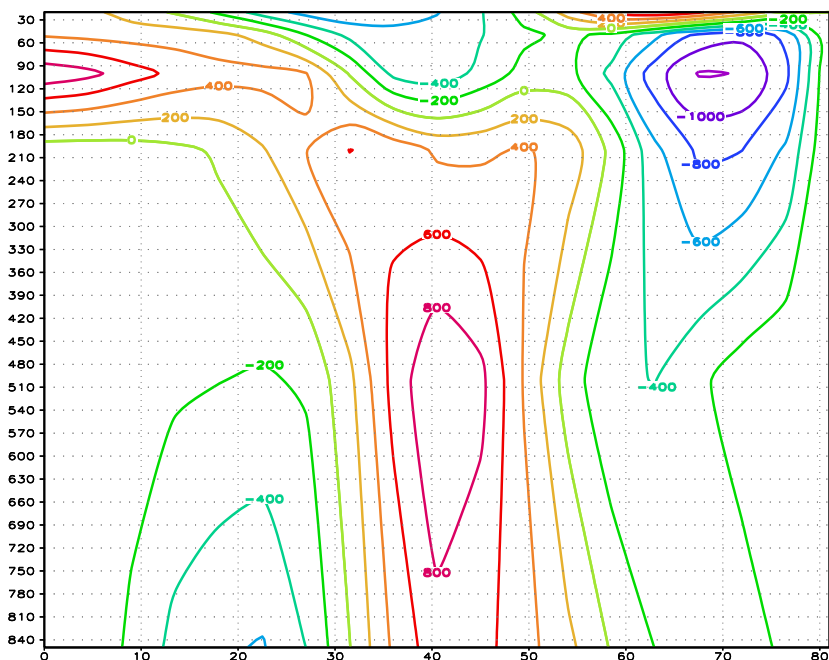


АО (1EOF приземного давления) по данным DJF NCEP/NCAR

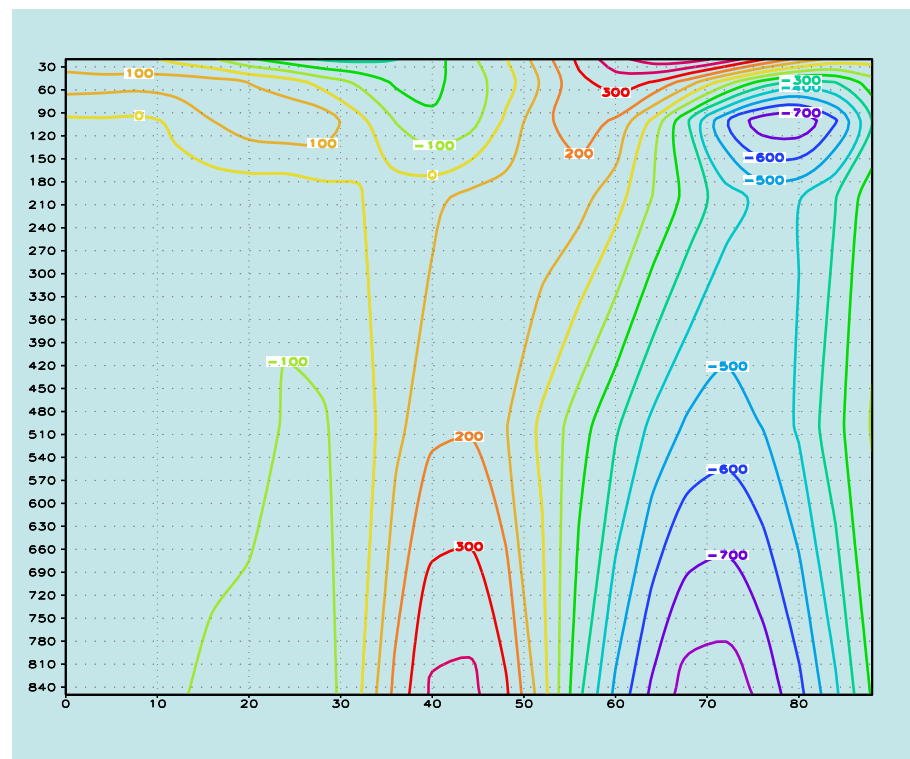


АО (1EOF приземного давления) по результатам модели ИВМ РАН

Процедура построения приближенного оператора отклика аналогична изложенной в (*A.S.Gritsoun, G.Branstator, V.P.Dymnikov, R.J.Numer. Analysis&M.Model, (2002), v.17,p. 399*)

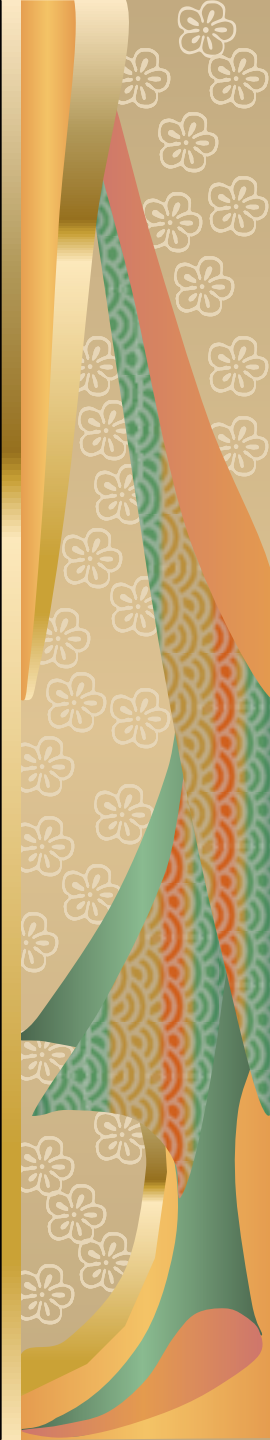


Оптимальное возмущение для АО (1EOF для PS), рассчитанное с помощью данных реанализа NCEP/NCAR (зонально осредненное)



То же, что слева, но вычисленное с помощью модели ИВМ РАН

Моделирование изменений климата, обусловленных увеличением атмосферной концентрации углекислого газа



