





Климатический прогноз: методология и практические приложения

Кислов Александр Викторович, д.г.н

Географический факультет МГУ имени М.В.Ломоносова кафедра метеорологии и климатологии

Научно-практическая школа-семинар молодых ученых и специалистов в области гидрометеорологии

31 октября - 2 ноября 2012 г.
г. Новосибирск

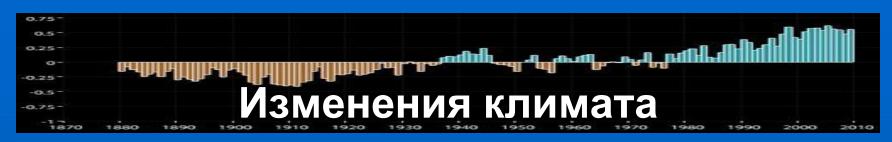
Содержание

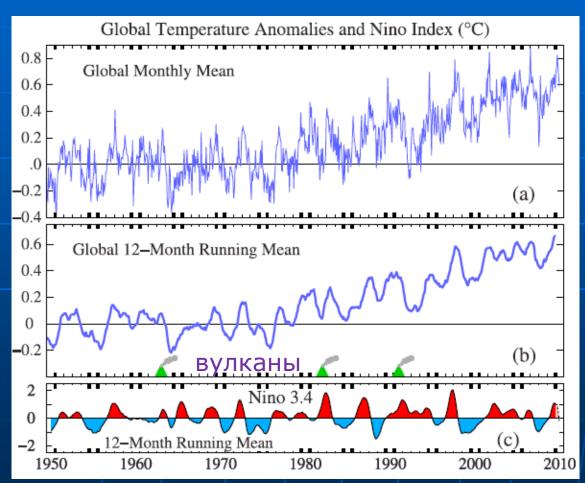
- Современные изменения климата.
- Последствие изменений климата: цивилизации, ресурсы, экономика, экология и здоровье.
- Методы прогноза климата. Математические модели.
- Ошибки моделирования. Вероятностный смысл решений. Уравнения Лиувилля и Фоккера – Планка.
- Ансамбли. Метрики. Верификация.
- Прогнозирование на периоды от сезона до нескольких лет.
- Прогноз на 21 век. Сценарии ІРСС. Климатический «даунскейлинг». Прогноз для Западной Сибири.

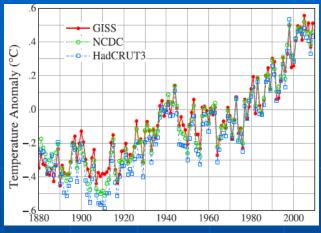
Содержание

Современные изменения климата.

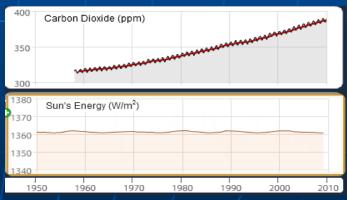
- Последствие изменений климата: цивилизации, ресурсы, экономика, экология и здоровье.
- Методы прогноза климата. Математические модели.
- Ошибки моделирования. Вероятностный смысл решений. Уравнения Лиувилля и Фоккера – Планка.
- Ансамбли. Метрики. Верификация.
- Прогнозирование на периоды от сезона до нескольких лет.
- Прогноз на 21 век. Сценарии IPCC. Климатический «даунскейлинг». Прогноз для Западной Сибири.





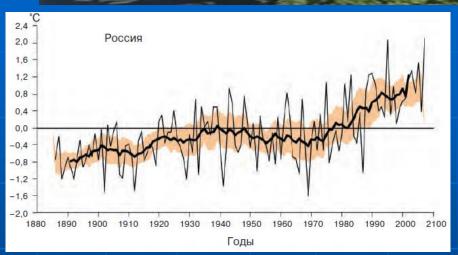


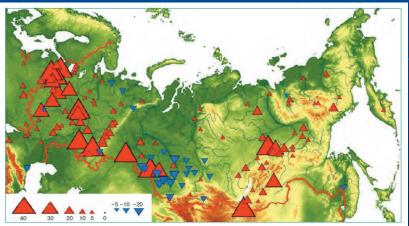
Сравнение архивов



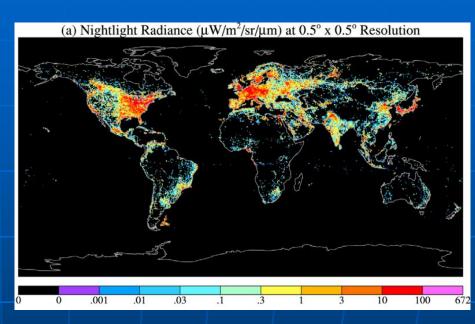
Факторы: СО2 и Солнце

Изменения климата: Россия и Западная Сибирь





Аномалии температуры (°C) и стока рек (% нормы за 1946–1977 гг.)

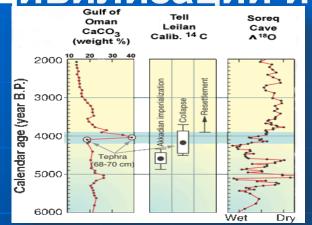


Неурбанизированные территории – яркость менее, чем 1 мВТ/(м² стер. мкм). Отбраковка станций, расположенных в городах

Содержание

- Современные изменения климата.
- Последствия изменений климата: цивилизации, ресурсы, экономика, экология и здоровье.
- Методы прогноза климата. Математические модели.
- Ошибки моделирования. Вероятностный смысл решений. Уравнения Лиувилля и Фоккера – Планка.
- Ансамбли. Метрики. Верификация.
- Прогнозирование на периоды от сезона до нескольких лет.
- Прогноз на 21 век. Сценарии ІРСС. Климатический «даунскейлинг». Прогноз для Западной Сибири.

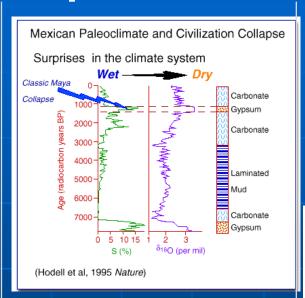
Изменения климата: коллапс древних цивилизаций и современные конфликты



In southern Mesopotamia, much of the Late Uruk society collapsed suddenly at about **5**,200-**5**,000 BP. Paleoclimatic data now indicate that a severe, multidecadal **drought** contributed to this collapse.

Many ancient civilizations throughout the Middle East and Mediterranean reached their economic peak at about 4,300 BP. However, before 4,200 BP a catastrophic drought and sooling event contributed to regional abandonment, collapse, and movement of societies to areas with more favorable climate. Figure shows the the correlation between sediments from the Gulf of Oman, isotopes from the Soreq cave, and archeological evidence from the

region. /Царство Аккада/

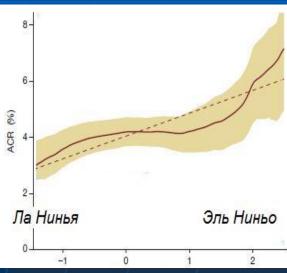


After the peak in the classic Maya culture around 1400-1200 B.P. (A.D. 600-800), civilization collapsed. the Evidence now indicates that rapid the onset an intense drought corresponds with the collapse of the Classic Maya civilization between 1200-1100 B.P. (A.D. 800-900).

