Всякое новое начинается как ересь –
и кончается как ортодоксия.

К. Лоренц

Модели будущей погоды

Динамика биосферы, динамические системы и балансовые соотношения

Федотов А. М.

Глобальное изменение климата?

“. . . народившиеся, совершив естественный свой круг, дадут Земле приращение, умирая и разлагаясь; и если бы ты дал пройти десяти годам и измерил прирост земли, ты мог бы увидеть, насколько вообще прибыла Земля, и увидел бы, умножая, насколько выросла за тысячу лет Земля мира.”

Леонардо да Винчи

Глобальное изменение климата?

В настоящее время многие говорят о негативных тенденциях в развитии самой крупной экосистемы Земли – биосферы.
Но ответить на вопрос, что же является тому причиной (глобальные тренды или антропогенные воздействия), никто однозначно ответить не может.

Наблюдаемые в последние десятилетия изменения в биосфере вызывают «обоснованное» беспокойство мирового сообщества.

Одним из ключевых параметров состояния биосферы считается содержание ***углерода*** (в том числе и углекислого газа) в атмосфере.

Глобальное изменение климата?

Открытым является и вопрос о показателе оценки состояния биосферы.

Большое число исследователей и политиков считают причиной этого явления возрастающие темпы сжигания ископаемых топлив.

Как следствие, широкое распространение получила гипотеза о существовании «парникового эффекта» и «глобального потепления», которая объясняется наличием связи между температурой атмосферы и содержанием в ней «парниковых» газов (диоксид углерода, метан, пары воды, окислы азоты, фреоны и др.) из-за различия в проводимости этими газами коротковолнового и длинноволнового излучения.

При этом считается, что среди парниковых газов диоксид углерода оказывает наиболее существенное «влияние» на климат.

Глобальное изменение климата?

Экстраполяция наблюдаемых трендов глобальных параметров в будущее указывает на возможность существенных изменений параметров биосферы и климата Земли, способных привести к тяжелейшим экологическим, экономическим, социальным, демографическим последствиям.

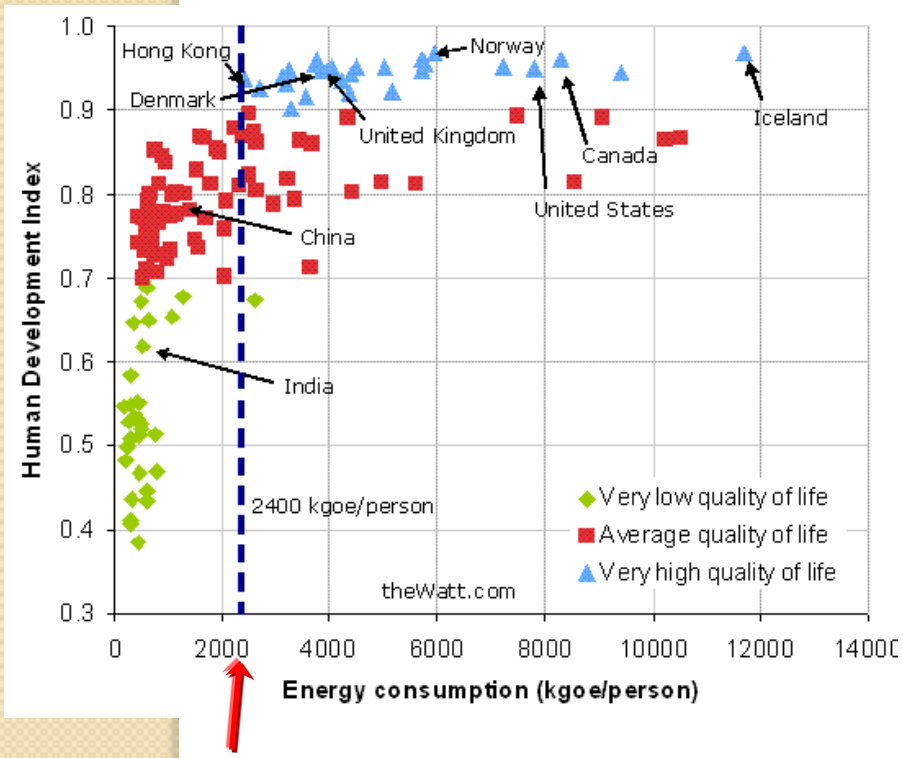
«В тех случаях, когда существует угроза серьёзного или необратимого ущерба, отсутствие полной научной уверенности не используется в качестве причины для отсрочки принятия экономически эффективных мер по предупреждению ухудшения состояния окружающей среды» (Доклад конференции ООН по окружающей среде и развитию. Рио-де-Жанейро, 1992).

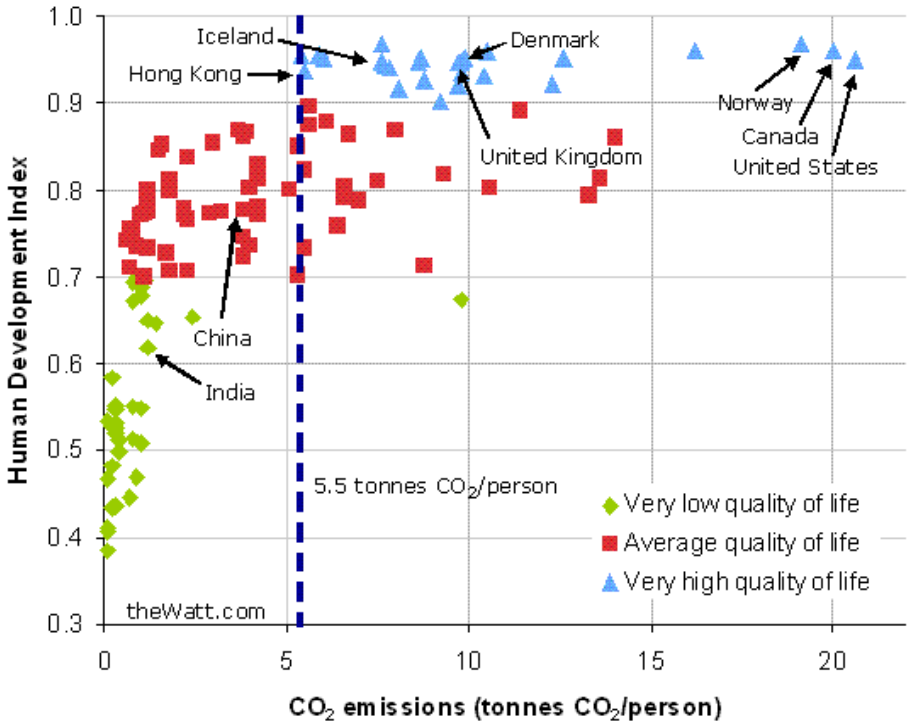
Глобальное изменение климата?

Как следствие, широкое распространение получила гипотеза о существовании «парникового эффекта», который объясняется наличием связи между температурой атмосферы и содержанием в ней «парниковых» газов.

Правда не понятно является ли связь прямой или обратной.

ПОТРЕБЛЕНИЕ ЭНЕРГИИ И ЭМИССИЯ CO_2 НА ДУШУ НАСЕЛЕНИЯ ДЛЯ РАЗЛИЧНЫХ СТРАН В 2010 ГОДУ (ПО ДАННЫМ ООН)



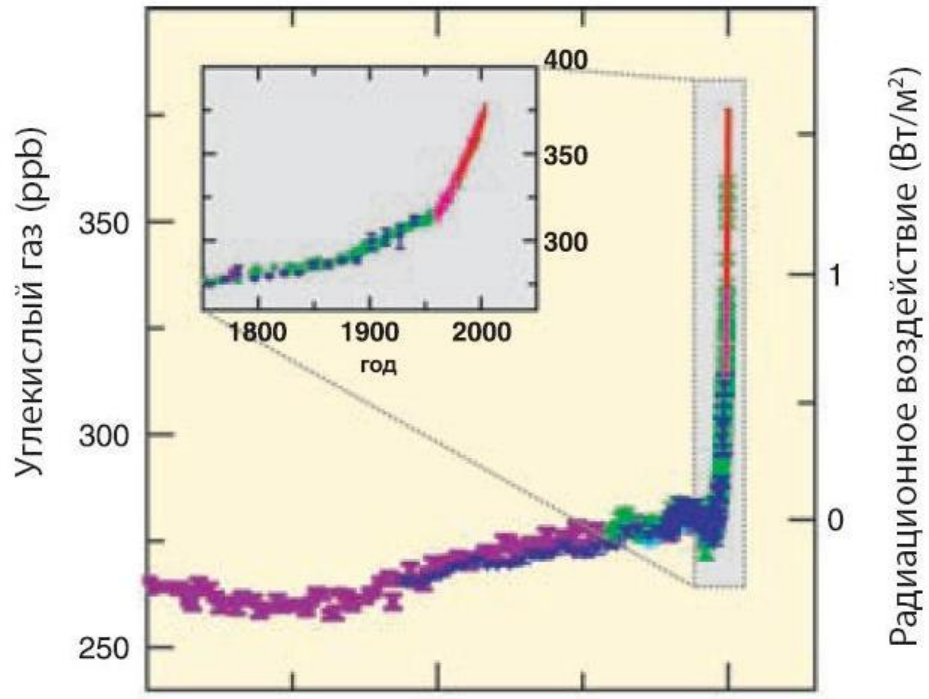


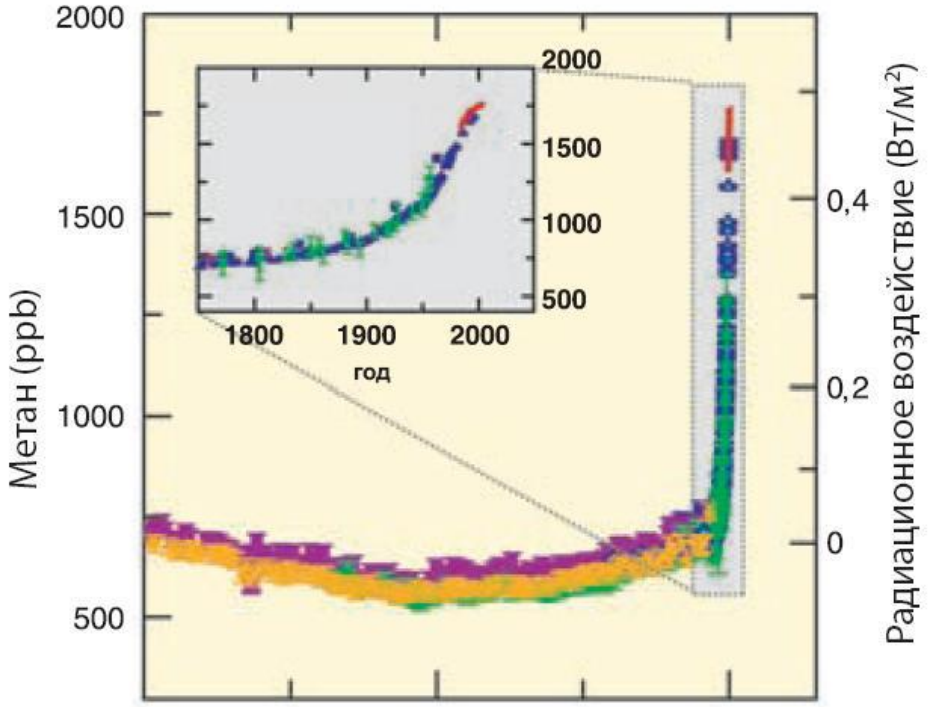
~4000 кВт*час электроэнергии

Парадокс Джевонса

4000 кВт*час электроэнергии может быть получено при к.п.д. 30% от сжигания около 1'000 литров нефти. По данным Института мировых ресурсов (http://www.wri.org/) около 80% потребляемой энергии производится от сжигания ископаемых топлив. Тем самым можно оценить годичную эмиссию CO2 на душу населения, связанную с обеспечением достойного качества жизни как ~900 кг углерода в год. Для сравнения среднемировая эмиссия углерода составляет ~1.8 тонн на душу населения, а для развитых стран эта величина составляет ~6 тонн на человека. Васюганское болото выделяет метана около 2 тонн на душу населения в год.