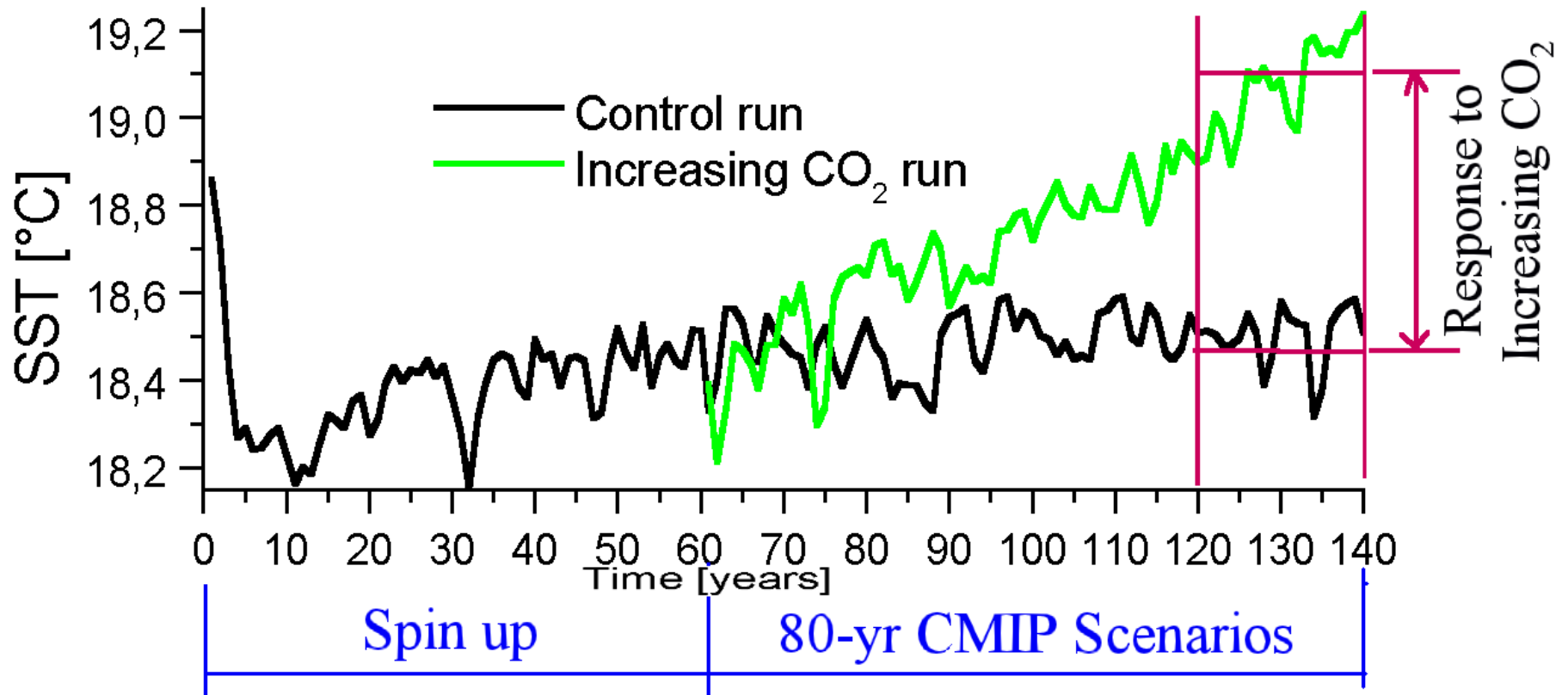
Чувствительность моделей климата к увеличению CO₂

CMIP - Coupled Model Intercomparison Project

<http://www-pcmdi.llnl.gov/cmip>

В рамках CMIP накапливаются результаты расчетов с глобальными совместными моделями общей циркуляции атмосферы и океана (свыше 30 моделей). Такого рода модели используются для обнаружения антропогенных эффектов в климатических данных прошедшего столетия и для оценки будущих климатических изменений, обусловленных антропогенным производством парниковых газов и аэрозолей.

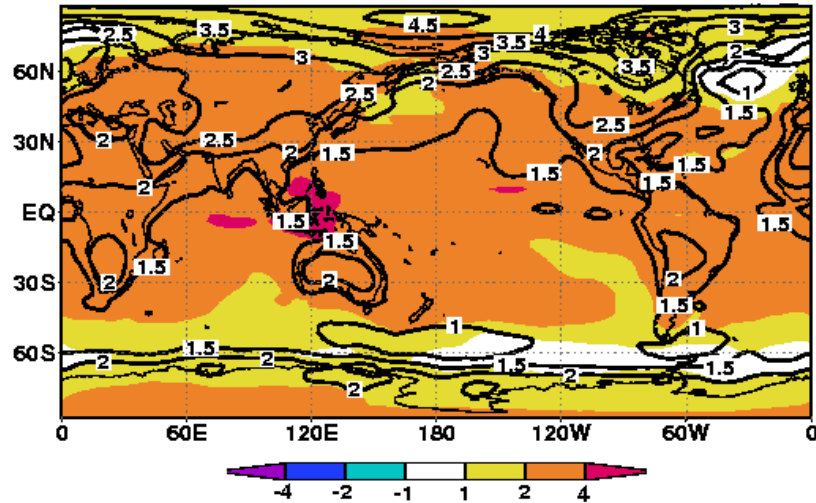
Global annual mean SST



Модельный отклик на увеличение содержания CO_2

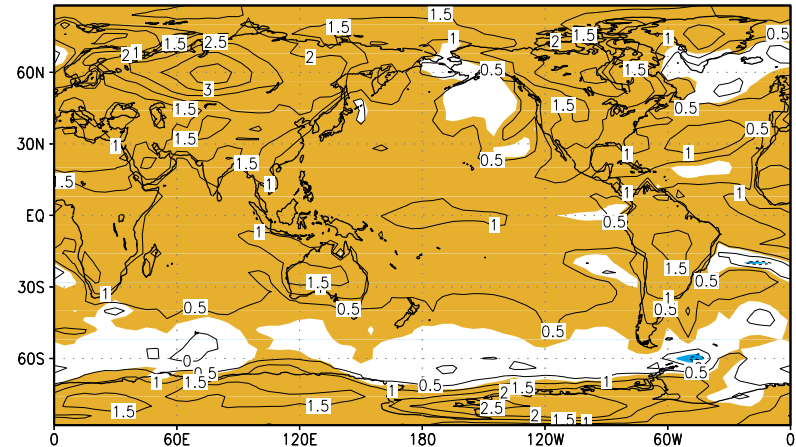
CMIP-модели (среднее)