Кортес (война в Мексике) 1519-1521



Red indicates an ENSO teleconnected pixel; NINO3 region in purple.



Conflict onsets in teleconnected countries during years El-Nino and La-Nina.

Климатически-обусловленные природные ресурсы (КоПР) и климатически зависимые отрасли экономики

Ресурсы:

- Энергетические ресурсы, включая ветровые и гидроэнергетические
- Затраты энергии на отопление (охлаждение)
- Водные ресурсы
- Агроклиматические ресурсы
- Территориальные ресурсы
- Экологические ресурсы человека, в том числе, связанные с уровнем заболеваемости
- Транспорт
- и т.д.

отрасли экономики:

- •Сельское хозяйство
 - •Лесное хозяйство
 - •Рыбное хозяйство
- •Охотничье хозяйство
 - •Гидроэнергетика
- •Нетрадиционная энергетика
 - •Коммунальное хозяйства
 - •Водный транспорт
 - •Рекреация и туризм

Содержание

- Современные изменения климата.
- Последствие изменений климата: цивилизации, ресурсы, экономика, экология и здоровье.

Методы прогноза климата. Математические модели.

- Ошибки моделирования. Вероятностный смысл решений. Уравнения Лиувилля и Фоккера – Планка.
- Ансамбли. Метрики. Верификация.
- Прогнозирование на периоды от сезона до нескольких лет.
- Прогноз на 21 век. Сценарии IPCC. Климатический «даунскейлинг». Прогноз для Западной Сибири.

Методы прогноза климата

Канонические

- 1) «что было может быть опять»:
 - с точки зрения амплитуды (пример: уровень Каспийского моря);
 - с точки зрения повторения процессов (события Дансгора-Оешгера, фильм «Послезавтра»)
- 2) палеоаналоги: М.И.Будыко: от глобального прогноза $T = T(CO_2) \rightarrow$ зонально-осредненные (региональные) особенностям поля температуры \leftarrow палеоаналоги
- 3) климатические модели: объединенные модели атмосферы и океана, модели земной климатической системы.

Неканонические

- Геодинамическое воздействие
- Фантастические, нелепые, ...

Две задачи прогноза. Даунскейлинг.

Набор внешних условий не определяет однозначно состояние климата (интранзитивная система или почти-и.с.): существование в одном состоянии и переход в другое (другие). В этом случае начальные условия могут определять будущий климатический режим.

Прогноз климата:

- моделирование климата как отклик на радиационное воздействие изза антропогенных или естественных выбросов газов и аэрозолей, а также изменений свойств земной поверхности из-за урбанизации, с/х производства, опустынивания.
- моделирование сезонных межгодовых вариаций (проблема начальных условий).

Если данные климатической модели используются как входные для региональной (мезомасштабной) модели или для статистической процедуры, обеспечивающей переход к мелкомасштабным особенностям, то этот процесс называется климатический даунскайлинг.

Ошибки моделирования. Эталоны для верификации.

Некоторые ошибки, типичные при прогнозе погоды, влияют и на прогноз климата. Другие – например, фазовые ошибки в атмосферных волнах, не так важны. Появляются другие источники ошибок – медленные изменения массы (воздуха или водяного пара). Разбаланс энергии – дрейф температуры. Искусственная корректировка (flux correction).

Эталон для верификации – современный климат. Однако, модель настраивается на современный климат – поэтому этот эталон не совсем хорош. Другие эталоны – события прошлого. Потенциальный эталон – климаты других планет (в т.ч. экзопланет).

Схема компьютерного моделирования климата

Параметры и граничные условия

Внешние воздействия

SVAT

dx/dt=F, x=x(0)x = (T, U, q, p)

Климатическая модель (Модель земной **AGCM** системы) **OGCM** Land

Ocean biochemistry

Ice sheets

Автоколебания (шум)

Отклик на

Нелинейные эффекты

воздействия

Изменения климата

Уравнения динамики атмосферы (AGCM)

$$\frac{du}{dt} - (f + \frac{u}{r}tg\varphi)v + \frac{1}{r\cos\varphi}(\frac{\partial\Phi}{\partial\lambda} + \frac{RT}{p_s}\frac{\partial p_s}{\partial\lambda}) = F_u$$

$$\frac{dv}{dt} + (f + \frac{u}{r}tg\varphi)u + \frac{1}{r}(\frac{\partial\Phi}{\partial\varphi} + \frac{RT}{p_s}\frac{\partial p_s}{\partial\varphi}) = F_v$$

Уравнения Рейнольдса в квазистатическом $\frac{dv}{dt} + (f + \frac{u}{r}tg\varphi)u + \frac{1}{r}(\frac{\partial\Phi}{\partial\varphi} + \frac{RT}{p_s}\frac{\partial p_s}{\partial\varphi}) = F_v$ сигма - сферической

$$\frac{dT}{dt} - \frac{RT}{c_p \sigma p_s} \left[p_s \dot{\sigma} + \sigma \left(\frac{\partial p_s}{\partial t} + \frac{u}{r \cos \varphi} \frac{\partial p_s}{\partial \lambda} + \frac{v}{r} \frac{\partial p_s}{\partial \varphi} \right) \right] = Cucteme koopдuhat$$

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

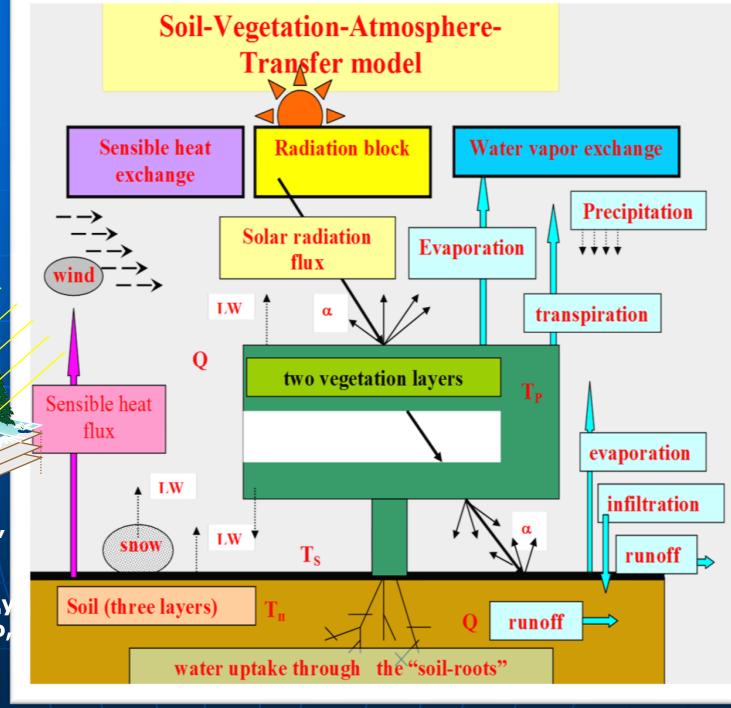
$$\frac{\partial \Phi}{\partial \sigma} = \frac{RT}{\sigma} \quad \frac{dq}{dt} = E - C + F_q \quad \frac{d}{dt} = \frac{\partial}{\partial t} + \frac{u}{r \cos \varphi} \frac{\partial}{\partial \lambda} + \frac{v}{r} \frac{\partial}{\partial \varphi} + \dot{\sigma} \frac{\partial}{\partial \sigma}$$

$$\dot{\sigma}(\sigma) = \frac{\sigma}{p_s r \cos \varphi} \int_{\sigma} \left(\frac{\partial p_s u}{\partial \lambda} + \frac{\partial p_s v \cos \varphi}{\partial \varphi} \right) d\sigma' - \frac{1}{p_s r \cos \varphi} \int_{\sigma} \left(\frac{\partial p_s u}{\partial \lambda} + \frac{\partial p_s v \cos \varphi}{\partial \varphi} \right) d\sigma'$$

