


ИБФ СО РАН

А.Г.Дегерменджи

С.И.Барцев



**ПРИНЦИП НАИХУДШЕГО СЦЕНАРИЯ
ПРИ ПОСТРОЕНИИ МАЛОРАЗМЕРНЫХ
МОДЕЛЕЙ БИОСФЕРНОЙ ДИНАМИКИ
УГЛЕРОДА С УЧЕТОМ ПАРНИКОВОГО
ЭФФЕКТА**

Экстраполяция наблюдаемых трендов глобальных параметров в будущее указывает на возможность существенных изменений параметров биосферы и климата Земли.

В частности, темпы увеличения концентрации углерода в атмосфере являются беспрецедентными за последние 20 тыс. лет. Глобальная средняя температура земной поверхности с 1860 г. повысилась на 0,8°C, в то время как за последние 10 000 лет со времён последнего ледникового периода температура Земли повысилась всего на 5°C, т.е. скорость увеличения температуры возросла на порядок.

Кроме того, ни в последние 420 тыс. лет, ни, вероятно (с надёжностью 66-90%), в течение последних 20 млн. лет концентрация CO₂ не была столь высокой, как на сегодняшний момент (IPCC. Изменения климата, 2001; Pearson, Palmer, 2000; Enting, 1987; Boden, Kanciruk, Farrell, 1990; Keeling, et al., 2001).

Выявление ключевых факторов глобальных изменений дает возможность, по крайней мере, в принципе, предотвратить всё более явно проявляющиеся негативные тенденции в развитии биосферы.

В большинстве математических моделей системы "биосфера-климат" (Кондратьев, Крапивин, 2004; Моисеев и др., 1979; Ревел, Манк, 1981; Тарко, 1977; Тарко и др., 1988; Bolin, 1981; Keeling et al. 2001; Kocmaier, 1983; Olson et al., 1978; Oeschger et al., 1975; Piarman et al., 1980; Siegenthaler, Oeschger, 1981; Stainforth et al., 2000, IPCC TP II, 1997; Boer, et al., 2000; Esser, 1991; Potter, Klooster, Brooks, 1999; Kondratyev, Krapivin, Phillips, 2002; Luedeke et al., 1994; Sellers et al., 1996) **земной шар пространственно разделяется на огромное количество ячеек и для каждой ячейки составляются уравнения её состояния, а так же уравнения, описывающие взаимодействие между соседними ячейками.**