Surface Air Temperature Years (61-80) Minus Years (1-20)
Model Mean Contoured Normalized Difference Shaded

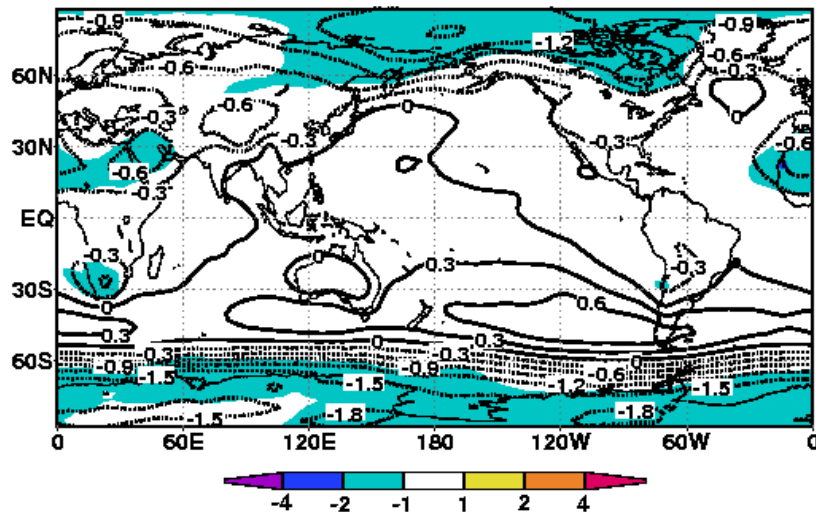


Модель ИВМ РАН

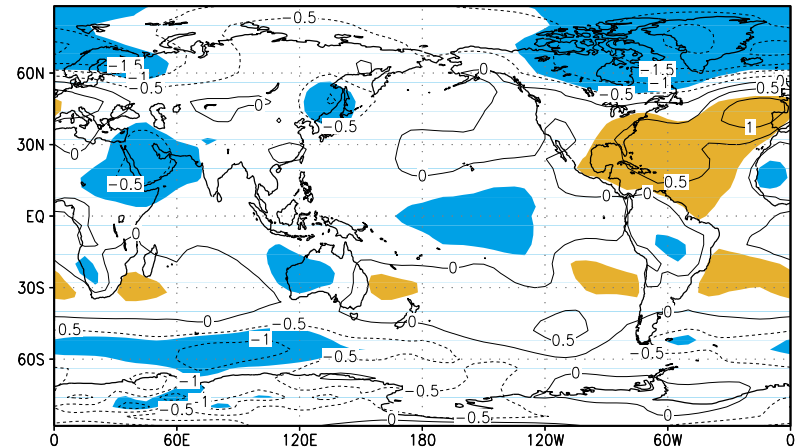
T2m C02 – control INM

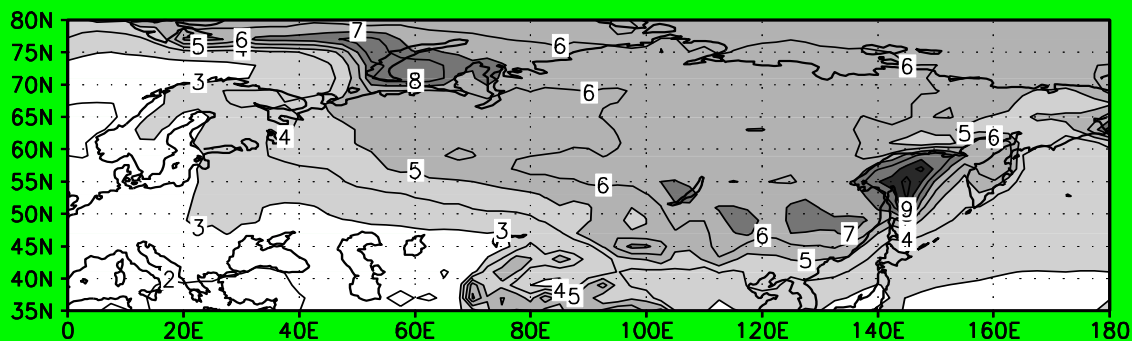


MSL Pressure Years (61-80) Minus Years (1-20)
Model Mean Contoured Normalized Difference Shaded