SVAT

(«Почва— Растительность— Атмосфера— Перенос»)

перенос радиации, тепла, H_2O , CO_2 , малых газовых компонент между растительностью, почвой и атмосферой



The CNRM-CM5.1 global climate model

CNRM-GAME (Centre National de Recherches Me'te'orologiques— Groupe d'e'tudes de l'Atmosphe`re Me'te'orologique) and Cerfacs (Centre Europe'en de Recherche et de Formation Avance'e)

AGCM: ARPEGE-Climat v5.2

SURFEX: TRIP, ISBA

flow of ice sheets

OGCM: NEMO v3.2 "Nucleus for European Modelling of the Ocean"

Sea ice model: GELATO v5

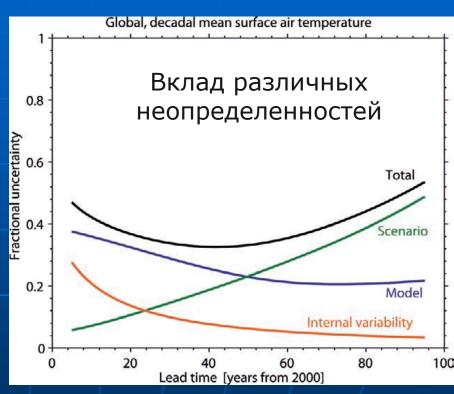
Содержание

- Современные изменения климата.
- Следствие изменений климата: цивилизации, ресурсы, экономика, экология и здоровье.
- Методы прогноза климата. Математические модели.
- Ошибки моделирования.
 Вероятностный смысл решений.
 Уравнения Лиувилля и Фоккера Планка.
- Ансамбли. Метрики. Верификация.
- Прогнозирование на периоды от сезона до нескольких лет.
- Прогноз на 21 век. Сценарии IPCC. Климатический «даунскейлинг». Прогноз для Западной Сибири.

Неизбежность вероятностной интерпретации

Неизбежные ошибки: ошибки в исходных данных, граничные условия на поверхности, численная аппроксимация, параметризации физических процессов, сценарии изменений управляющих параметров. Т.о. отдельный прогноз выглядит как детерминированный, а на самом деле это, по существу, есть одна из реализаций случайного процесса.

Поэтому следует искать плотность вероятности $\rho(X, t)$, где X климатические переменные. Прогностические уравнения для ρ - уравнение Лиувилля и Фоккера – Планка. В практическом смысле используется ансамблевая технология.



Hawkins and Sutton 2009

N- Mermag en erneng yn-5 1-12 maped ver De = P(x,t) /6/ nincen perneme 3 abres mer en kar. Jes & m Sperson to Jelones mee em kar. Jen & m Jen en mennem $\mathcal{Z} = \mathcal{Z}(\mathcal{B},t)$ 171 3 de 34 en grove: $J = \det\left(\frac{3\mathcal{Z}(\mathcal{B},t)}{3\mathcal{B}}\right) |_{\mathcal{B}} \int_{\mathcal{B}} dt = 3\mathcal{A} d\mathcal{Z}$ $\int_{\mathcal{B}} dt \left(\frac{3\mathcal{Z}(\mathcal{B},t)}{3\mathcal{B}}\right) |_{\mathcal{B}} dt = 3\mathcal{A} d\mathcal{Z}$ at (at) $\frac{1}{3t} = \frac{1}{3t} = \frac{1}{3t}$ $\frac{1}{3t} = \frac{1}{3t} + \frac{1}{3t}$ $\frac{1}{3t} = \frac{1$ noskelemes agberenvlære sarreng Kouxpermoro upmmer Jpe Pour on D=-R2. Permenne D(A,t)= 17+tol (mpslepsenny moderate busin) $J(\theta,t) = \frac{3\pi}{3\theta} = \frac{1}{(1+t\theta)^2}$ $\theta(x,t) = \frac{x}{1-t\pi}$ nagemalan m bracemo θ , nongram $J(X,t) = (1-tZ)^2$

AMENIT 208 110%: =-2 1 1 (1+++0) (1++0) AMEN = 9NS /11/: J(O,+) (=+ x=x) T(x,+) =-2 x 3 T(x,+) $-2\pi\frac{1}{\left(1+t\frac{\pi}{1+t\pi}\right)^2}=-2\pi\left(1-t\pi\right)^2$ Tpanenapmen TRopena (TT) Peremanpan necomspyra barrany & (x,t) u myems I(t) = \(\int \(\int \), t) doe 12-1/ mpmen = 16/ R(+) - MORSEP. STANCE $\frac{dI}{dt} = \frac{d}{dt} \int \chi(x(\theta, t)) dx = \frac{d}{dt} \int \chi(x(\theta, t), t) J(\theta, t) d\theta$ (8 Jok= wohksw R(0) me jobnem st sperrers d R = 38 d 0 = ST dx lot x dt logdo =

 $=\int_{\mathcal{T}} \left\{ \frac{\partial \mathcal{X}}{\partial t} + \sum_{j=1}^{N} \frac{\partial \mathcal{X}}{\partial \mathcal{Z}_{j}} \frac{\partial \mathcal{Z}_{j}}{\partial t} \right\} = +\chi \left(\sum_{i=1}^{N} \frac{\partial \mathcal{Z}_{i}}{\partial \mathcal{R}_{i}} \right)_{\mathcal{R}_{i}}$ meneps Sopamno: reprocog KRA udos $\frac{d}{dt} \int \chi dz = \int \left\{ \frac{3\chi(ze,t)}{3t} + \sum_{j=1}^{N} \frac{3\chi(ze,t)}{3z} + \sum_{j=1}^{N} \frac{3\chi(ze,t)}$ $\frac{1}{3} + \chi(x,t) \sum_{i=1}^{N} \frac{3x_i}{3x_i} dx$ Cregenbus Titt 1). 7 = p(x,t) - unamusems pearingousins le passes m mp-te. Myeme peaning on min Juden 13 Heromotors Burkens, Tare -12 memeryon me meresery de f gdx = 0 - 1271 anaros eoxporneny maces (+) & magnagumas -noxyroemos m- & hybring 2) X = 1 => I(+) = fdx = V(+) - soroem (mustomer, dV = S = Sizi de (29) uzmettetine soema It = Sizi de (29) uzmettetine soema - unimergian gribani b payaton upotyana 3)X=PF,