Рассуждения МГЭИК



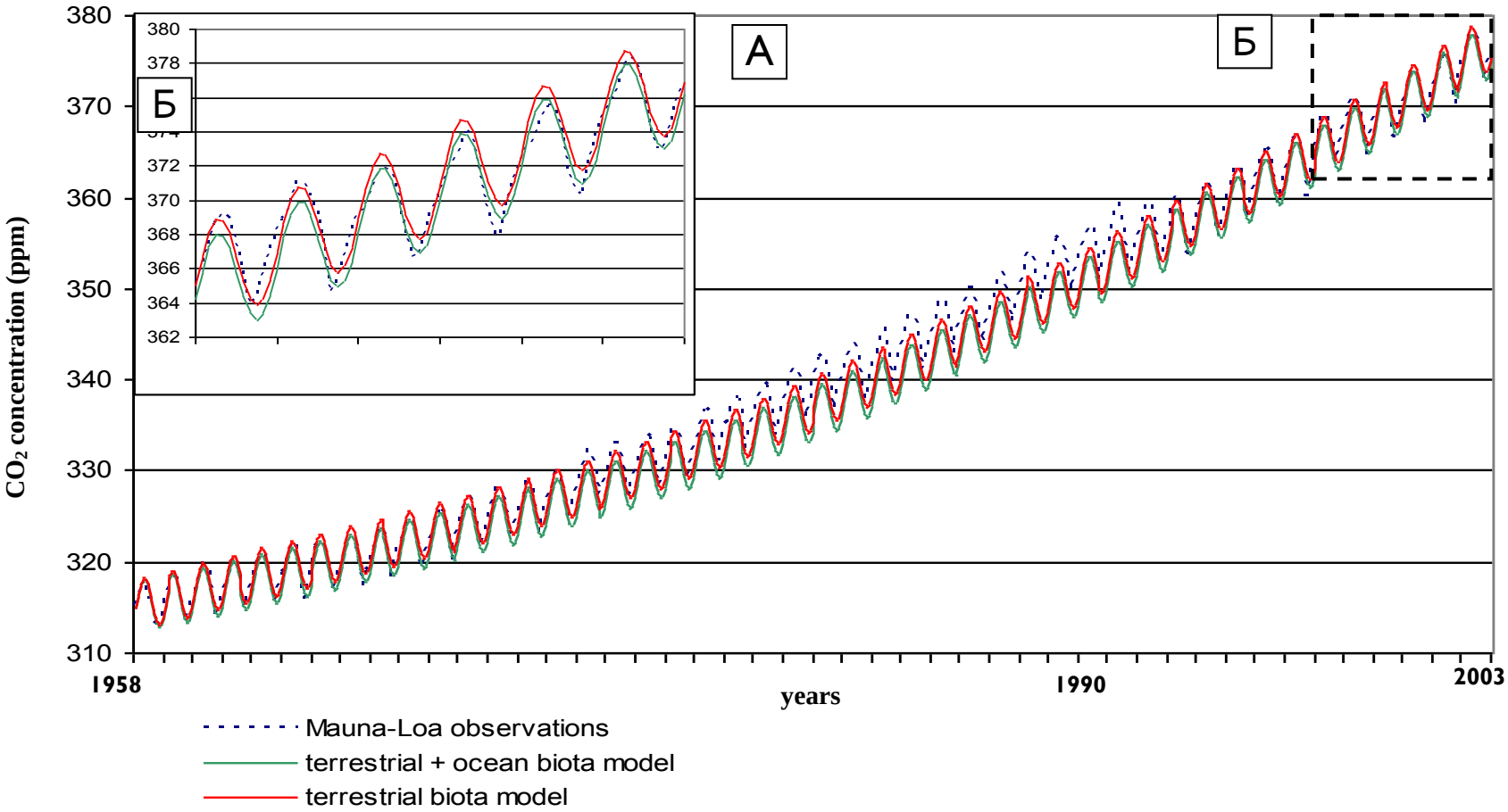


Наложение разнородных графиков в один

IPCC. *Climate Change: The Physical Science Basis. Summary for Policymakers.* Fourth Assessment report, Intergovernmental Panel on Climatic Change, Geneva, Switzerland. 2007 стр. 2

Рост концентрации CO_2 по данным гавайской станции

Рост концентрации CO_2 по данным гавайской станции



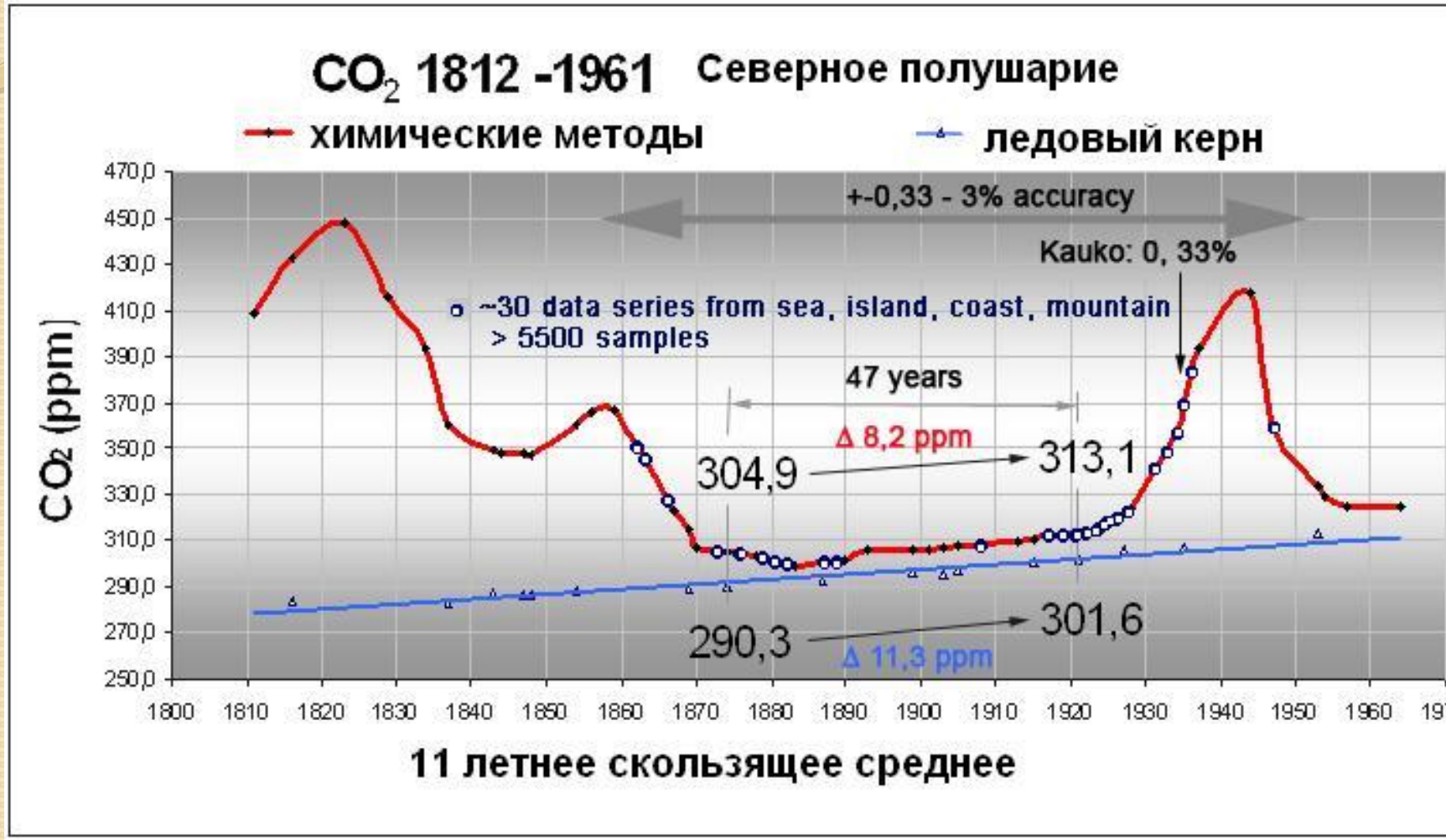
Динамика наблюдаемых и расчетных концентрации CO_2 в атмосфере с учетом вклада океанской биоты и без нее: А - на всем интервале наблюдений на Мауна-Лоа; Б - более детальный фрагмент, соответствующий диапазону спутниковых наблюдений.

Рост концентрации CO_2?

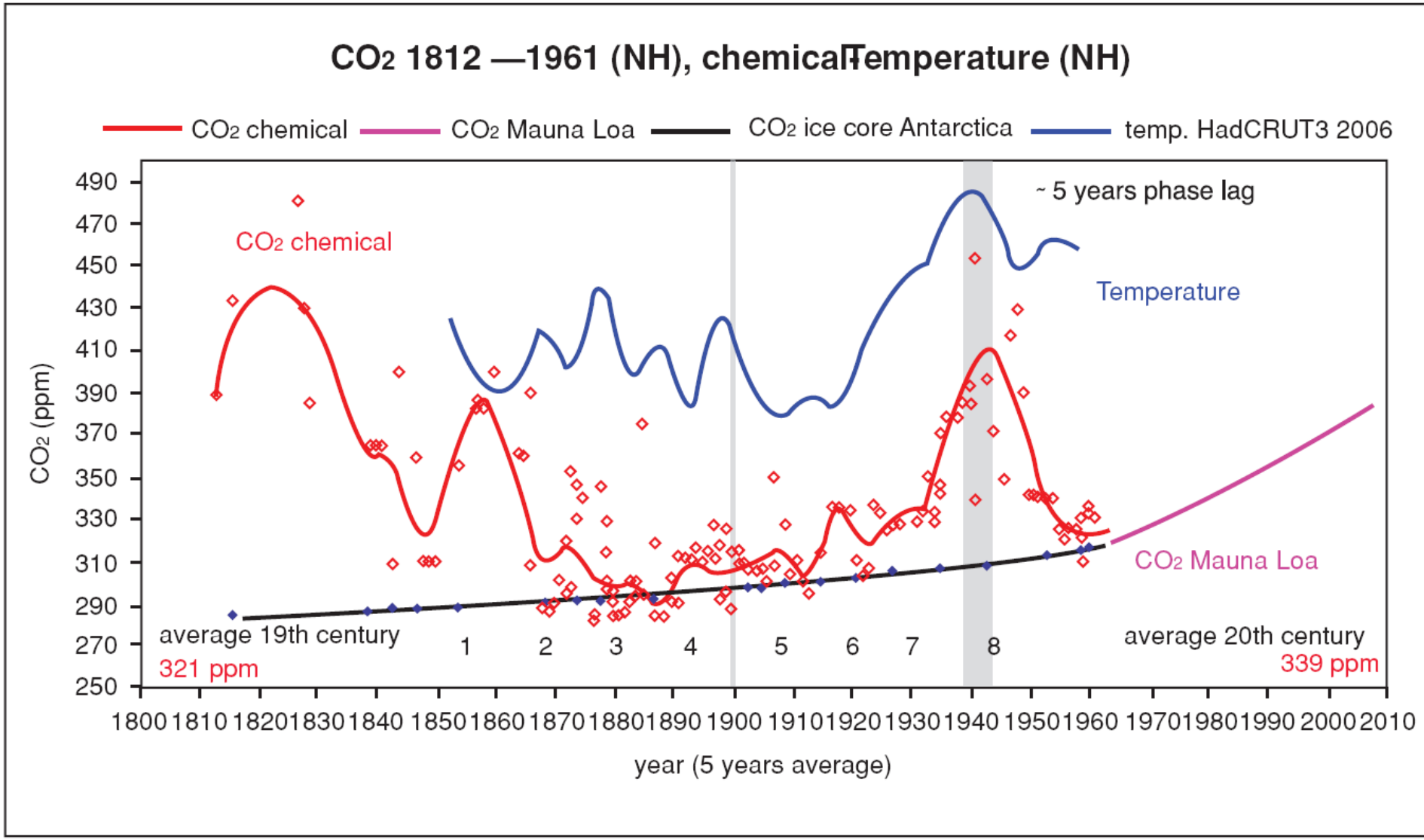
В 2007 году была опубликована статья немецкого ученого Эрнста Джорджа Бека, в которой он собрал архивные данные об измерениях CO_2 , начиная с XIX века.