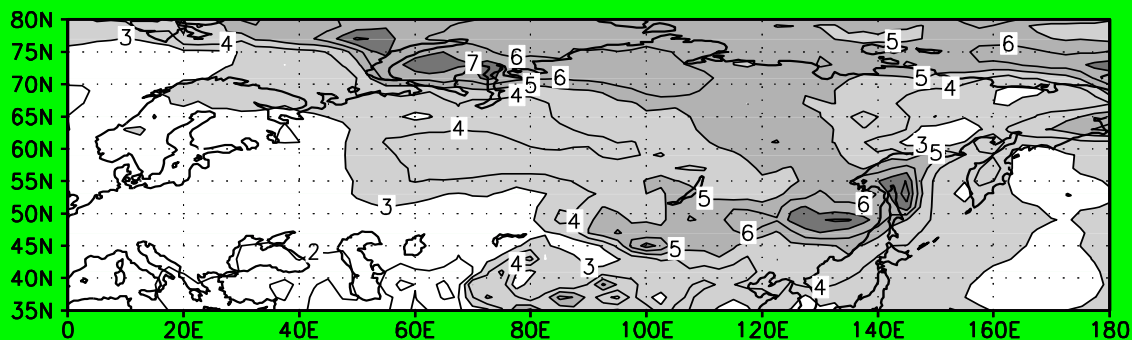


SLP C02 – control INM

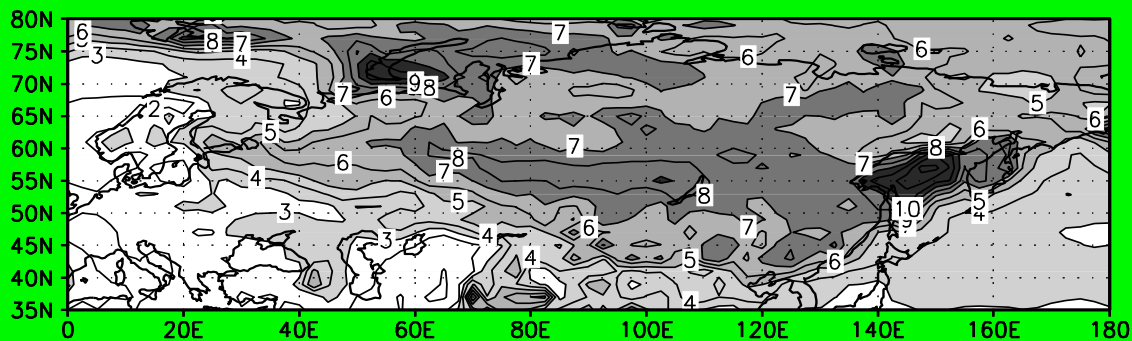




DJF средний



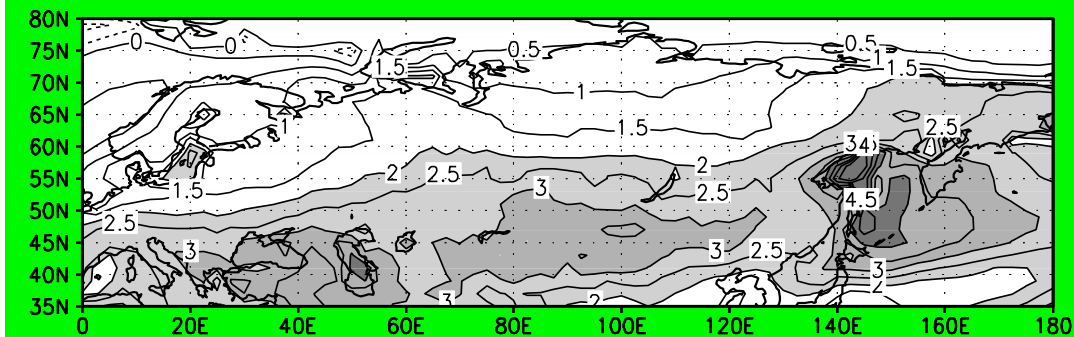
**DJF наиболее
теплый**



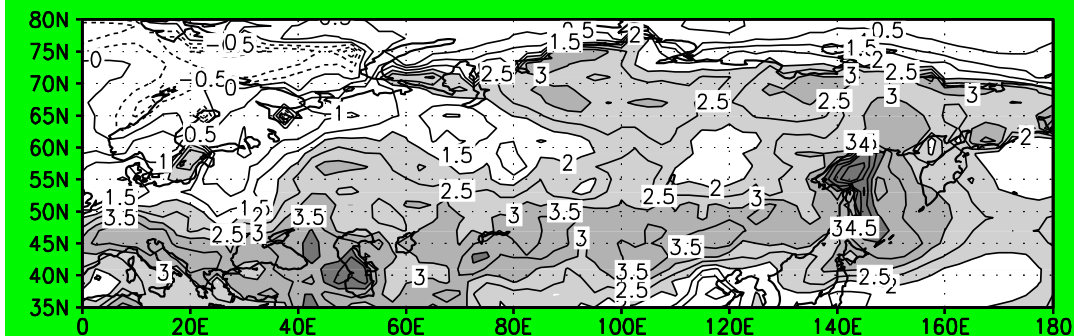
**DJF наиболее
холодный**



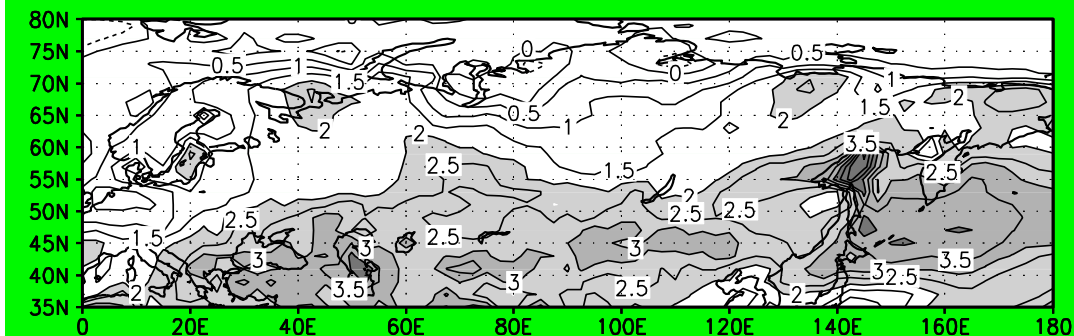
Изменения климата при удвоении CO_2 : $T(2m)$