T-= gras g (pdf) LE. 43 (26/:) nacoabhar byr year stems forms years on (not flux) 38 + 23 2 [3 20 k] them wender grand sohe one a more come one perme pdf beremspa oc Levent ET "whowever x=+ (6) 2 3 DK 38 + 2 0 39 St + 2 0 39 /33 2 DXx 22=1 A Auhenne med mat your langue. Julipretty of moments fedam uh-fr LE: yr- expormenny mousersen encs. 16/8 pazzl. beginderne dumanni Moone benefor AKONOT yn Herozy whosem, He ereapsend fogesom Mug-lee - wybeem Hor - & STAN et måbedre und seg han enbegterene n3 M-2 der wwwheld B /31/: team removement/ emoved: pearing any Lernesse LE ompedensers gunno munio P(2

Lemering LE: $g(x,t) = g_0(0) exp - \int \psi(x(0,t'),t')dt'$ = h (x, t) ornnovance /35 $\mathcal{P} = \mathcal{P} - \mathcal{P} = \mathcal{P}(\mathcal{P}); \quad \mathcal{P} = 1 - 3.\infty^2$ coem polareobecus M3 /33/: $\frac{dx}{dx} = 0 \Rightarrow x = 0$, $\frac{dS}{dx} + (x - x^3) \frac{dS}{dx} = -(1 - 3x^2)S$ /3 1= x-x 3 (8(x+)=9=(3[x+1)exp[-](1-3(x[3(x+1)])] 3+1) 2=0 => DE>0 Hela D=+15x=-78x<040.

For I wax. enourony /6/ Almo Dolnery chyronitarie upaged, me llE meslasers griffy. weren's movem to ever enga på den susse ut to du top de susse utrasse et LE 62 mon engrae mas. yn-e Gruse 39 + 3 p (2)9 - I 3 = 0 (75) Maysoy e permemnen m-s lammatera & Pri 2 yr & PT, yr-e 174/ monemo pername morenno = como permany x(+x+) = x(+)++(x)x++(F/x+)(0,1)

«дисперсия – коэффициент диффузии»: Флуктуационно-диссипативное соотношение

Mam. skengaring p-your 2: $E(\mathcal{R}(t)) = \int \mathcal{R}g(\mathcal{R},t) d\mathcal{R}$; $E[s(\mathcal{R})] = \int s(\mathcal{R})g(\mathcal{R},t)$ Dorasana montrono: THE [SCR)] = E THE 184/ Ino serrela noemborund the dry work congr. of-your fresh Eem I mexigues ende war vient was, was being a many rading regan enemena gos manen mot (Rporena momento - nace of meation matter macro). Batt, Rem Fjamonkanne (no RANDE-20 veromesse - in allo mess mogen extra momental mently enter), ms manharma bowsers gos sugy, w 16265 M-6 whousenry Les gos memoral mage. Morrowe Kapas Barenozonne: Henpergommag TpydHoo - resuscicarphos baturemocump fabricos Mpsempomemba brendomorecens moders

Содержание

- Современные изменения климата.
- Следствие изменений климата: цивилизации, ресурсы, экономика, экология и здоровье.
- Методы прогноза климата. Математические модели.
- Ошибки моделирования. Вероятностный смысл решений. Уравнения Лиувилля и Фоккера Планка.

Ансамбли. Метрики. Верификация.

- Прогнозирование на периоды от сезона до нескольких лет.
- Прогноз на 21 век. Сценарии IPCC. Климатический «даунскейлинг». Прогноз для Западной Сибири.

Ансамбли

Ансамблевое предсказание – параллельный прогноз, использующий различные заранее выбранные возможности состояния плохо известных данных или методов параметризаций. Пространство неопределенностей моделирования порождает пространство неопределенностей прогноза.

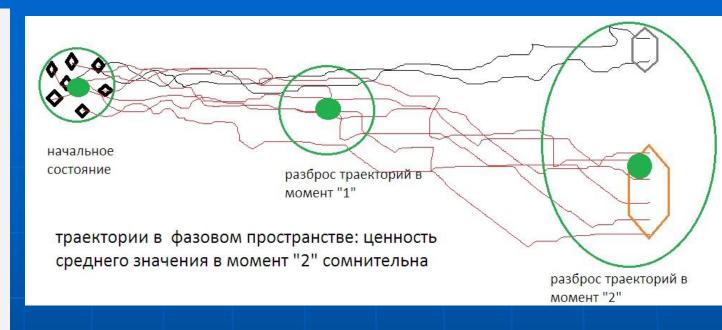
Среднее по ансамблю прогнозов отличается от прогноза от среднего по ансамблю $\frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n} f(x_i) \neq f\left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^{n} x_i\right)$ начальных состояний. Свойство нелинейных функций (атмосферная модель!).

$$\frac{1}{n}\sum_{i=1}^n f(x_i) \neq f\left(\frac{1}{n}\sum_{i=1}^n x_i\right)$$

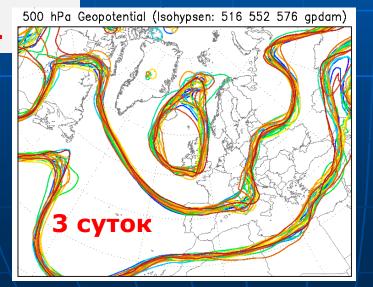
Требование параллельных расчетов ансамблей → затраты компьютерного времени -> необходимость компромисса. Загрубение горизонтальной сетки в два раза \rightarrow расчет быстрее в 8 раз \rightarrow возможность 8 ансамблей. В 4 раза → 64 ансамбля.

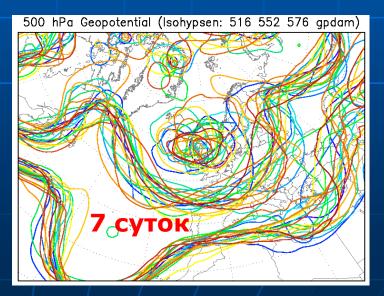
Ансамбли: а) возмущение начальных условий или спецификаций модели (фильтр Кальмана, бриддинг, сингулярные векторы, ; б) мульти-модельный ансамбль (простое согласование выходного поля для сравнения); в) а+б=суперансамбль

Среднее по ансамблю надежно до точки бифуркации или до момента критического возрастания разброса.



Спагетти.





Разные заблаговременности прогноза

Интерпретация ансамблевых прогнозов. Метрики.

Смещение (bias), среднее квадратическое отклонение (RMSE), средняя абсолютная ошибка (MAE).

Диаграмма Тейлора.

Надежность (Reliability diagram): оценка прогнозов дихотомических событий - тех, которые либо происходят или не происходят в точке сетки. Событие Е случалось за период прогноза с повторяемостью Ро – по данным наблюдений и Pf – по модели. При совершенном прогнозе Pf = Po. (also called an attributes diagram or calibration function).

The ROC diagram.