Более чем 90 тысяч прямых измерений CO_2 в атмосфере, проводившихся в Америке, Азии и Европе с 1812 по 1961 г.г. отличными химическими методами (точность измерений более 3%)

Изменение концентрации CO_2 по данным Ernst-Georg Beck'a



Измерения химическими методами



Уровни CO_2 превосходили текущий 390 ppmv

Рост концентрации CO_2?

Данными для обсуждения описанного выше механизма глобального потепления стали данные международной группы ученых на российской станции «Восток» (780 ю.ш., 106 о в.д., средняя t = - 55оС), опубликованные в журнале «Nature» в 1999 году, под руководством А.П.Капицы.

Были извлечены ледовые керны до глубины 3310 метров, по расчетам содержащие вмороженные капсулы атмосферы возраста до 420 тыс. лет. Данные по температуре восстановлены на основе данных о количестве дейтерия льда («тяжелой воды»). Данные из более поздней экспедиции Epica, опуликованные в журнале Scieоколо 100 тыс. лет, коррелируют с данными со станции Восток и расширяют историю до 650 тыс. лет. и восстанавливают температурные колебания восьми ледниковых периодов.

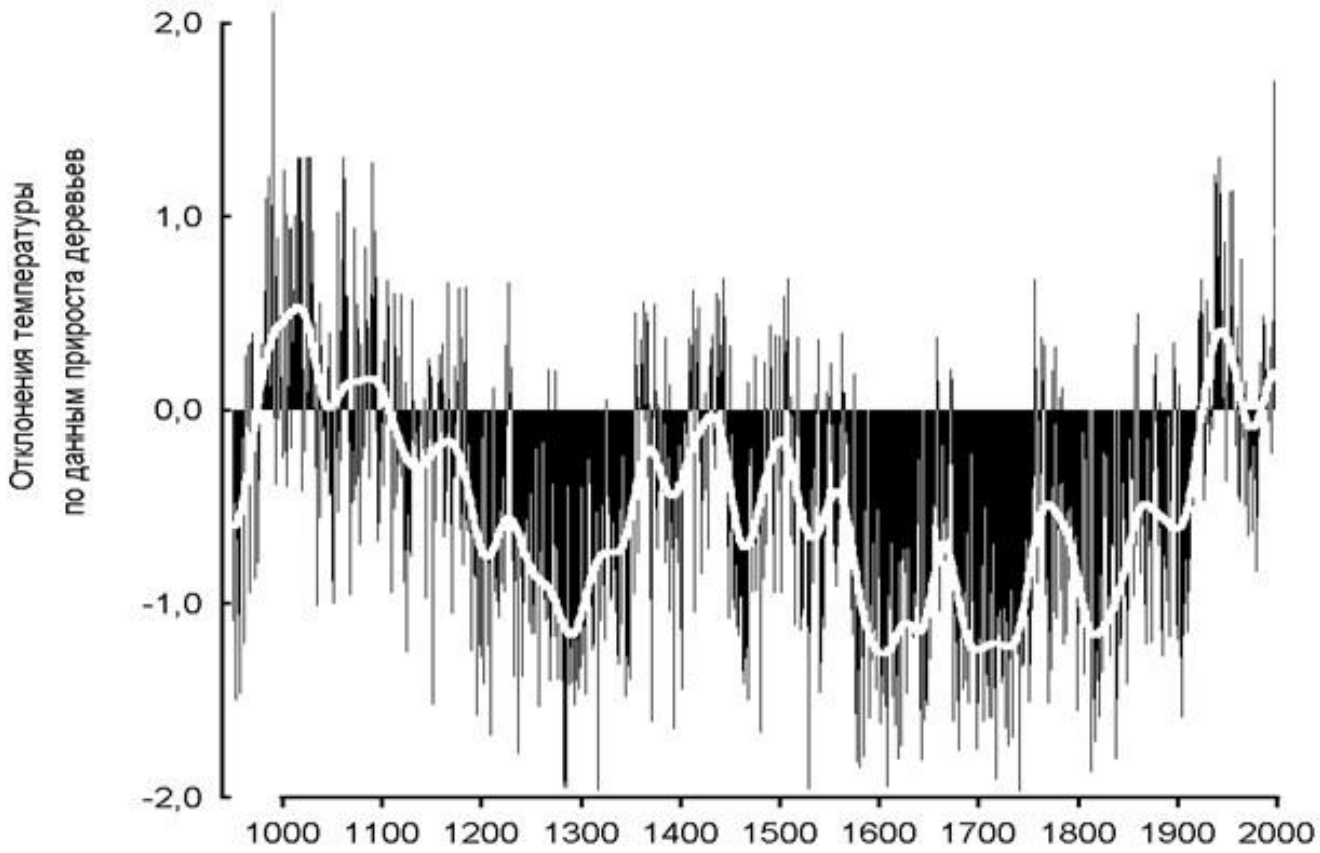
Данные ледовых кернов

Petit J. R., Jouzel J., Barkov N. I., Kotlyakov V. M. et al. Climate and atmospheric history of the past 420.000 years from the Vostok ice core, Antarctica // Nature. Vol. 399, 3 June 1999. P. 429-436.

Измерения косвенными методами

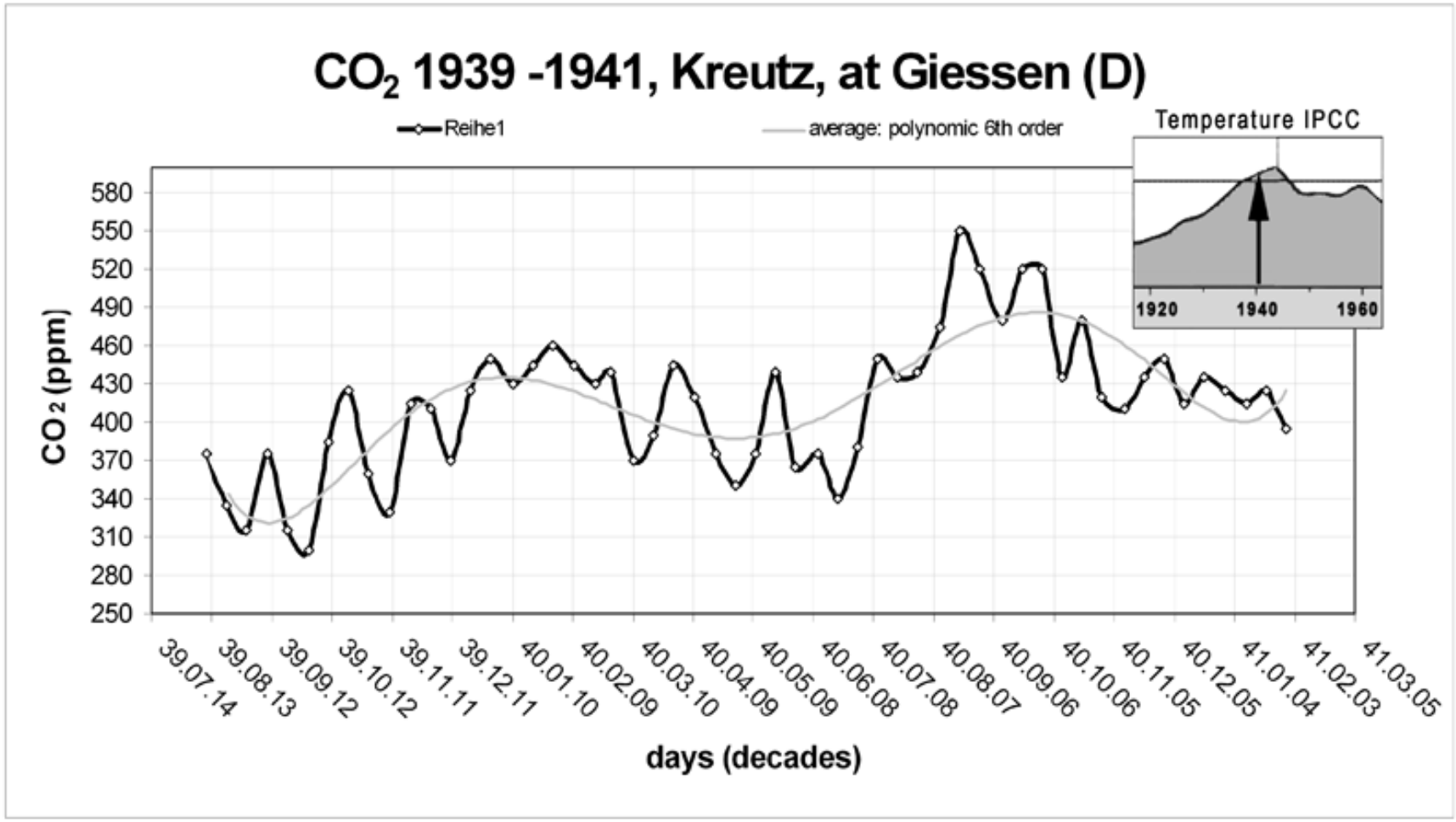
График реконструированной температуры для Субарктики Евразии по годовым кольцам деревьев, проведенный Вагановым Е.А, представленный на рис. , показывает наличие колебаний температуры на протяжении последнего тысячелетия, что никак не могло быть обусловлено деятельностью человека.

Измерения косвенными методами



Реконструкция температуры (в отклонениях от средней) для Субарктики Евразии . Толстой линией выделена кривая 51-летней НЧ фильтрации ряда.

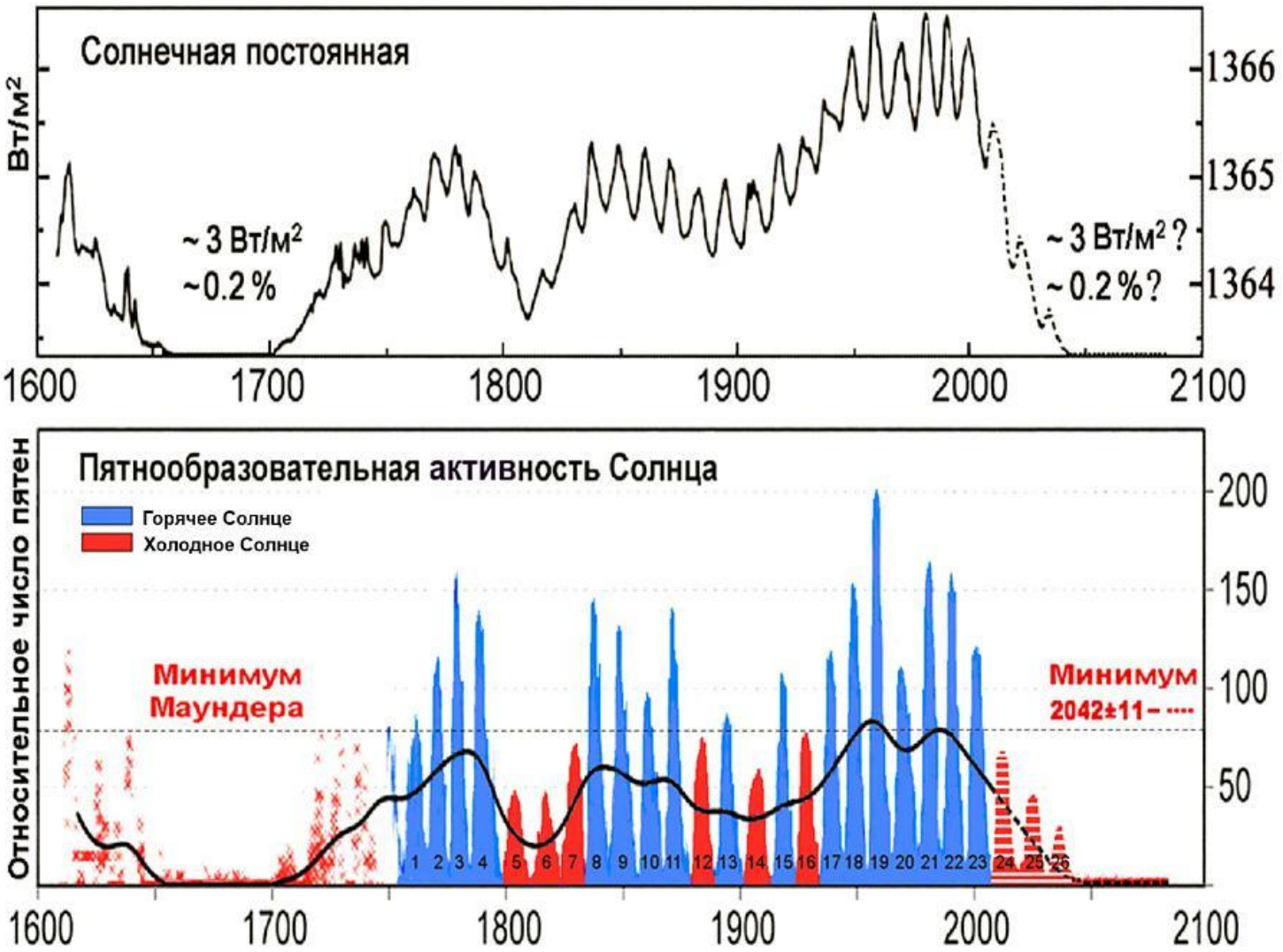
Месячные циклы концентрации CO_2



Уровни в 450 ppmv в 1940 году

Ernst-Georg Beck. *180 years of atmospheric CO_2 gas analysis by chemical methods.* ENERGY & ENVIRONMENT |VOLUME 18| No. 2 | 2007