ЈЈА средний



**ЈЈА наиболее
теплый**



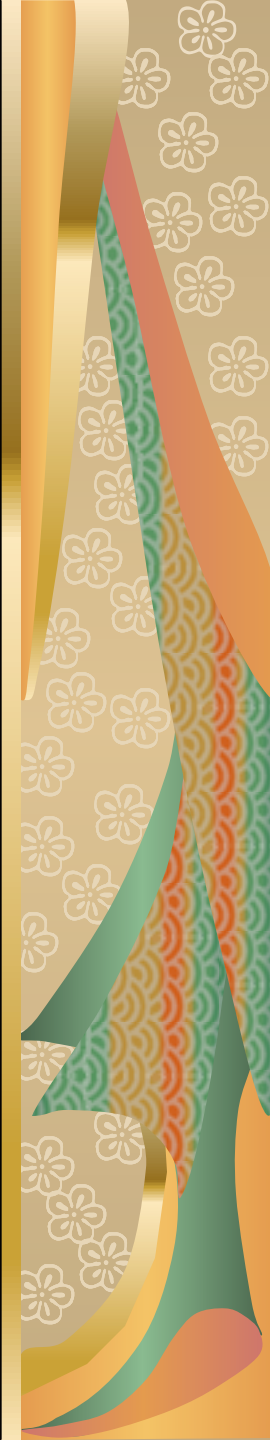
**ЈЈА наиболее
холодный**



Изменения климата при удвоении CO₂: T(2m)

**Моделирование изменений климата
в 20-22 столетиях с помощью совместной
модели общей циркуляции
атмосферы и океана**

Володин Е.М., Дианский Н.А.



1. Эксперименты по воспроизведению климата XX века.

Заданы: реальный временной ход изменения концентрации в атмосфере углекислого газа (CO_2), метана (CH_4) и закиси азота (N_2O) – основных парниковых газов, связанных с антропогенной деятельностью; наблюдавшиеся изменения во времени долготно-широтного содержания сульфатного аэрозоля, меридионального распределения оптической толщины вулканического аэрозоля, а также солнечной постоянной.

Продолжительность эксперимента: 130 лет (1871 г. – 2000 г.).

Контрольный эксперимент: содержание всех атмосферных составляющих не менялось во времени и соответствовало условиям 1871 г.

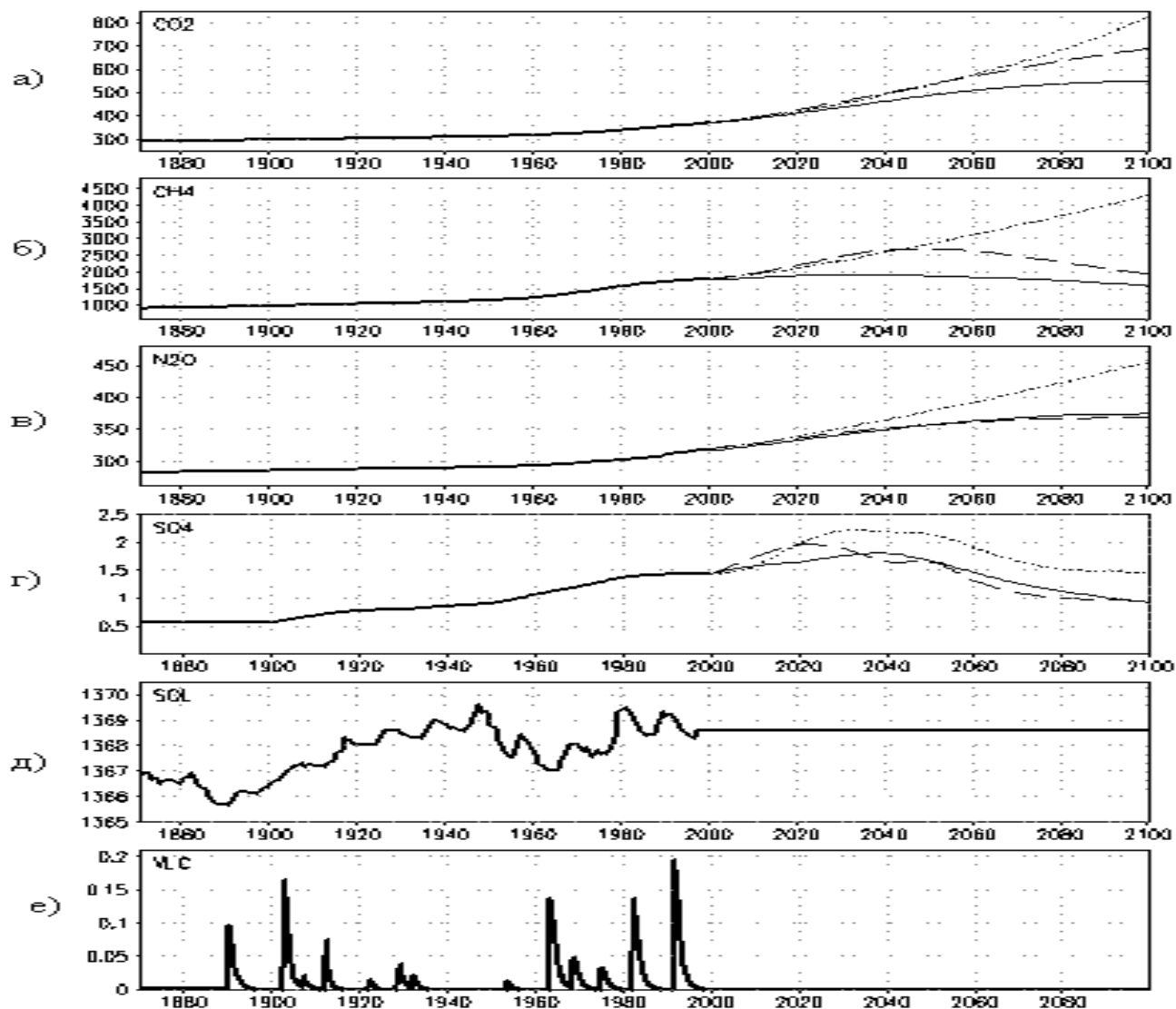
2. Эксперименты по моделированию климата XXI – XXII веков.

Содержание углекислого газа, метана, закиси азота и сульфатного аэрозоля в XXI веке соответствовало сценариям A1B, A2 и B1, предложенным IPCC.