Оценка Брайера

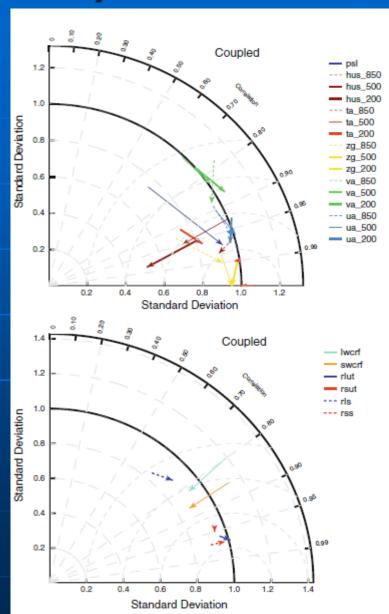
Диаграмма Тейлора

Taylor diagrams summarizing the comparison of the CNRM-CM5.1 model over the period 1970–1999, the **arrows** indicate the evolution of the fields shown from CNRM-CM3 to CNRM-CM5.1. The correlation is the spatial correlation between annual mean fields and the variance is calculated as the spatial

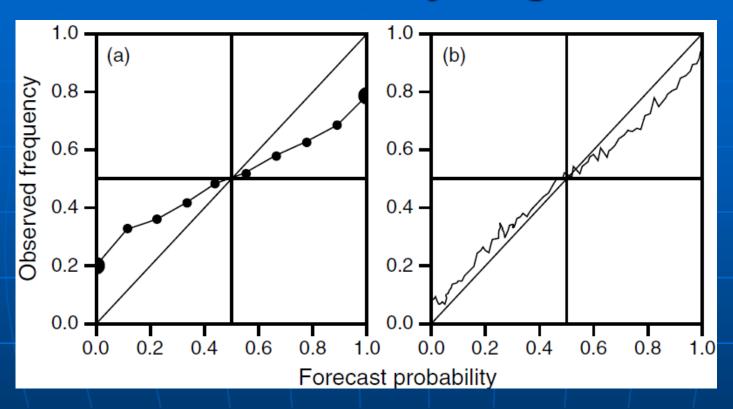
variance of the annual mean field.

On the **top**, prognostic variables are shown compared globally to the ERA40 reanalysis over the period 1970–1999.

At the **bottom**, the surface net longwave (rls) and shortwave (rss) fluxes



Reliability diagram



Прогноз положительной аномалии 2-м температуры для Февраля в тропиках

- а) Ансамбль по одной модели, создаваемый возмущениями начальных условий в атмосфере и океане;
- b) суперансамбль несколько такого рода прогнозов (более надежные результаты по диаграмме (!))

Верификация: глобальный взгляд

$$e_{vm}^2 = \sum_{n} w_n (\bar{s}_{vmn} - \bar{o}_{vn})^2 / \sigma_{vn}^2$$

$$I_{vm}^2 = e_{vm}^2 / \overline{e_{vm}^2}^m$$

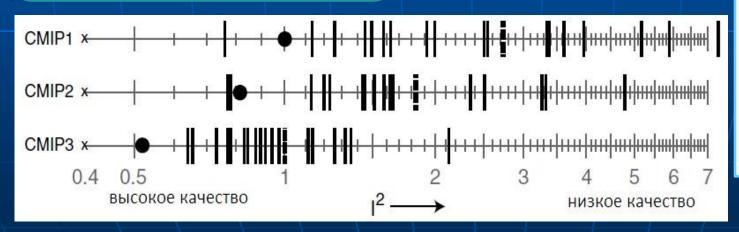
Нормированные на среднюю по всем моделям - чтобы сделать сравниваемыми разные величины

Гриддированные среднегодовые данные. Для каждой переменной ν , модели m, точки пространства *п* разность модельной и реальной климатологии, взвешенная на объем (площадь или массу), деленная на дисперсию по данным наблюдений.

$$I_m^2 = \overline{I_{vm}^2}$$
 показатель ка /среднее по всем

показатель качества

переменным/



Ансамбль прогнозов более полезен, чем индивидуальный прогноз.

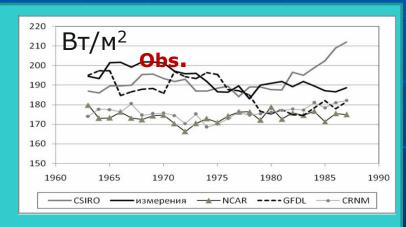
Дисперсия ансамбля характеристика неопределенности среднего значения

Для реанализа NCEP-NCAR индекс равен 0.4. Черные круги мультимодельный ансамбль. Вертикальные штрихи – отдельные модели.

Верификация: региональный взгляд

1) Данные моделей гораздо надежнее на больших равнинах (Восточно-Европейская, Западная Сибирь); 2) хорошо верифицированы только температура (Т) у поверхности и осадки (Р)(месячные значения); 3) другие величины следует пересчитывать через Т и Р (?!)

models	errors		tim-var.		PCs Temp.		PCs Precip.			
*	ΔT, °C	ΔP, %	σT, °C	σP, %	T ₁	T ₂	T ₃	P ₁	P ₂	P ₃
bccr_bcm2	1.7	-2	2.1	17	0.19	0.07	0.06	0.33	0.22	0.13
cccma_cgcm3	-0.6	18	1.9	36	0.32	0.08	0.04	0.18	0.09	0.04
cnrm_cm3	-0.2	32	1.5	19	0.25	0.06	0.05	0.12	0.06	0.05
csiro_mk3	-2.9	30	1.0	18	0.19	0.06	0.05	0.14	0.06	0.05
echam5	-1.5	31	1.5	21	0.22	0.07	0.05	0.16	0.06	0.04
gfdl_cm2_0	-4.2	8	1.6	20	0.24	0.07	0.05	0.32	0.20	0.12
gfdl_cm2_1	-1.6	1	1.7	25	0.25	0.06	0.06	0.29	0.24	0.11
giss	3.1	68	1.7	133	0.33	0.09	0.05	0.25	0.09	0.05
inm	-4.3	47	1.2	28	0.30	0.08	0.05	0.15	0.06	0.05
miroc3_2medr	0.0	3	1.3	19	0.24	0.07	0.06	0.19	0.07	0.05
miub_echo	1.7	-56	1.1	28	0.20	0.10	0.06	0.27	0.10	0.06
ipsl_cm4	1.6	8	1.2	30	0.20	0.09	0.05	0.13	0.05	0.04
mri_cgcm2	-3.3	40	1.5	19	0.15	0.08	0.06	0.15	0.06	0.05
ncar_ccm4	-1.5	24	0.8	28	0.23	0.08	0.04	0.14	0.06	0.04
ncar_pcm1	0.1	61	0.8	29	0.21	0.08	0.05	0.20	0.06	0.04
ensemble	-θ.8	21	1.4	31	0.23	0.08	0.05	$\theta.2\theta$	0.10	0.06
climate	><	\geq	1.5	30	0.20	0.07	0.06	0.18	0.08	0.06



Значения суммарной солнечной радиации (осредненные по 5 годам)по данным метеорологической обсерватории МГУ и некоторым моделям СМІРЗ

Вклад ЕОФ

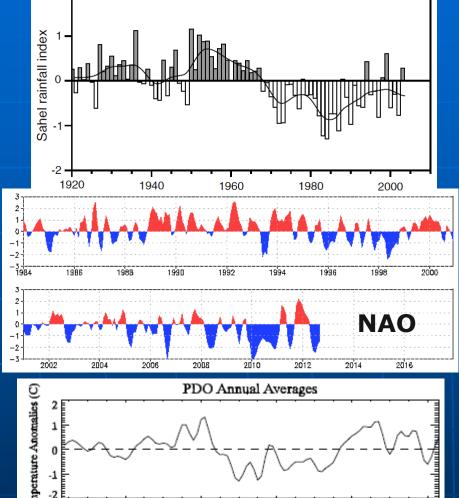
Содержание

- Современные изменения климата.
- Следствие изменений климата: цивилизации, ресурсы, экономика, экология и здоровье.
- Методы прогноза климата. Математические модели.
- Ошибки моделирования. Вероятностный смысл решений. Уравнения Лиувилля и Фоккера – Планка.
- Ансамбли. Метрики. Верификация.