Вариация солнечной постоянной



Минимум Маундера и рекордные значения солнечной постоянной во второй половине 20-го века

Балансовые соотношения

Начиная с работ А. Лотки (1925), В. Вольтеры (1931) и А.Н. Колмогорова (1932) широкое признание получила так называемая модель хищник—жертва, когда популяция одних организмов становится пищей для других.

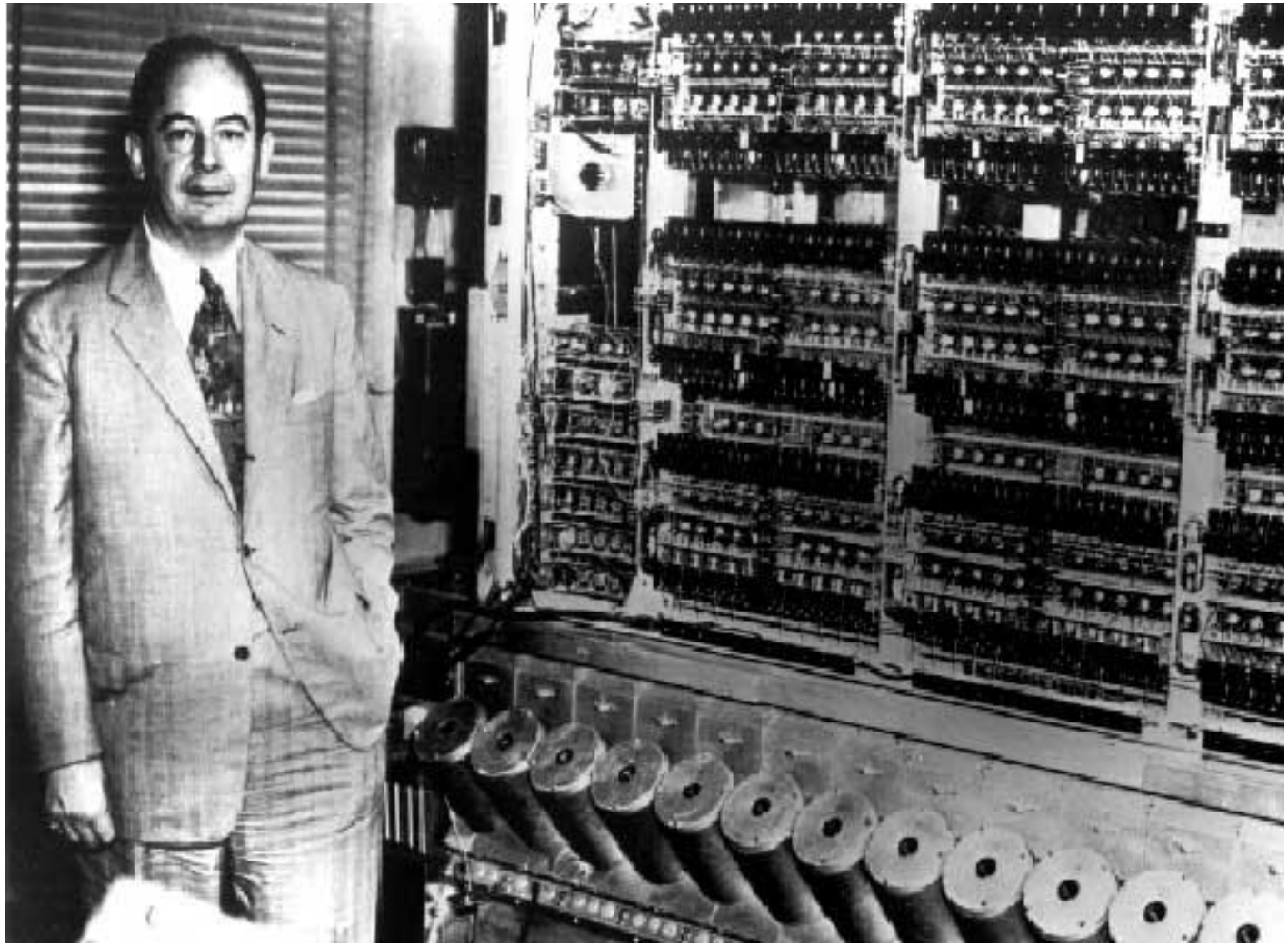
Джон фон Нейман

Явление самоорганизации в динамических системах, описывающих динамику на основе балансовых соотношений.

В теории самовоспроизводящихся автоматов, Нейман «предполагал построить непрерывную модель самовоспроизведения, основанную на нелинейных дифференциальных уравнениях в частных производных, описывающих диффузионные процессы».

Джон фон Нейман

Надежные схемы из ненадежных элементов



Клеточные автоматы

Так, Норберт Винер и Артуро Розенблют рассмотрели задачу о радиально-несимметричном распределении концентрации в сфере.

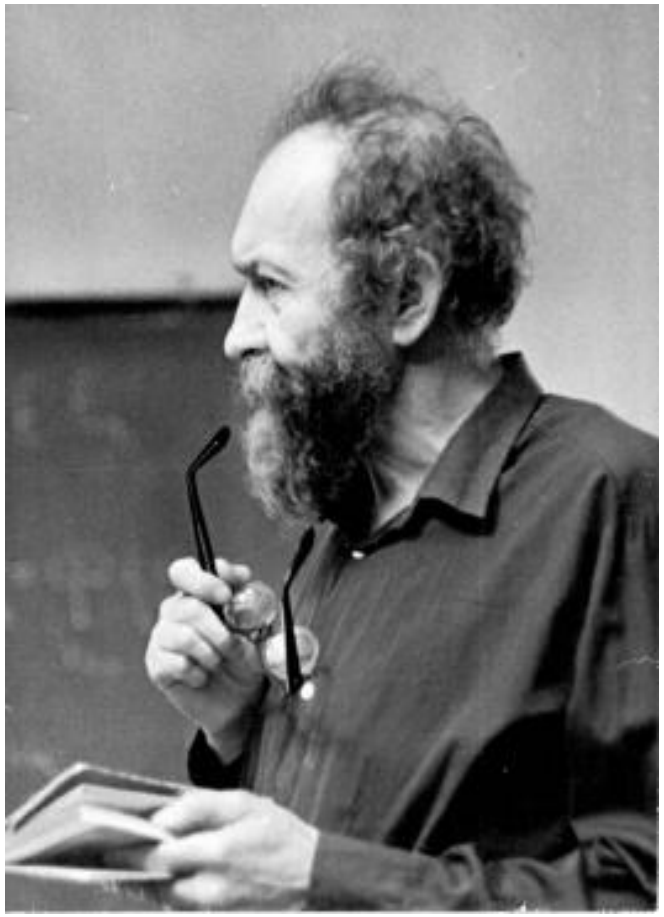
Алан Тьюринг

А. Тьюринг предложил одну из основных базовых моделей структурообразования и морфогенеза:
систему двух уравнений диффузии, дополненных членами, которые описывают реакции между «морфогенами».

Тьюринг показал, что в такой реакционно-диффузионной системе может существовать неоднородное (периодическое в пространстве и стационарное во времени) распределение концентраций.

Алексей Андреевич Ляпунов

Трофические уровни мирового океана – явление пятнистости.



Модели глобальной динамики

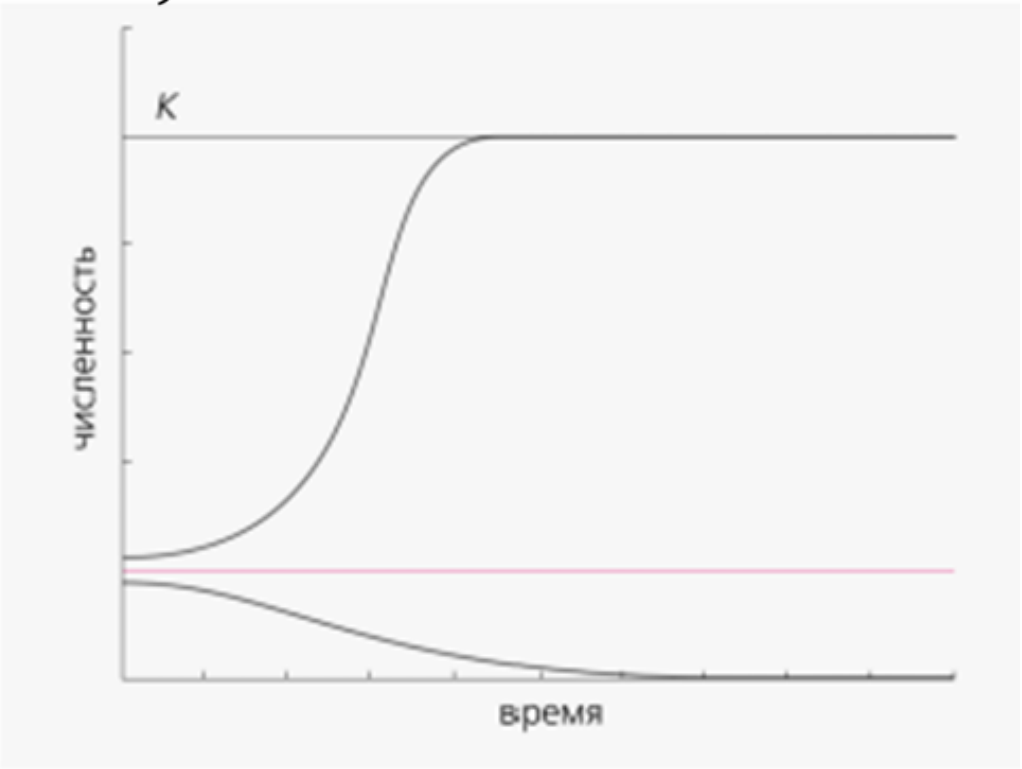
Jay W. Forrester

Н.Н.Моисеев

Динамика популяций

Интенсивное размножение, имеющее характер эпидемии, часто происходит, когда численность (или концентрация) превышает нее который порог b.

$$\frac{dN}{dt} = \alpha N(1 - {}^{N}/_{K})\,(N - b)$$



Точка деградации

Динамика популяций в пространстве

Для логистического уравнения (2) и одномерного пространства с координатой x соответствующее уравнение записывается в виде:

$$\frac{\partial N}{\partial t} = D\frac{\partial^2 N}{\partial x^2} + \alpha N(1 - {}^{N}/_{K}) \qquad (4)$$