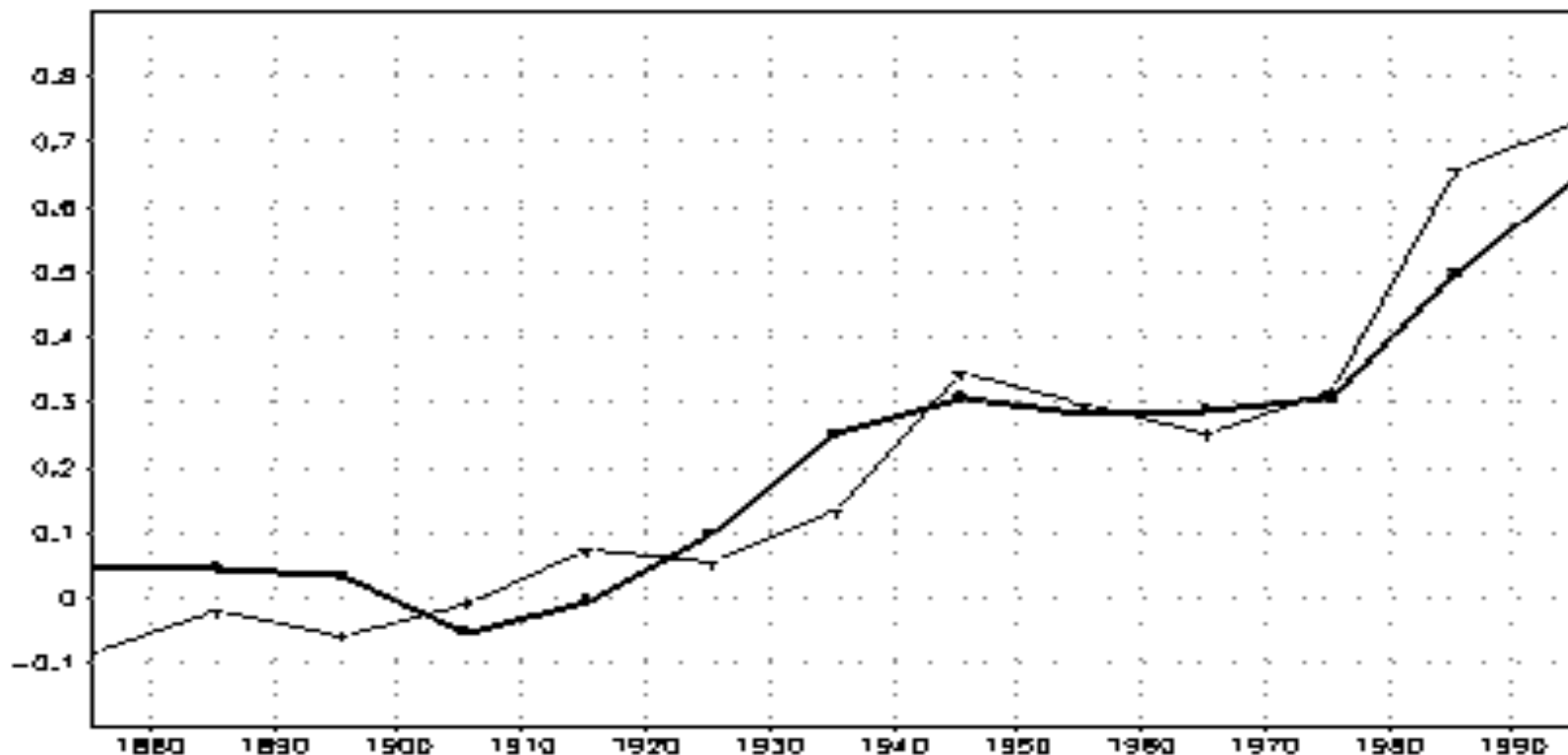
Солнечная постоянная и содержание вулканических аэрозолей заданы постоянными, наблюдавшимися в 2000 г. В течение XXII века содержание всех газовых составляющих соответствовало 2100 году.

Продолжительность каждого из экспериментов: 200 лет.

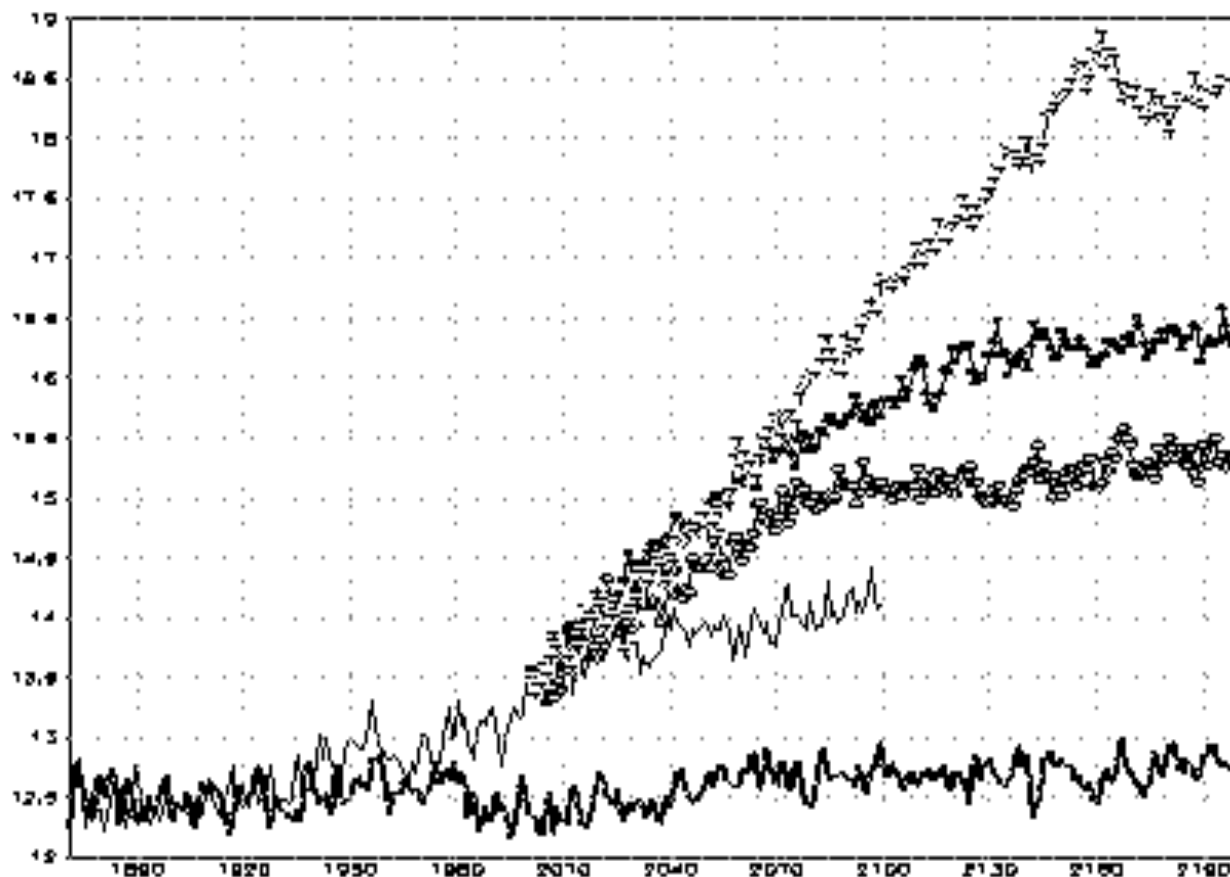
Изменение содержания (а) углекислого газа (частей на миллион), (б) метана (частей на миллиард), (в) закиси азота (частей на миллиард), (г) интегрального сульфатного аэрозоля (мг/м), (д) солнечной постоянной (Вт/м) и (е) интегральной оптической толщины вулканического аэрозоля (безразм.) в экспериментах XX (жирная сплошная линия), B1 (тонкая сплошная линия), A1B (штриховая линия) и A2 (пунктирная линия).