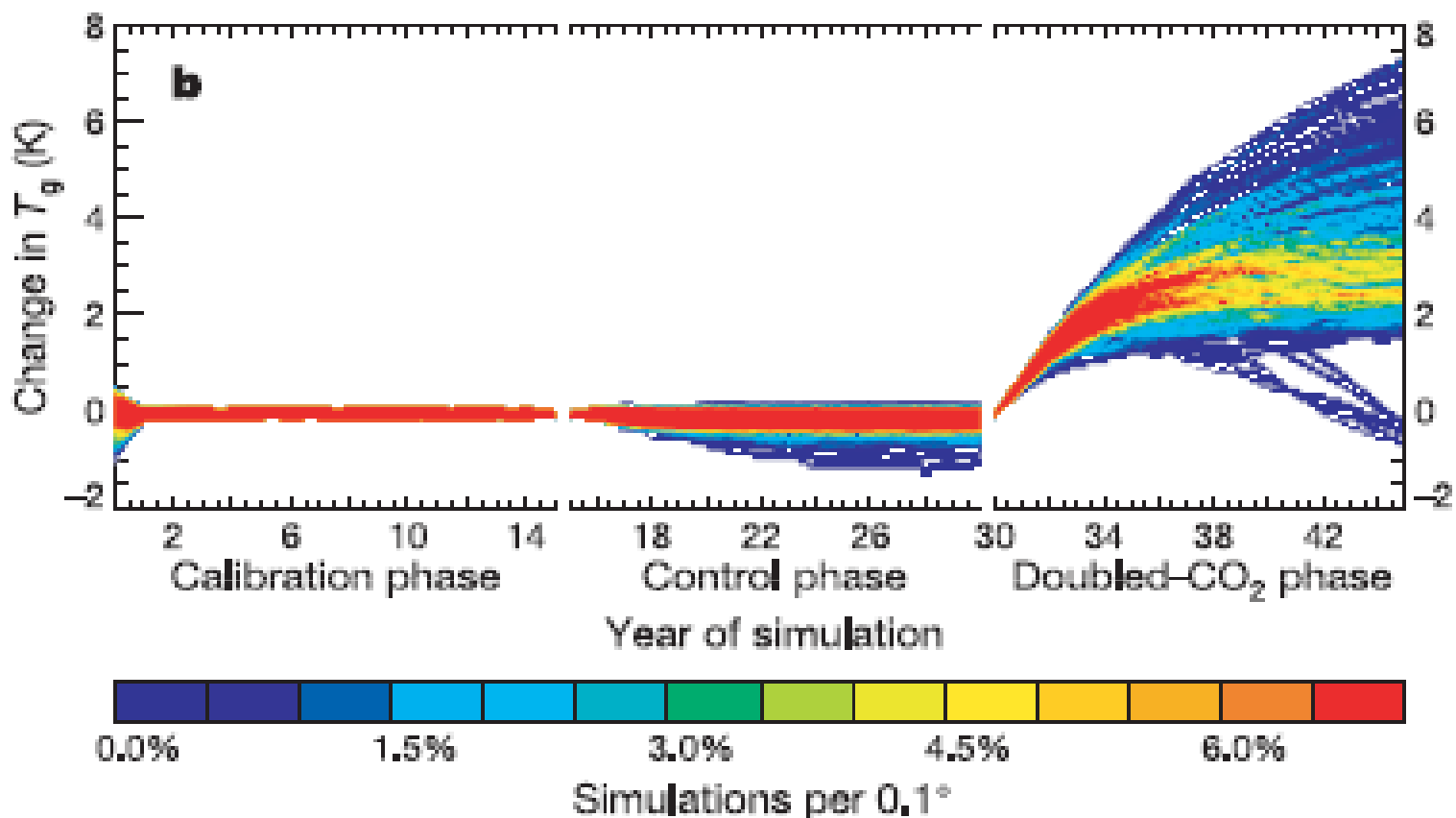
Однако на этих весьма сложных распределенных моделях лежит «проклятие размерности» - увеличение количества переменных и параметров модели приводит не к увеличению точности, а к противоположному результату. Это есть следствие:

- 1) невозможности оценить все параметры распределенной модели;**
- 2) многократного и неконтролируемого наложения неточностей измерений;**
- 3) накопления ошибок вычислений при численном исследовании распределенных моделей, что повышает вероятность возникновения вычислительных артефактов.**

Стремление к сложным моделям, учитывающим различные биосферно-климатические процессы, объясняется намерением исследователей получить наиболее вероятный сценарий развития системы "биосфера-климат".