D **– коэффициент диффузии.**

Динамика популяций в пространстве

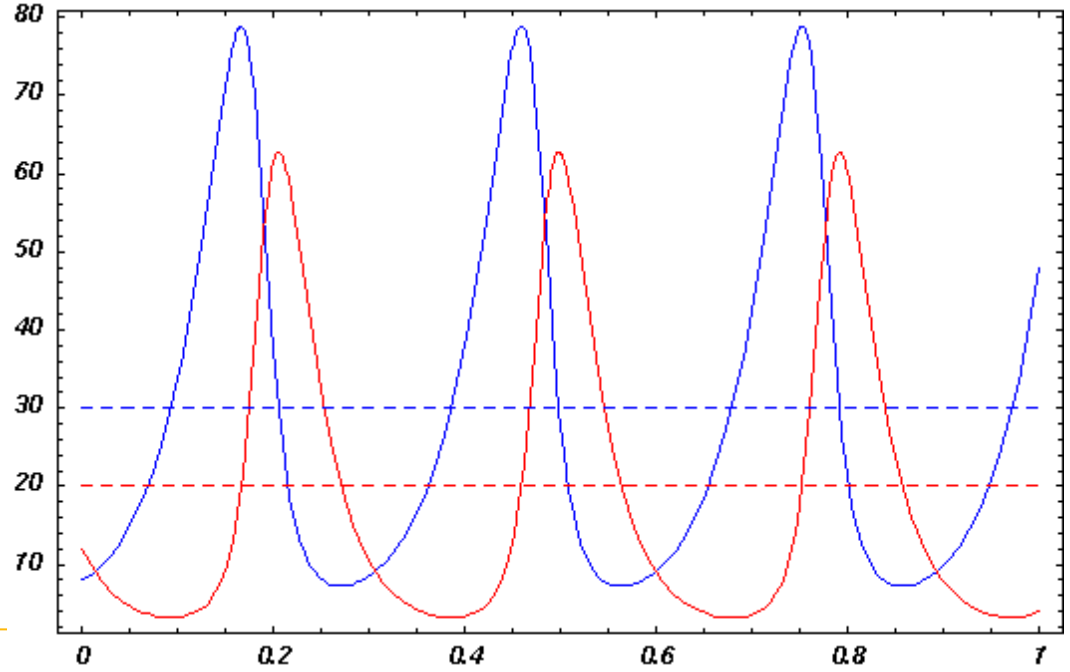
А.Н.Колмогоров в 1937 г. впервые получил решения уравнения (4) в виде бегущих плоских волн, вводя движущуюся систему координат $x - vt$, где v — скорость движения фронта.

Величина v постоянна и пропорциональна $\sqrt{\alpha D}$ и зависит как от скорости размножения α, так и от коэффициента диффузии D. При этом скорость движения фронта может значительно превосходить скорость диффузии.

Хищник - жертва

$$\frac{dN_1}{dt} = \lambda N_1 - \gamma_1 N_1 N_2,$$
$$\frac{dN_2}{dt} = \gamma_2 N_1 N_2 - \delta N_2$$

где N_1 — численность жертвы, N_2 — численность хищника, γ_1 и γ_2 — коэффициенты сокращения численности жертв и роста численности хищников, δ — константа скорости отмирания хищника.



Хищник - жертва

В конечном счете, нас интересует - будет ли такое экологическое сообщество устойчиво сосуществовать в заповеднике.

Экспериментальные данные полученные в реальной многокомпонентной и открытой среде с множеством неучтенных взаимодействий, указывают на факт наличия устойчивых колебаний популяций свидетельствует о том, что модель работоспособна и оправдывает надежды по предсказанию.

Хищник - жертва

Характер поведения системы не меняется при обобщении не меняющих структуру балансовых соотношений

$$\frac{dN_1}{dt} = f_1(N_1) - g_1(N_1N_2),$$

$$\frac{dN_2}{dt} = g_2(N_1N_2) - f_2(N_2)$$

Но меняется, если мы введем конкуренцию жертв за пищу или хищников за жертвы (структурные изменения).

Хищник - жертва

$$\frac{dN_1}{dt} = \lambda N_1 - \gamma_1 N_1 N_2 + \varepsilon h_1(N_1, N_2),$$

$$\frac{dN_2}{dt} = \gamma_2 N_1 N_2 - \delta N_2 + \varepsilon h_2(N_1, N_2)$$

- Оказывается, что в зависимости от вида малых поправок h_1 и h_2 возможны 3 сценария динамики

Хищник - жертва

Сценарий 1: равновесное состояние устойчиво. При любых других начальных условиях через большое время устанавливается именно оно.

Сценарий 2: система "идет в разнос". Стационарное состояние неустойчиво. Эволюция приводит то к резкому увеличению числа бандитов, то к их почти полному вымиранию (вследствие того, что они настолько ограбили трудящихся, что взять уже нечего). Такая система в конце концов попадает в область столь больших или столь малых значений N_1 и N_2, что модель перестает быть применимой: происходит изменение законов эволюции, т. е. революция.

Хищник - жертва

Сценарий 3: в системе с неустойчивым стационарным состоянием устанавливается с течением времени периодический режим (в котором, скажем, радикалы и консерваторы периодически сменяют друг друга).

В отличие от исходной модели Лотки-Вольтерра, в этой модели установившийся периодический режим не зависит от начального условия. Первоначально незначительное отклонение от стационарного состояния приводит не к малым колебаниям около *него*, как в модели Лотки-Вольтерра, а к колебаниям вполне определенной (и не зависящей от малости отклонения) амплитуды.

Возможны и другие структурно устойчивые сценарии (например, с несколькими периодическими режимами).

В нелинейных системах параметр (характеристика или свойство системы) X может изменяться под действием управляющего (или возмущающего) параметра λ. Рассмотрим диаграмму (X, λ). Оказывается, что при малых λ существует одно решение, характеризующее устойчивое состояние, а при больших λ - существует два устойчивых состояния с разными значениями X.

Глобальное изменение климата?

Наблюдаемые в последние десятилетия изменения в биосфере вызывают «обоснованное» беспокойство мирового сообщества. Одним из ключевых параметров состояния биосферы является содержание углекислого газа в атмосфере.

Большинство исследователей считают причиной этого явления возрастающие темпы сжигания ископаемых топлив. Как следствие, широкое распространение получила гипотеза о существовании «парникового эффекта» и глобального потепления, который объясняется наличием связи между температурой атмосферы и содержанием в ней «парниковых» газов (диоксид углерода, метан, пары воды, окислы азоты, фреоны и др.) из-за различия в проводимости этими газами коротковолнового и длинноволнового излучения.

При этом считается, что среди парниковых газов диоксид углерода оказывает наиболее существенное влияние на климат.

37

Динамика CO_2

- **Существует распространённое *неверное* мнение, что согласно данным ледовых кернов в XX веке установлен абсолютный рекорд за последние 650 тыс. лет содержания углекислого газа в атмосфере.**

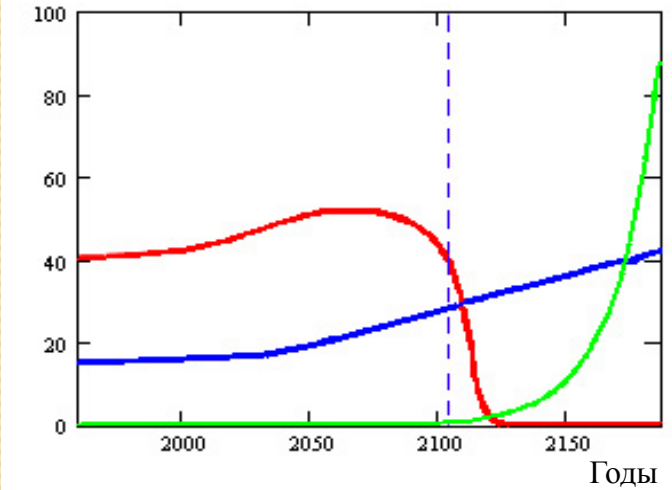
- **Существуют мнения, что ледовые керны показывают заниженные уровни CO_2. Низкие уровни связаны с процессами во льду и особенностями извлечения кернов.**

- **Имеются измерения, датируемые 1812 – 1959 гг. и показывающие, что уровень CO_2 был выше текущего в 1812-1835 гг. и в 1935-1945 гг. Точность измерений в 1940-х годах 3% и выше.**

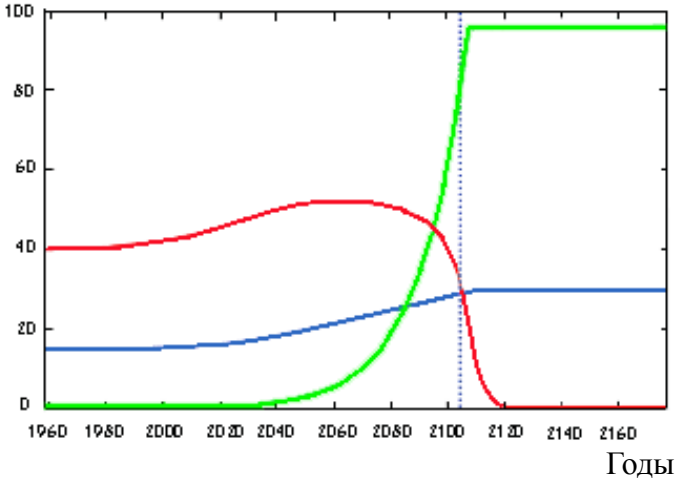
- **Нет достаточных оснований с уверенностью говорить, что наблюдаемое глобальное потепление последних десятилетий вызвано увеличением содержания углерода в атмосфере. Эту связь следует иметь в виду, скорее, из принципа предосторожности.**

Возможные сценарии развития событий при различных параметрах биосферы

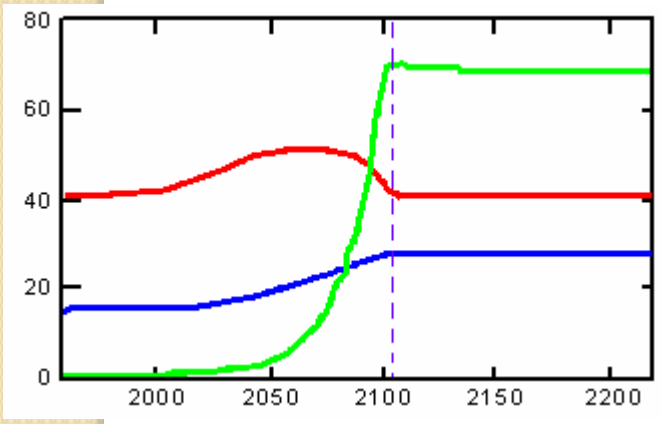
Развитие событий при сохранении скорости сжигания топлива на современном уровне



Развитие событий при прекращении сжигания топлива на «дате необратимости»



Развитие событий при прекращении сжигания топлива за 1 год до «даты необратимости»



$t^0 C$

CO_2

Биомасса

«Дата необратимости» - дата, после которой прекращение сжигания не останавливает процесс почвенной эмиссии CO_2 за счет положительной обратной связи с ростом температуры

Для понимания ситуации в целом очень важно знать не наиболее вероятный вариант развития событий в системе «биосфера-климат», и условия возникновения наиболее опасного варианта и время оставшееся до его наступления, что приводит к моделям «минимальной» сложности.

Минимальные модели имеют ряд преимуществ:

1) использование усредненных параметров уменьшает ошибку в их оценке;

2) усреднение легко отслеживать при параметрах внутри доверительных интервалов;

3) использование качественного анализа.

Схема взаимодействий между процессами, рассмотренными в модели

- положительный эффект;
- отрицательный эффект;
- неопределенный эффект.