Прогнозирование на периоды от сезона до нескольких лет.

■ Прогноз на 21 век. Сценарии IPCC. Климатический «даунскейлинг». Прогноз для Западной Сибири.

Межгодовые аномалии: ENSO, Sahel, NAO, PDO



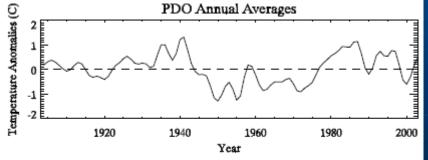
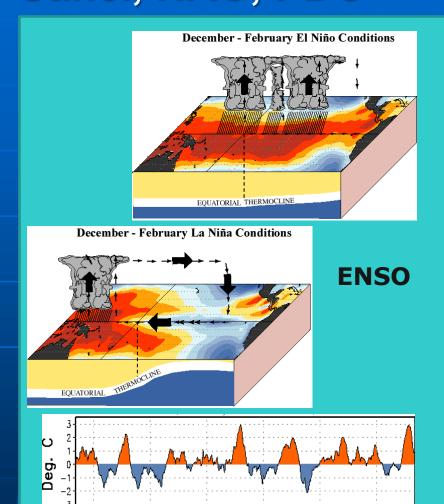


Figure 1.2: PDO index, smoothed with a 5-point binomial process. The in annual mean Pacific SSTA poleward of 20N from 1903-2003. (http://jisao.washington.edu/pdo/PDO.latest)



http://www.cpc.ncep.noaa.gov/data/teledoc/pna.shtml

1980

1985

1990

1995

1970

1975

Задачи и методы: сезонные и межгодовые флуктуации климата

ENSO, PDO, NAO.

Чтобы осуществить прогноз, начальные условия должны правильно отразить состояние системы. В первую очередь – состояние глубокого океана (а также влажность почвы и снежный покров).

Как отделить внутреннюю изменчивость от антропогенно обусловленной? Кажется, не зависят друг от друга (?) Разные временные масштабы.

Чтобы прогнозировать внутреннюю изменчивость:

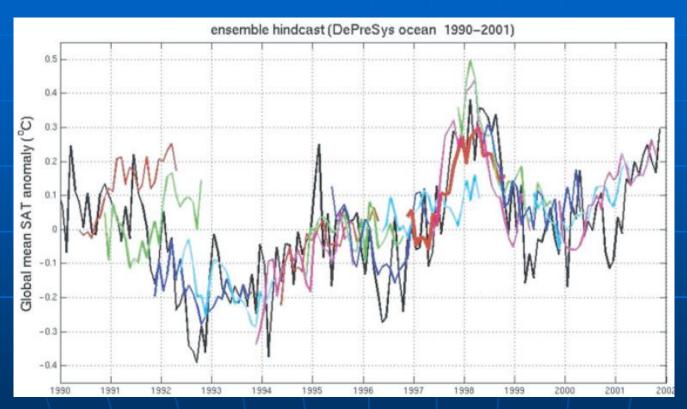
- •Модель с полной физикой
- •Инициализация медленных компонентов полной климатической системы
- •Методология ансамблевого прогноза
- •Стратегия корректировки систематических ошибок (модельная аномалия добавляется к реальной климатологии)

Decadal Prediction System (DePreSys) /UK Met Office/

Использовано три источника начальных данных (для hindcasting и валидации):

- •1) DePreSys базируется на усвоении аномалий в атмосфере и океане: 2-D давление, 3-D T, U, V, 3-D океанская T, S. Сезонные вариации удаляются путем вычитания реальной (наблюдаемой) климатологии. Затем аномалии добавляются к модельной климатологии. Шаг 6 часов для полей в океане и 3 часа для атмосферы.
- •2) Модельно независимый 'EN3 ocean' in situ ocean T, S гриддированный объем данных объективного анализа 3) реанализ основанный на модели океана ORCA1 (NEMO) которая усваивала те же самые данные, что поступали в EN3 ocean Атмосферные данные представлены ERA40 reanalysis. Выполнен hindcasting за 12 дет 1990 2001 считается, что за это время антропогенный сигнал не сильно изменялся и можно было надеяться уловить внутреннюю изменчивость. Начальное состояние 1500 летний модельный климат (до 1860 г.). Далее эксперименты с задаваемым форсингом, с использованием и не использованием усвоения данных

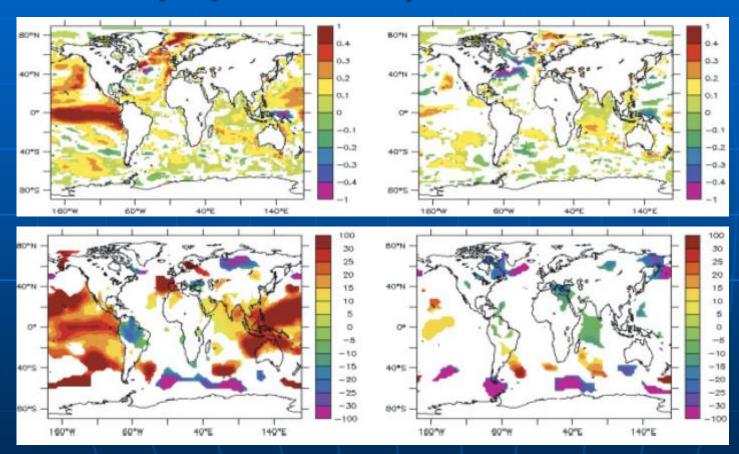
ASSIM-DePreSys ensemble hindcast anomalies



Большие различия в первые годы – не учитывается Пинатубо

The black line is the observed SAT anomaly relative to climatology over the period 1990–2001. Coloured lines are ASSIM–DePreSys ensemble hindcast anomalies from the four-member ensemble mean.

std разностей «без усвоения» и «с усвоением» в первый и второй год интегрирования (соленость и давление)



Усвоение улучшает предсказуемость в первый год в глобальном масштабе, а в ряде регионов – и во втором году Q. J. R. Meteorol. Soc. 138: 81-90 (2012)

Содержание

- Современные изменения климата.
- Следствие изменений климата: цивилизации, ресурсы, экономика, экология и здоровье.
- Методы прогноза климата. Математические модели.
- Ошибки моделирования. Вероятностный смысл решений. Уравнения Лиувилля и Фоккера – Планка.
- Ансамбли. Метрики. Верификация.
- Прогнозирование на периоды от сезона до нескольких лет.
- Прогноз на 21 век. Сценарии IPCC. Климатический «даунскейлинг». Прогноз для Западной Сибири.