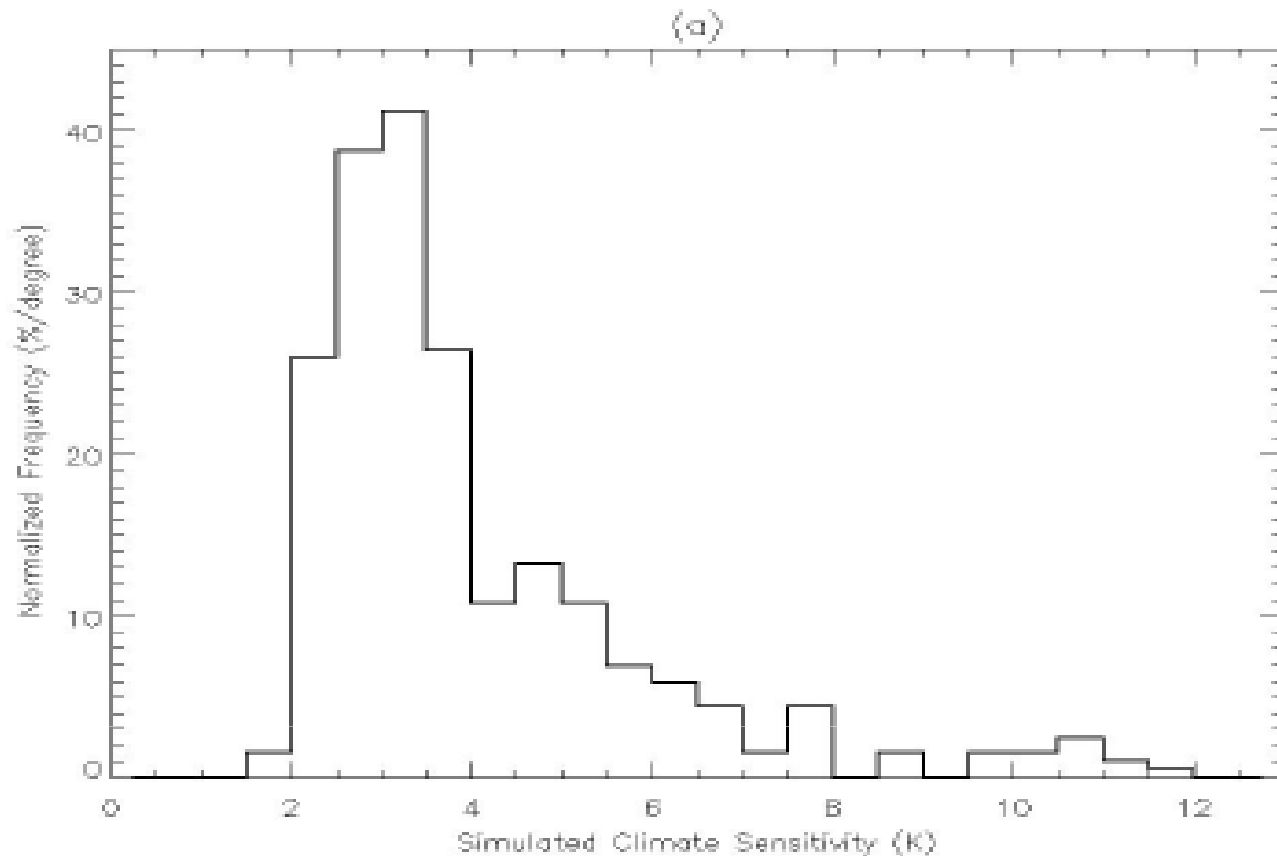
Важно отметить, что любая оценка пределов устойчивости биосферы может быть только вероятностной. Причина этого состоит в том, что оценки подавляющего большинства параметров биосферы и климата имеют приближенный характер. По этой причине можно говорить о целом веере возможных вариантов динамики системы "биосфера-климат" (IPCC, Изменения климата, 2001).

Даже при наличии наиболее вероятного варианта будущей динамики системы "биосфера-климат" для практических целей необходимо знать вид статистического распределения вариантов будущих динамик. Выяснение вида этого распределения представляет собой крайне сложную задачу.



Частотные распределения T_g (цвет показывает плотность траекторий на 0.1 К интервал) на трех фазах моделирования.

D. A. Stainforth, T. Aina, C. Christensen, M. Collins, N. Faull, D. J. Frame, J. A. Kettleborough, S. Knight, A. Martin, J. M. Murphy, C. Piani, D. Sexton, L. A. Smith, R. A. Spicer, A. J. Thorpe & M. R. Allen
 Nature.-2005.-V.433.



climateprediction.net

Dave Stainforth,
Myles Allen,
David Frame,
Claudio Piani
and many,
many others.

Atmospheric,
Oceanic and
Planetary
Physics,
University of
Oxford, UK

Какая величина вероятности катастрофы может побудить ЛПР принять решение?

Для примера, вероятность катастрофы самолета $\sim 1/20000$ (0.005%). “Цена” катастрофы ~ 100 persons. “Цена” глобальной катастрофы в 10^7 раз выше, следовательно, критическая вероятность катастрофы должна быть во столько же раз меньше.

Жизненно важный вопрос: “Обратимы или нет глобальные изменения?”

В то же время возможен другой подход к оценке устойчивости системы "биосфера-климат" ослабляющий значение неизбежной неопределенности оценок ее параметров.