БЛОК-СХЕМА МИНИМАЛЬНОЙ МОДЕЛИ ГЛОБАЛЬНОЙ ДИНАМИКИ УГЛЕКИСЛОГО ГАЗА

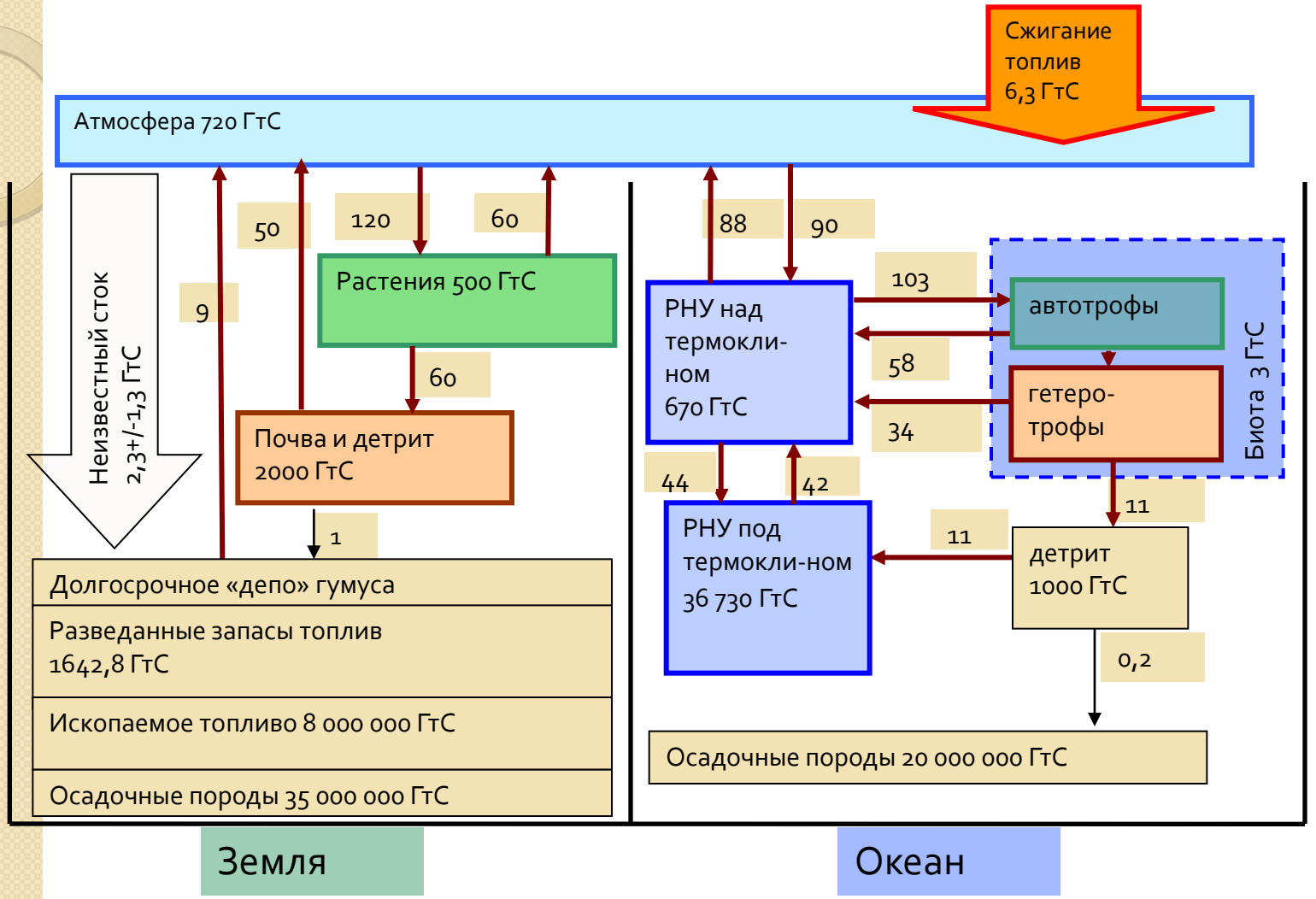


Схема круговорота углерода, которая использовалась для создания объединённой минимальной модели «наземная биота-атмосфера-океан».

Минимальная модель системы «биосфера-климат»

$$\begin{cases} C\dfrac{d\Delta T}{dt} = \Delta R_f + \sum_i f_i \Delta T \\ \dfrac{dA}{dt} = S(y, T_0+\Delta T) + C_{a_up} M_{out}(\Delta T) B - P(x, A, T_0+\Delta T) - C_{a_down} M_{in}(\Delta T) A + fuel(t) \\ \dfrac{dx}{dt} = P(x, A, T_0+\Delta T) - D(x) \\ \dfrac{dy}{dt} = D(x) - S(y, T_0+\Delta T) \\ \dfrac{dB}{dt} = C_{a_down} M_{in}(\Delta T) A + C_{d_up} U - C_{f_down} B - C_{a_up} M_{out}(\Delta T) B \\ \dfrac{dU}{dt} = C_{f_down} B - C_{d_up} U \end{cases}$$

$$P(x, A, T) = V_p \cdot x \cdot (x_{\max} - x) \cdot \frac{A}{K_A + A} \cdot f_p(T_0 + \Delta T)$$

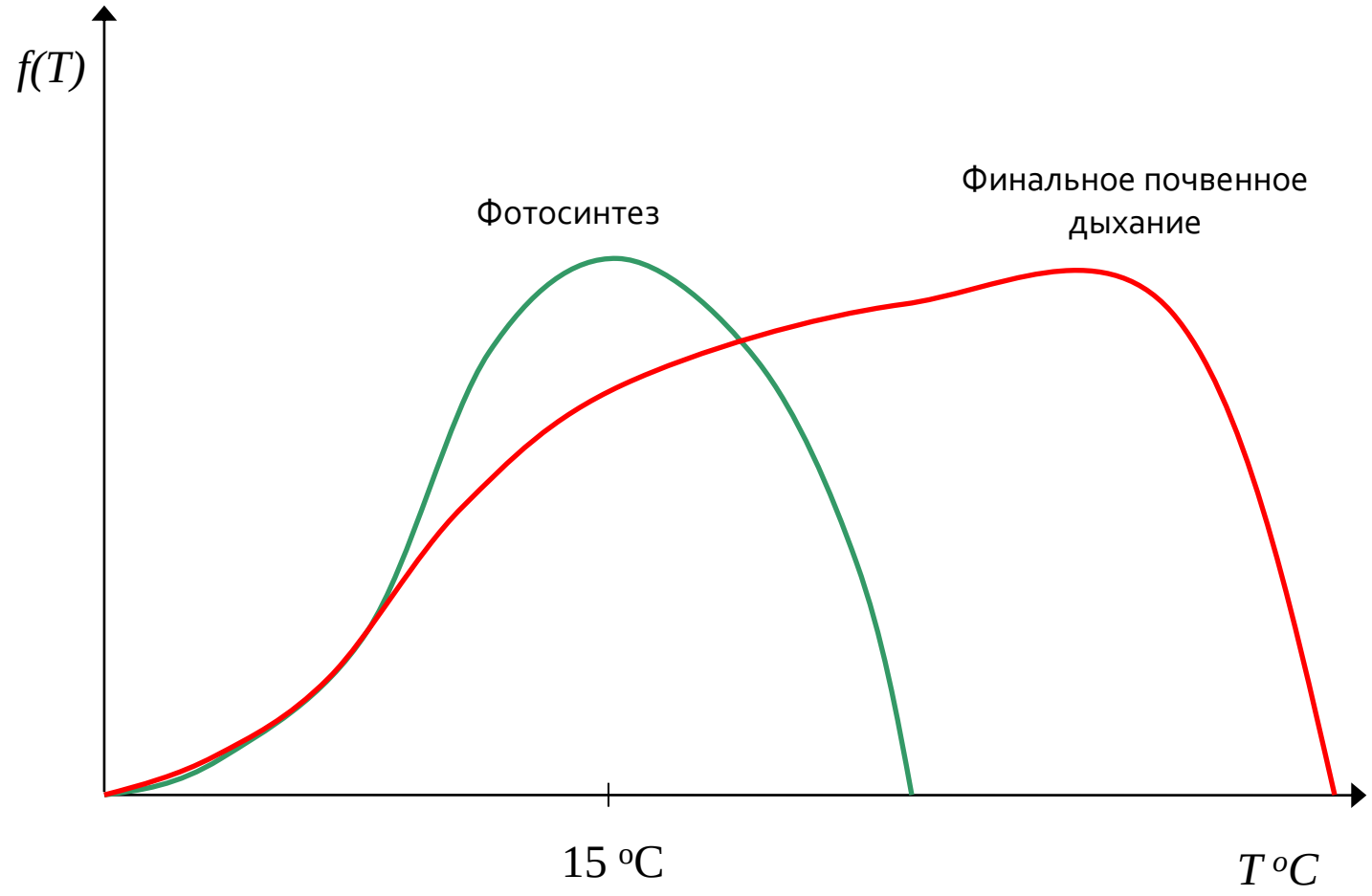
$$D(x) = V_d \cdot x, \quad S(y, T) = V_s \cdot y \cdot f_M(T)$$

$$M_{in}(\Delta T) = e^{-0.03\Delta T}, \quad M_{out}(\Delta T) = e^{0.03\Delta T}$$

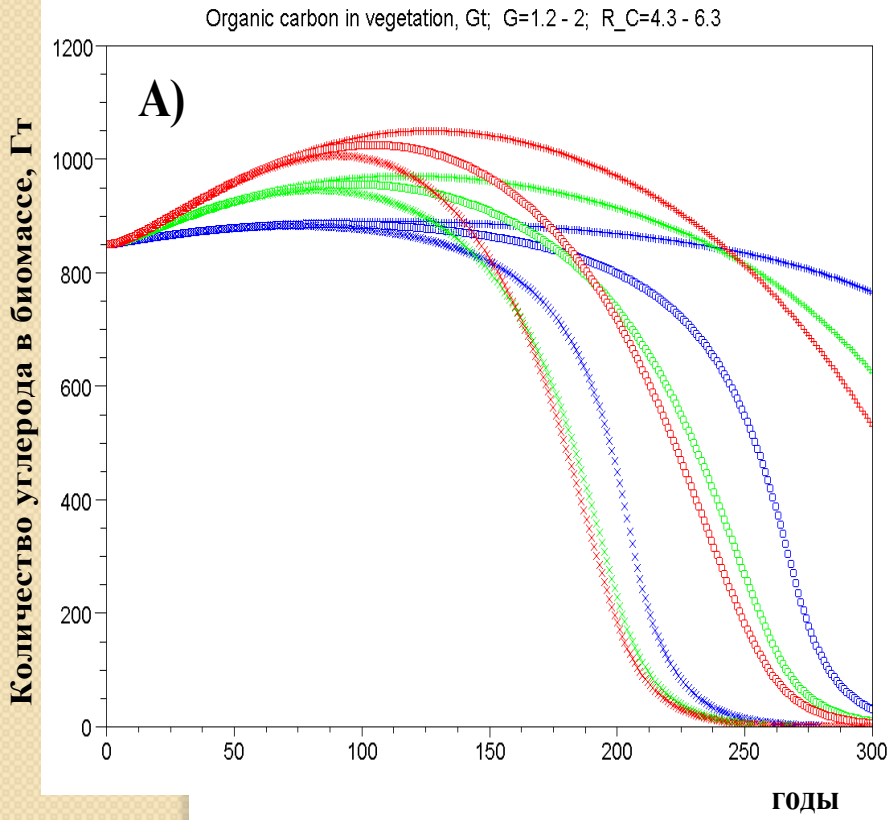
$$f(T, T_{\max}) = \begin{cases} T^{1.5}(T_{\max} - T), & 0 \le T \le T_{\max} \\ 0, & \textit{в остальных случаях} \end{cases}$$