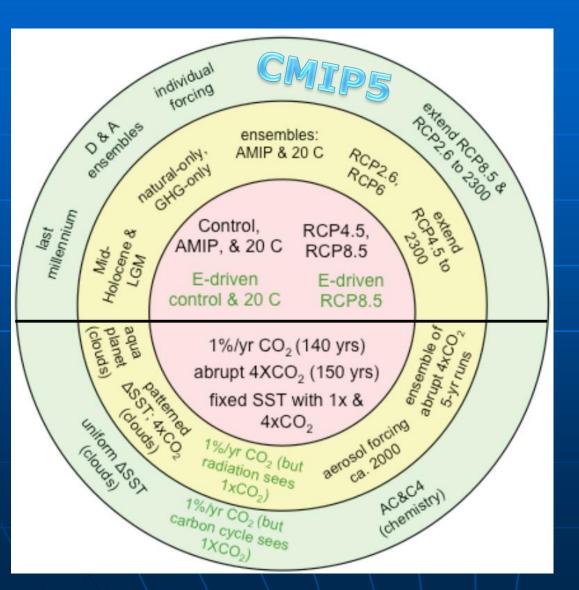
Project

CMIP5

Coupled Model Intercomparison Project		
ВССR-ВСМ2.0, (Китай)	Климатические модели	
CCSM3, NCAR (США)		
CGCM3.1(T47), (Канада)		GISS-E2-H, GISS-E2-R
CNRM-CM3, (Франция)	BCC-CSM1.1	· · · · · · · · · · · · · · · · · · ·
CSIRO-Mk3.0, (Австралия)	CCSM4	HadCM3, HadGEM2-A, HadGEM2-CC,
ECHAM5/MPI-OM,	CFSv2	HadGEM2-ES
(Германия)	CNRM-CM5	INM-CM4
ECHO-G (MIUB),	CSIRO-Mk3.6	IPSL-CM5A-LR, IPSL-
(Германия/Корея)	CanAM4, CanCM4	CM5A-MR
GFDL-CM2.0, (CIIIA)	CanESM2	MIROC4h, MIROC5
GFDL-CM2.1, (CШA)	GEOS-5	MIROC-ESM, MIROC-
GISS-ER, (CIIIA)	GFDL-CM3, GFDL-	ESM-CHEM
IPSL-CM4, (Франция)	ESM2G	MPI-ESM-LR, MPI-ESM-P
MIROC3.2(medres), (Япония)	GFDL-ESM2M,	MRI-AGCM3.2H, MRI-
MRI-CGCM2.3.2, (Япония)	GFDL-HIRAM-C180	AGCM3.2S
РСМ, (США)	GFDL-HIRAM-C360	MRI-CGCM3
Telli, (emi) CMIP3	CMIDE	NorESM1-M

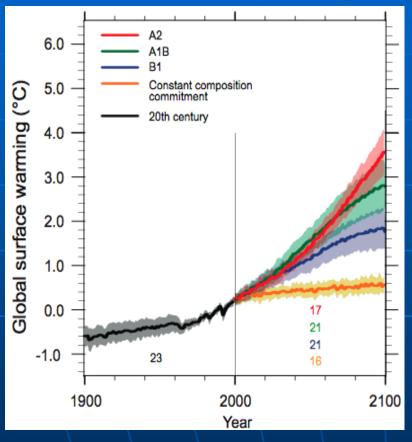
INM, (Россия)

Прогноз климата: СМІР5

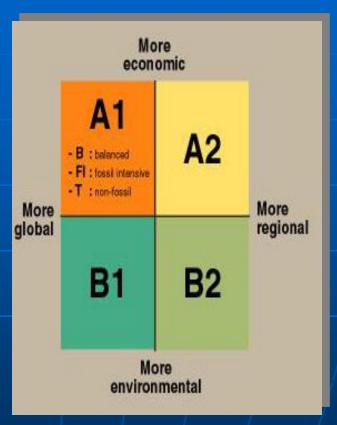


CMIP5 (Coupled Model Intercomparison Project)

Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC). CMIP3.



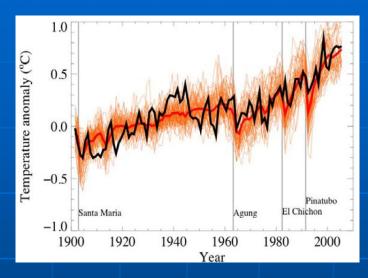
Сценарии ІРСС

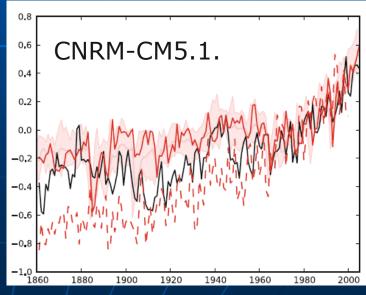


IPCC - нобелевские лауреаты 2007г.

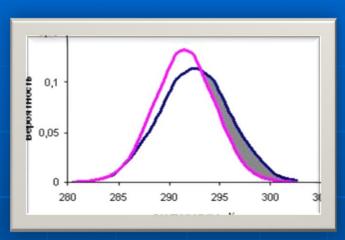
Сценарии воздействия парниковых газов и аэрозолей Сперва надо создать контрольный модельный

климат, используя постоянное современное (доиндустриальное) радиационное воздействие. Эти эксперименты требуют сотни – тысячи лет приспособления глубокого океана к равновесию. Затем делается прогноз, стартующий от выбираемого момента контрольного эксперимента, используя сценарий изменений газов и аэрозолей. При этом результат зависит от фазы и амплитуды внутренних аномалий существовавших в момент старта. Для другого времени будет другая картина связанная с внутренней изменчивостью. Поэтому, стартуя от разных точек (ансамбль) и усредняя результаты, можно удалить некоторые эффекты внутренних вариаций. Аналогичная фильтрация может быть осуществлена путем использования ансамбля моделей (IPCC). Поэтому, в каждом индивидуальном случае декадные вариации гораздо больше, чем в осредненной кривой.

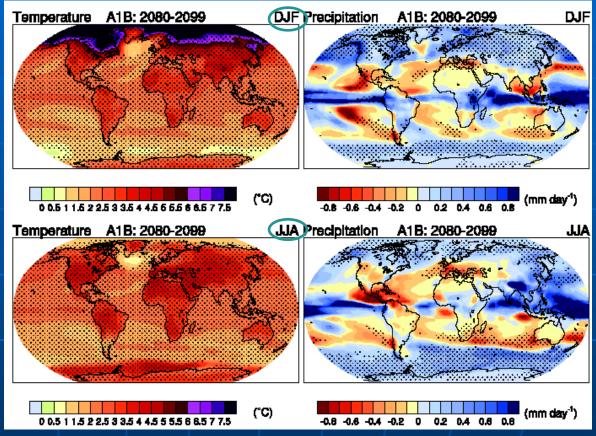




Климат 21 века



Распределение повторяемости средних июльских температур для центральной части и парковой зоны Москвы в середине 21 века



Аномалии температуры (0 C) и осадков (мм/сут) в конце XXI века. Заштрихованы области, где аномалия (Δ) превышает межмодельное стандартное отклонение (σ), т.е. $\Delta/\sigma > 1$.