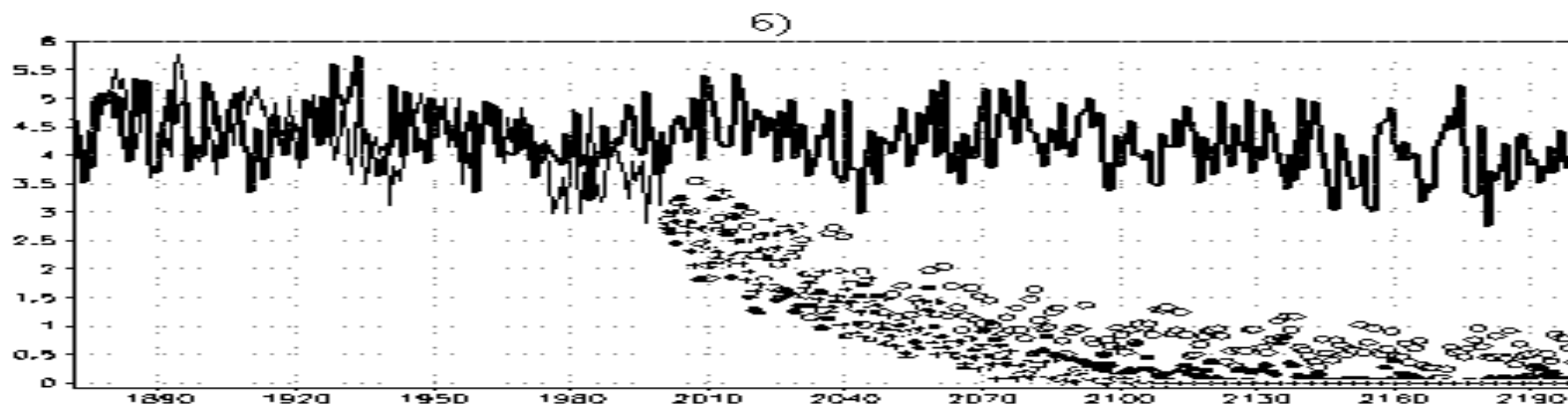
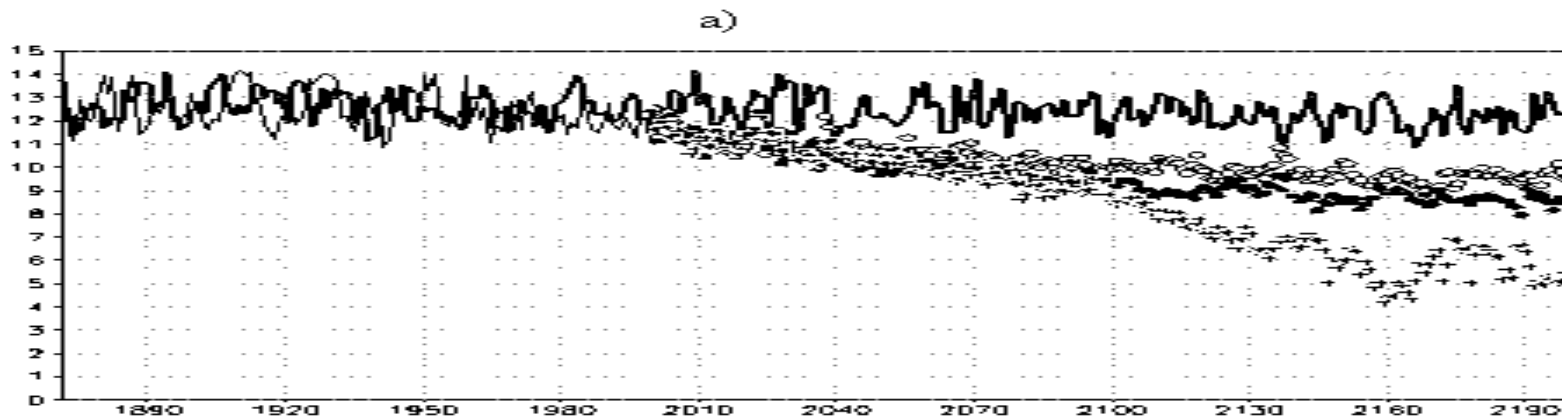
Изменение глобально осредненной приземной температуры воздуха в 1871-2000 гг. по данным наблюдений (жирная линия) и разность данных эксперимента XX и контрольного (тонкая линия). Данные осреднены за десятилетия.