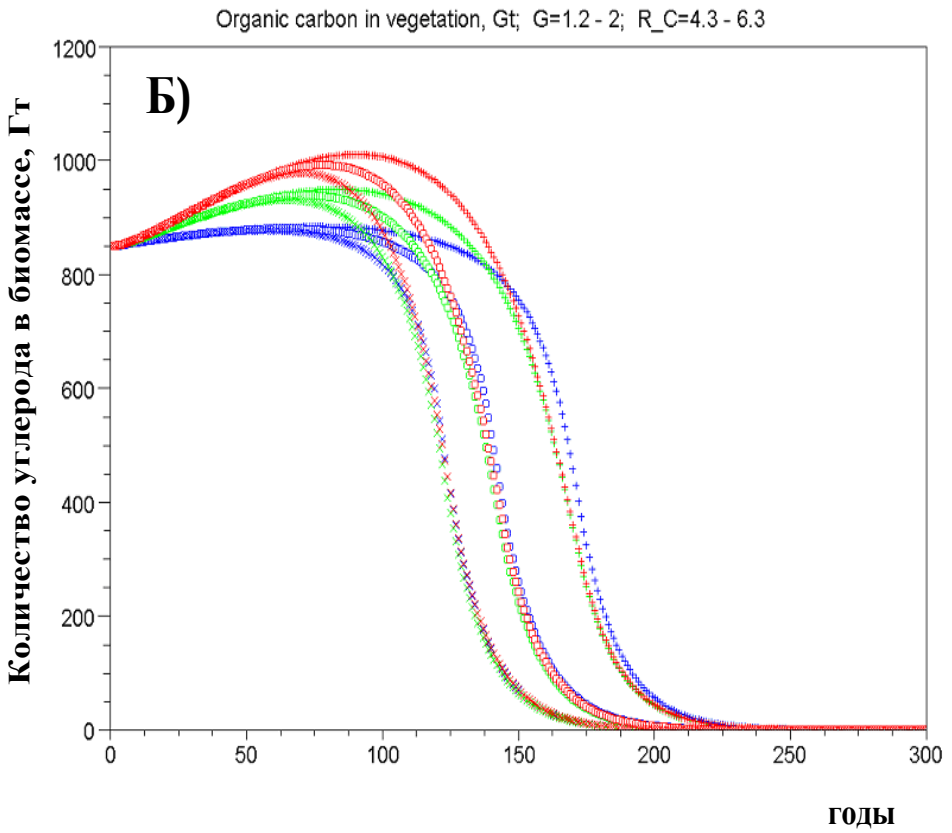
A – концентрация углерода в атмосфере; *x* – биомасса наземных растений; *y* - органика почв; *B* - количество углерода в приповерхностных слоях океана; *U* - количество углерода под термоклином.

Условные температурные зависимости фотосинтеза и почвенного дыхания



Динамика биомассы в минимальной модели системы «биосфера-климат»





Возможные сценарии динамики углерода в биомассе при варьировании вклада аэрозолей в радиационное воздействие и разных значениях предельной емкости среды (параметр *G*). Отдельные «пучки» траекторий соответствуют разным значениям *R_C* (чем больше параметр, тем ближе траектория к началу отсчета). Рисунок (А) демонстрирует динамику при средних значениях параметров обратных связей, а рисунок (Б) - при значениях параметров на неблагоприятных краях доверительных интервалов.

Малоразмерная балансовая модель

$$\begin{cases} \dfrac{dx}{dt} = V_x \cdot x \cdot (x_{\max} - x) \cdot V(A) \cdot f_{MG}(T(A)) - V_d \cdot x, \\ \dfrac{dy}{dt} = V_d \cdot x - V_s \cdot y \cdot f_{MD}(T(A)), \\ A = C - x - y \end{cases}$$

A - Атмосфера

X - Растительная биомасса

У - Органика почвы

$$f_{MG}(T(A)) = T^d \cdot (T_{MG} - T) \cdot \Theta(T) \cdot \Theta(T_{MG} - T)$$

$$f_{MD}(T(A)) = T^d \cdot (T_{MD} - T) \cdot \Theta(T) \cdot \Theta(T_{MD} - T)$$

$$V(A) = \frac{A}{K_0 + A}$$

$$T(A) = T_o + T_{del} \cdot \log_2\left(\frac{A}{A_0}\right)$$ ← **Парниковый эффект**

T – температура; C – общий углерод.

Биосферный триггер в минимальной модели углеродного цикла

Проведен качественный анализ глобальной минимальной модели многолетней динамики углерода в биосфере.

Установлено, что при определённых значениях параметров модели, попадающих в доверительные интервалы своих оценок, **текущее состояние биосферы является неустойчивым**. Система приходит в движение при отсутствии антропогенных выбросов при малейшем возмущении (например, интенсивных вырубок леса или интенсивных массовых лесопосадок)

$$T(A) = T_0 + T_{del} \cdot log_2 \frac{A}{A_0}$$

$$\begin{cases} \frac{dC}{dt} = fuel(t) \\ \frac{dx}{dt} = V_x \cdot x \cdot (x_{max} - x) \cdot V(A) \cdot f_{MaxGrowth}(T(A)) - V_d \cdot x \\ \frac{dy}{dt} = V_d \cdot x - V_s \cdot y \cdot f_{MaxDecay}(T(A)) \\ C = A + x + y \end{cases}$$

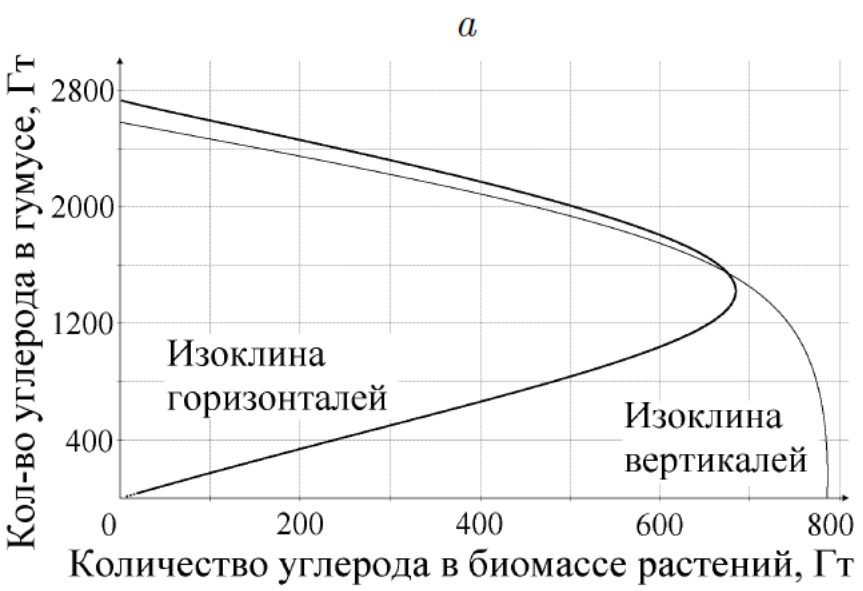
$$\Theta(x) = \begin{cases} 1, & x > 0 \\ 0, & x \leq 0 \end{cases}$$

$$V(A) = \frac{V_{max} \cdot A}{V_0 + A}$$

$$f_{MaxGrowth}(T) = T^d \cdot (T_{MaxGrowth} - T) \cdot \Theta(T) \cdot \Theta(T_{MaxGrowth} - T)$$

$$f_{MaxDecay}(T) = T^b \cdot (T_{MaxDecay} - T) \cdot \Theta(T) \cdot \Theta(T_{MaxDecay} - T)$$

Стационарные состояния



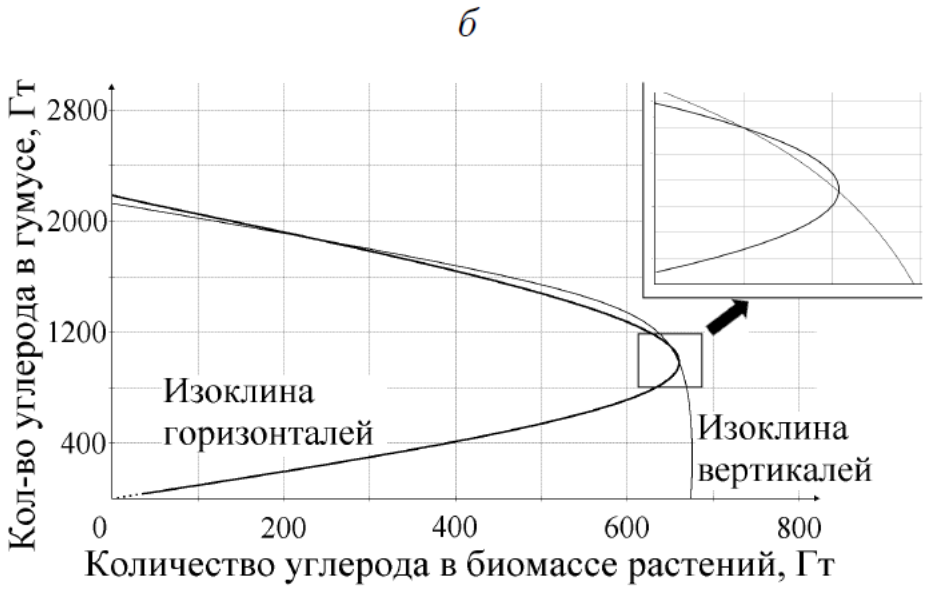


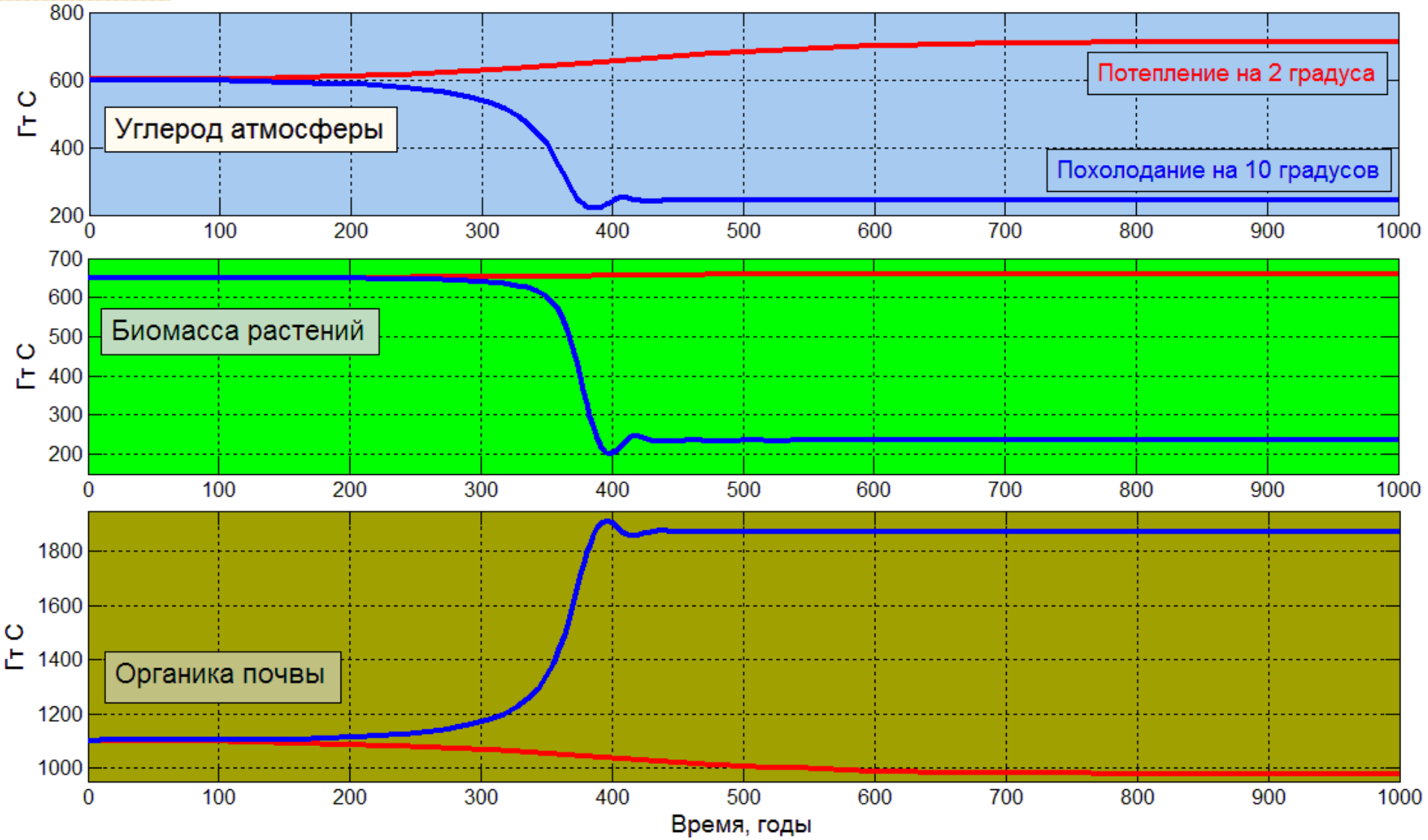
Рис. 1. Главные изоклины системы при следующих параметрах: *а* — $A_0 = 680$, $x_0 = 675$, $y_0 = 1546$, $d = 1.5$, $T_{\mathrm{MG}} = 38$, $T_0 = 15$, $T_{del} = 7.5$, $K_0 = 930$, $P_0 = 55$, $T_{\mathrm{MD}} = 43$, $x_{\max} = 912$; *б* — $A_0 = 600$, $x_0 = 650$, $y_0 = 1100$, $d = 1.5$, $T_{\mathrm{MG}} = 30$, $T_0 = 15$, $T_{del} = 8$, $K_0 = 930$, $P_0 = 60$, $T_{\mathrm{MD}} = 55$, $x_{\max} = 715$. Вставка показывает детальное устройство фазовой плоскости