Иерархическая структура технологии климатического прогноза

Прогноз климата 21 века

Прогноз термического режима, увлажнения, ветра

речной сток, снежный покров, объем половодий Состояние вечной мерзлоты

Зоны растительности

Экологические показатели

Водные ресурсы

Гидроэнергетические

еские несущие конструкции Ветроэнергетические

ресурсы Ветроэнергетические ресурсы Биопродуктивность лесов

Заболеваемость малярией

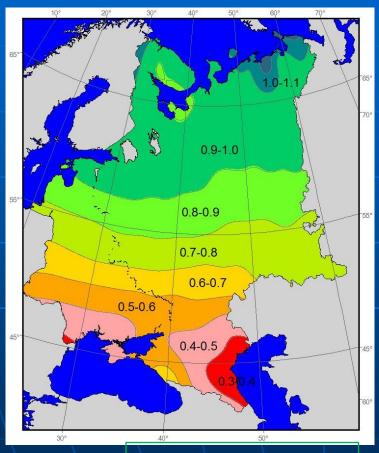
воздействия на жилищно-коммунальное хозяйство, на транспорт и др.

адаптационне мероприятия для c/x, жкx, водных ресурсов, в области медико-санитарных мероприятий, и др.

Строительные

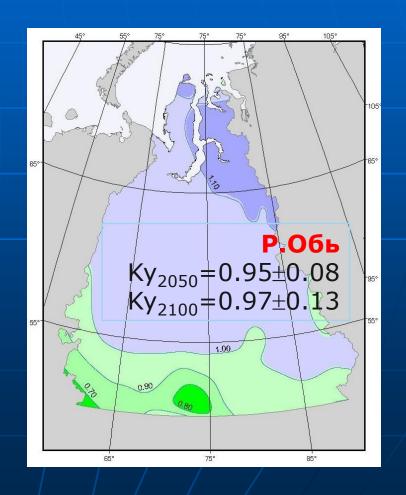
нормы:

Относительные изменения объема речного стока на середину 21 века



Р. Волга

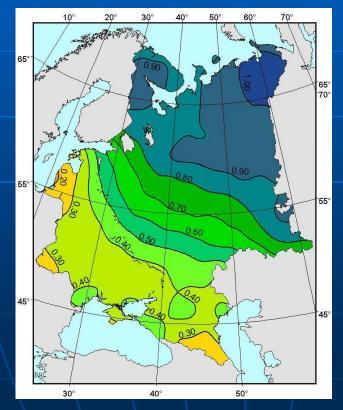
 $Ky_{2050} = 0.90 \pm 0.10$ $Ky_{2100} = 0.90 \pm 0.18$

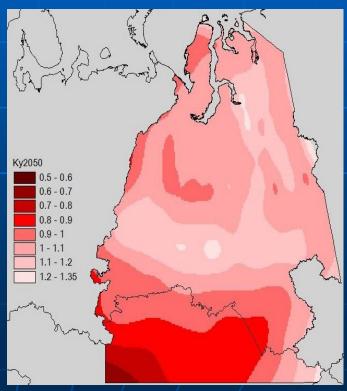


Относительные изменение объема стока половодья (по отношению к современному) на середину 21 века

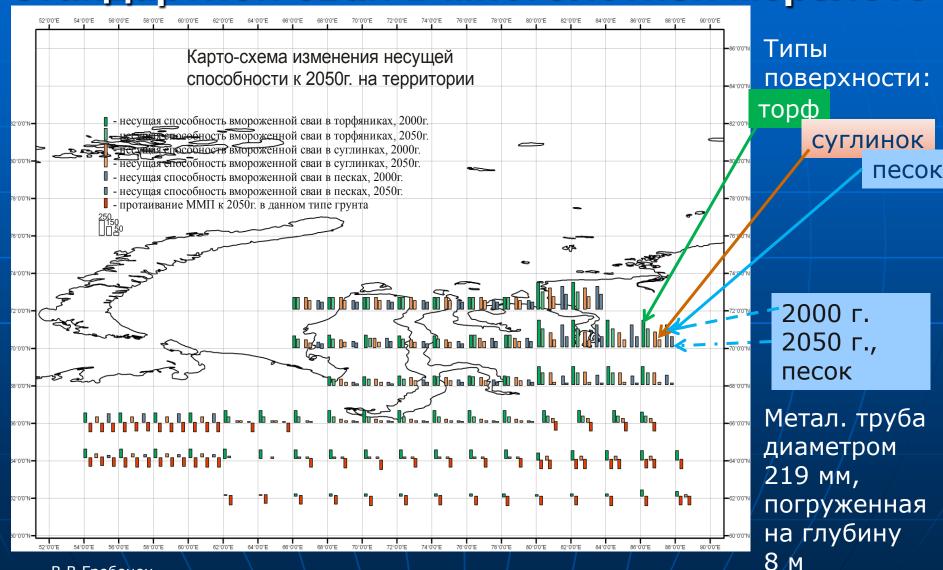
$$Y = f(S_1 + x)$$

S₁ - водный эквивалент снежного покрова,
 x - осадки



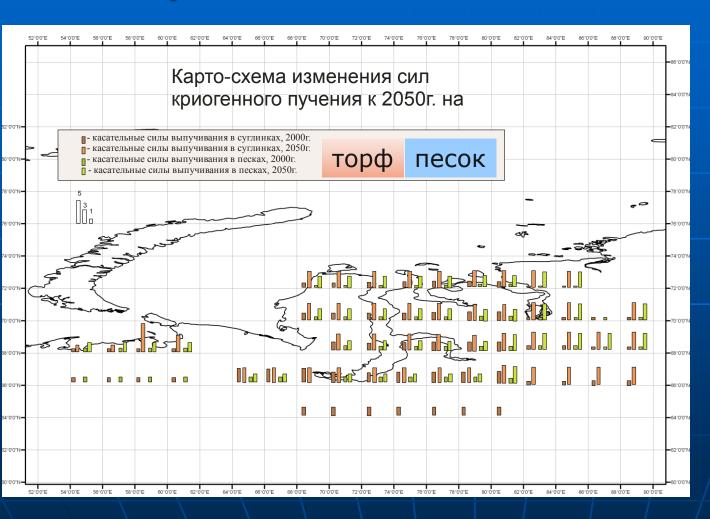


Изменение несущей способности стандартной сваи в многолетней мерзлоте



В.В.Гребенец

Возрастание сил криогенного пучения стандартной сваи в многолетней мерзлоте



Из-за углубления слоя сезонного летнего оттаивания (при потеплении климата) при осеннем замерзании грунта **увеличивается** момент сил криогенного пучения

Спасибо за внимание!

А.В.Кислов

MГУ, географический факультет, кафедра метеорологии и климатологии avkislov@mail.ru