Изменение интегральной температуры приземного воздуха, S в контрольном эксперименте (пунктирная жирная линия), экспериментах XX и XXI (сплошная тонкая линия), B1 (открытые кружки), A1B (черные кружки) и A2 (крестики). Сплошной жирной линией на рисунке (а) показано наблюдаемое изменение температуры.



Площадь морского льда в северном полушарии, млн. км в марте (а) и сентябре (б) по данным контрольного эксперимента (жирная линия), эксперимента XX (тонкая линия), экспериментов V1 (открытые кружки), A1B (черные кружки), A2 (крестики).



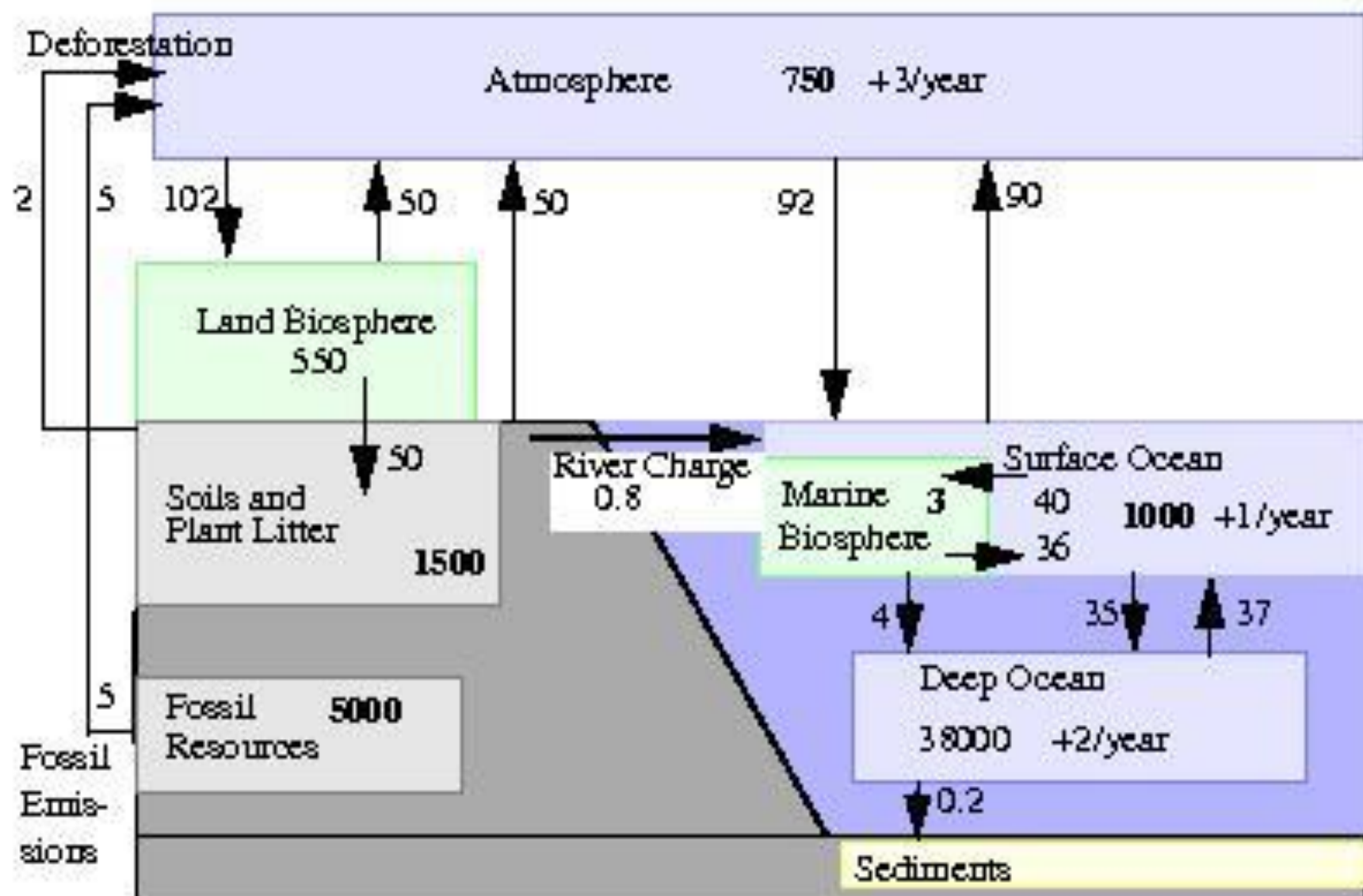


Figure 1.2: Diagram illustrating the global carbon cycle.

Основные задачи климатического моделирования-I

Математическая теория климата:

- а) создание теории устойчивости аттракторов климатических моделей;
- б) исследование структуры аттракторов климатических моделей;
- в) развитие теории чувствительности климатических моделей (теоремы о линейном приближении для различных моментов, численное исследование линейной теории отклика на малые возмущения, оптимальные возмущения, алгоритмы построения оператора отклика); г) теория управления диссипативными системами (управление климатом).

Основные задачи климатического моделирования-II

Климатические модели:

- а) развитие параметризаций физических процессов (стохастические параметризации);
- б) совершенствование совместных моделей атмосферы и океана;
- в) разработка региональных моделей климата и методов оценки последствий изменений климата для природной среды;
- г) создание моделей средней и верхней атмосферы для решения задач, связанных с «космической погодой».

Основные задачи климатического моделирования-III

Численные методы и параллельные вычисления:

- а) разработка теории аппроксимации уравнений гидротермодинамики на аттракторах (аппроксимация аттрактора как множества и аппроксимация меры на нем); б) аппроксимация динамики климатической системы на аттракторах;
- в) разработка схем с заданной группой симметрий;
- г) построение и использование пространственно-временных адаптивных сеток;
- д) разработка вычислительных технологий, ориентированных на массивно-параллельные вычислительные системы.



СПАСИБО

за ВНИМАНИЕ!