Биосферный триггер в минимальной модели углеродного цикла

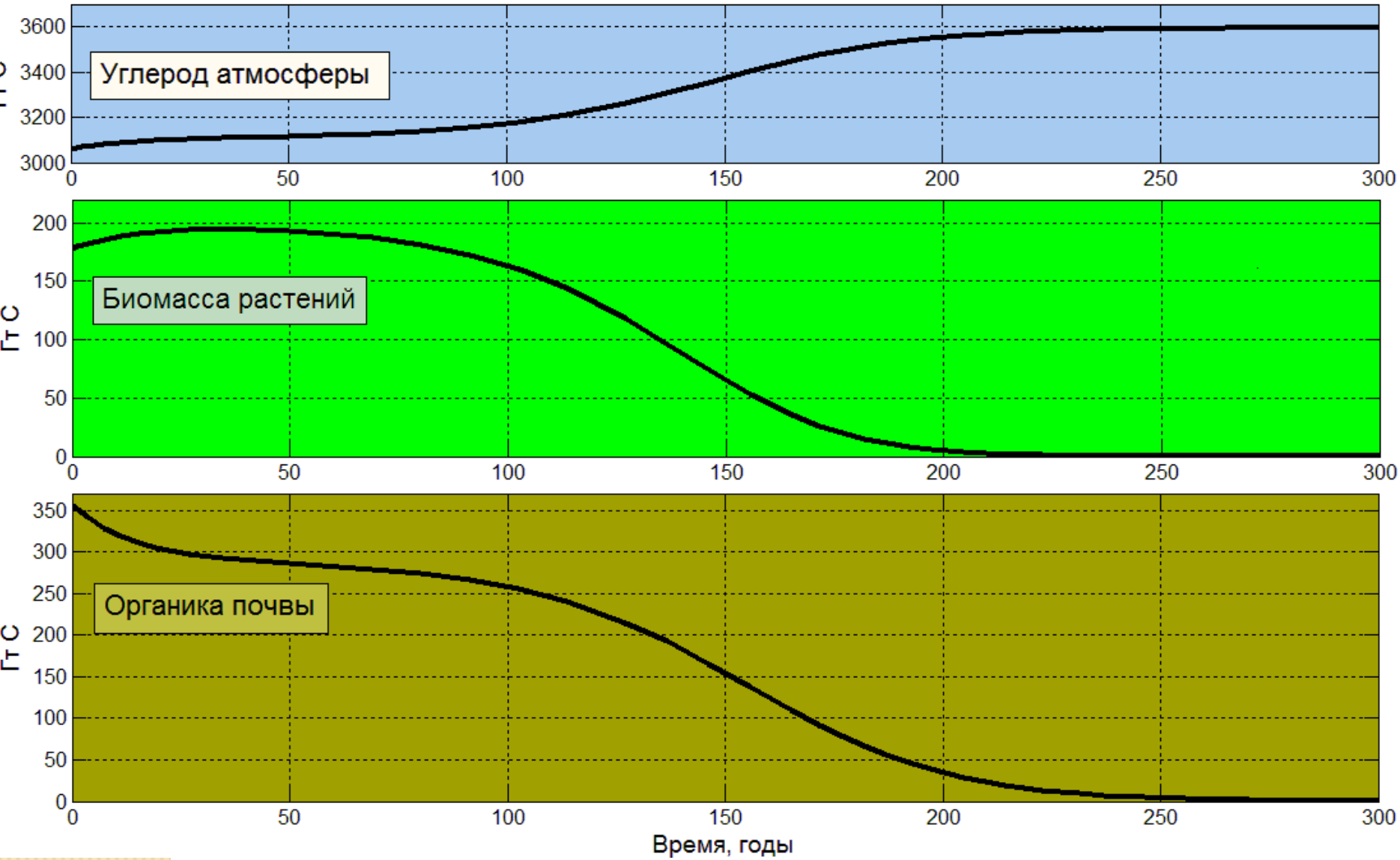
В зависимости от направления возмущения система может перейти в одно из двух устойчивых состояний, одно из которых характеризуется повышением температуры до 17^0C, а другое понижением температуры до 5^0C

На рисунке представлены результаты численного эксперимента, подтверждающие переход системы после незначительного возмущения из неустойчивой особой точки в устойчивое стационарное состояние с понижением и повышением температуры.

Биосферный триггер



Деградация при массовых пожарах



Динамика CO_2

- Таким образом, в биосфере существует возможность реализации триггерного режима, способного привести к резкому изменению состояния биосферы даже без сжигания ископаемых топлив.
- Состояние триггерного переключения находится достаточно близко от наиболее вероятного состояния биосферы: не более чем в 10%-ом изменении параметров.
- Переход в неустойчивость происходит главным образом при уменьшении ёмкости среды для биомассы.

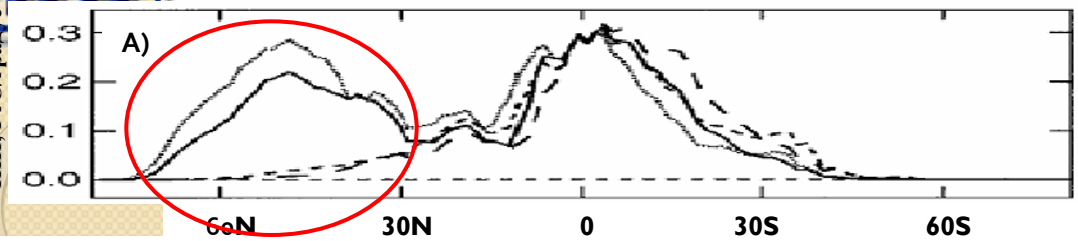
Публикации

- *Федотов А.М., Медведев С.Б., Пестунов А.И., Пестунов И.А.* О нестандартном поведении минимальной модели углеродного цикла // *Вестник НГУ. Серия: Информационные технологии. 2011. Том 9, выпуск 1. С. 82-88*

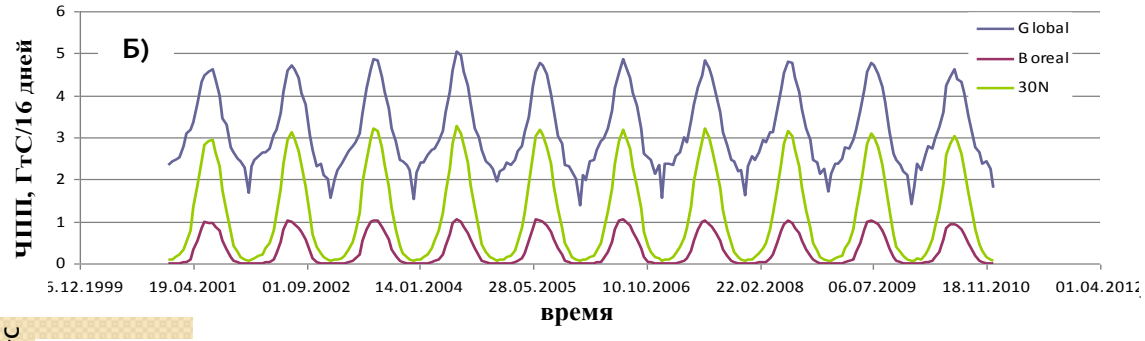
- *С.И. Барцев, А.Г. Дегерменджи, А.М. Федотов, С.Б. Медведев, А.И. Пестунов, И.А. Пестунов* БИОСФЕРНЫЙ ТРИГГЕР В МИНИМАЛЬНОЙ МОДЕЛИ УГЛЕРОДНОГО ЦИКЛА // *ДОКЛАДЫ АКАДЕМИИ НАУК, 2012, том 443, № 4, с. 500–503*

- *А. М. Федотов, С. Б. Медведев, А. И. Пестунов, И. А. Пестунов, С. И. Барцев, А. Г. Дегерменджи* Аналитическое исследование малоразмерной модели динамики углерода в биосфере // *Вычислительные технологии, Том 17, № 3, 2012, с. 91-108*

Оценка вклада бореальных лесов в сезонную динамику CO_2 в атмосфере

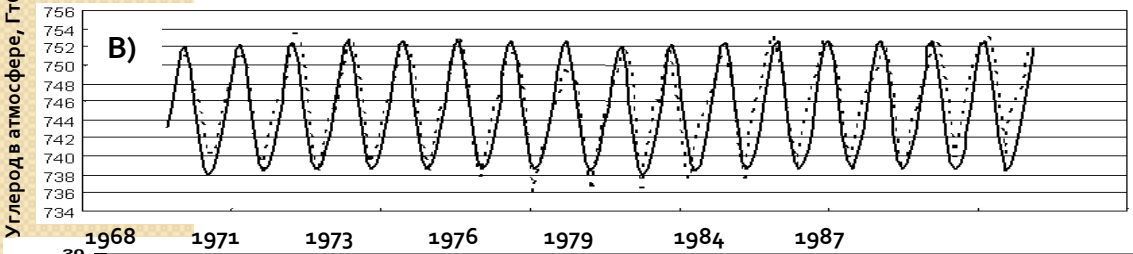


Наблюдаемые сезонные колебания концентрации CO2 в атмосфере обусловлены сезонными изменениями ЧПП наземной растительности, расположенной севернее 30 градусов с.ш. (Field, et al., 1998). (Рис.А, выделение)

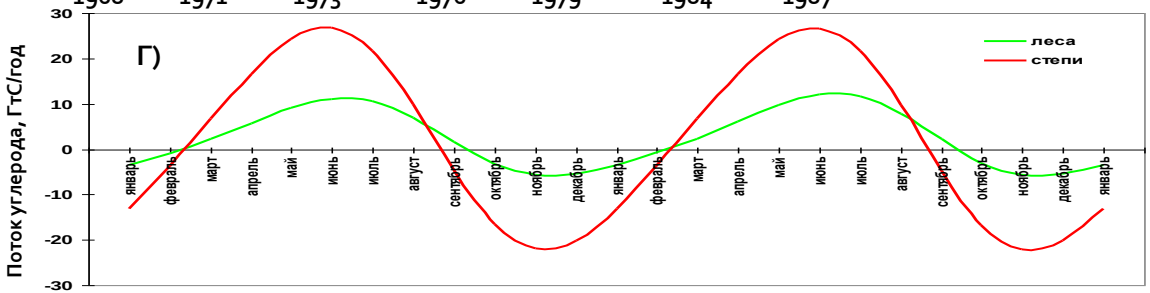


По данным дистанционного зондирования рассчитана сезонная динамика ЧПП бореальных лесов и всей растительности, расположенной в этом широтном поясе (Рис.Б, тренд исключен).

Параметры растительного блока малоразмерной модели подобраны адекватно наблюдаемой динамике ЧПП.



Параметры почвенного блока модели подобраны адекватно глобальной атмосферной динамике концентрации CO_2. (Рис.В)



Это позволило оценить сезонные изменения суммарных (фотосинтез и почвенное дыхание) потоков углерода от лесов и степей (Рис.Г).

Показано, что суммарный вклад бореальных лесов в амплитуду сезонных колебаний атмосферной концентрации углерода составляет ~40% от вклада степей при шестикратном (!) превышении биомассы лесов (315 ГтС) над биомассой степей (50 ГтС).