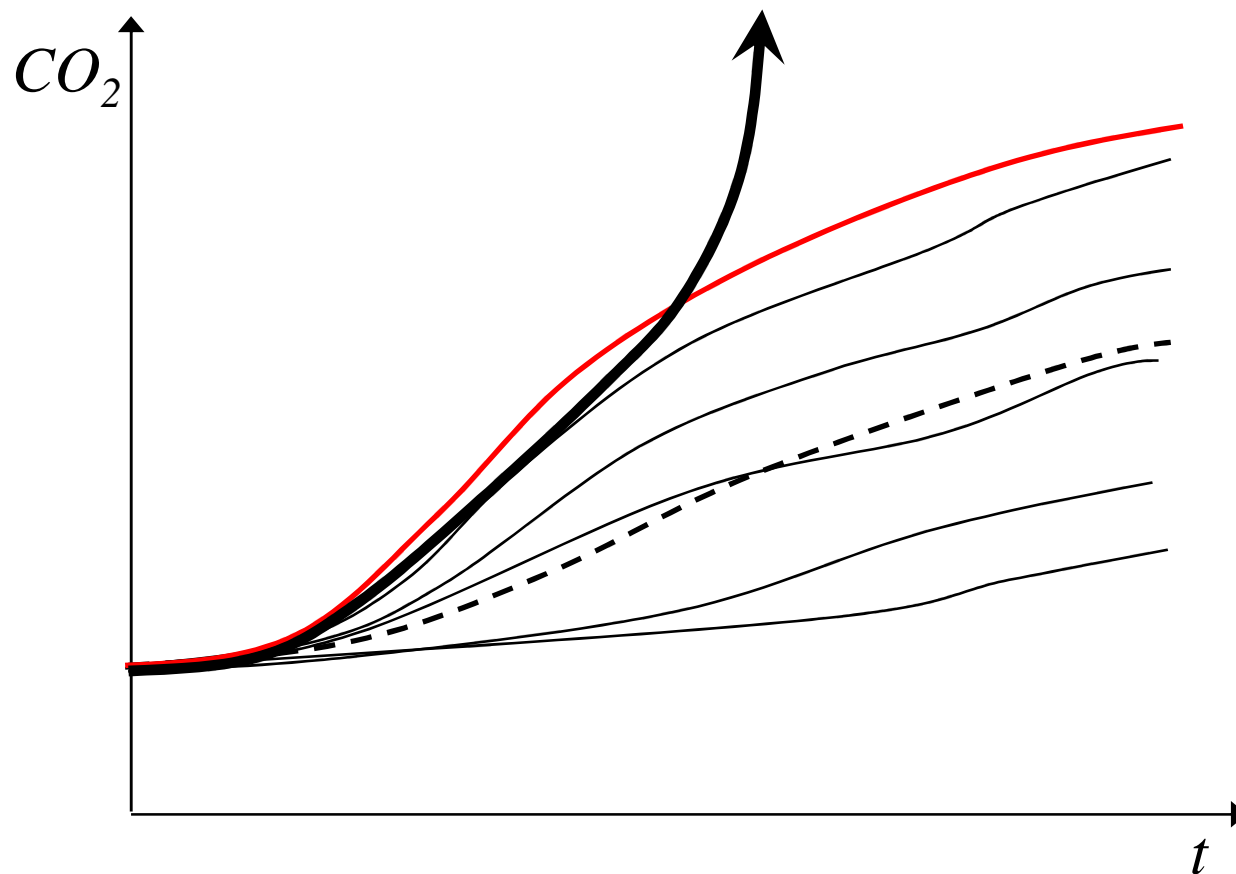
Для практических целей очень важно знать не наиболее вероятный вариант развития событий, а условия возникновения наиболее опасного варианта и время оставшееся до его наступления.

Концентрация внимания на наиболее опасных или наихудших вариантах развития биосферных событий можно назвать "принципом наихудшего сценария**".**

Последовательное применение этого принципа является конструктивным и позволяет существенно упростить построение биосферных моделей. Он позволяет отказаться от рассмотрения большого количества разнообразных компенсирующих и второстепенных механизмов, способных оказать влияние на биосферную динамику.

Тем самым принцип наихудшего сценария обосновывает и требует развития так называемых минимальных моделей биосферы.

“Веер” возможных сценариев глобальной динамики CO_2



--- гипотетический “наивероятный” сценарий

— гипотетический “наихудший” сценарий ?

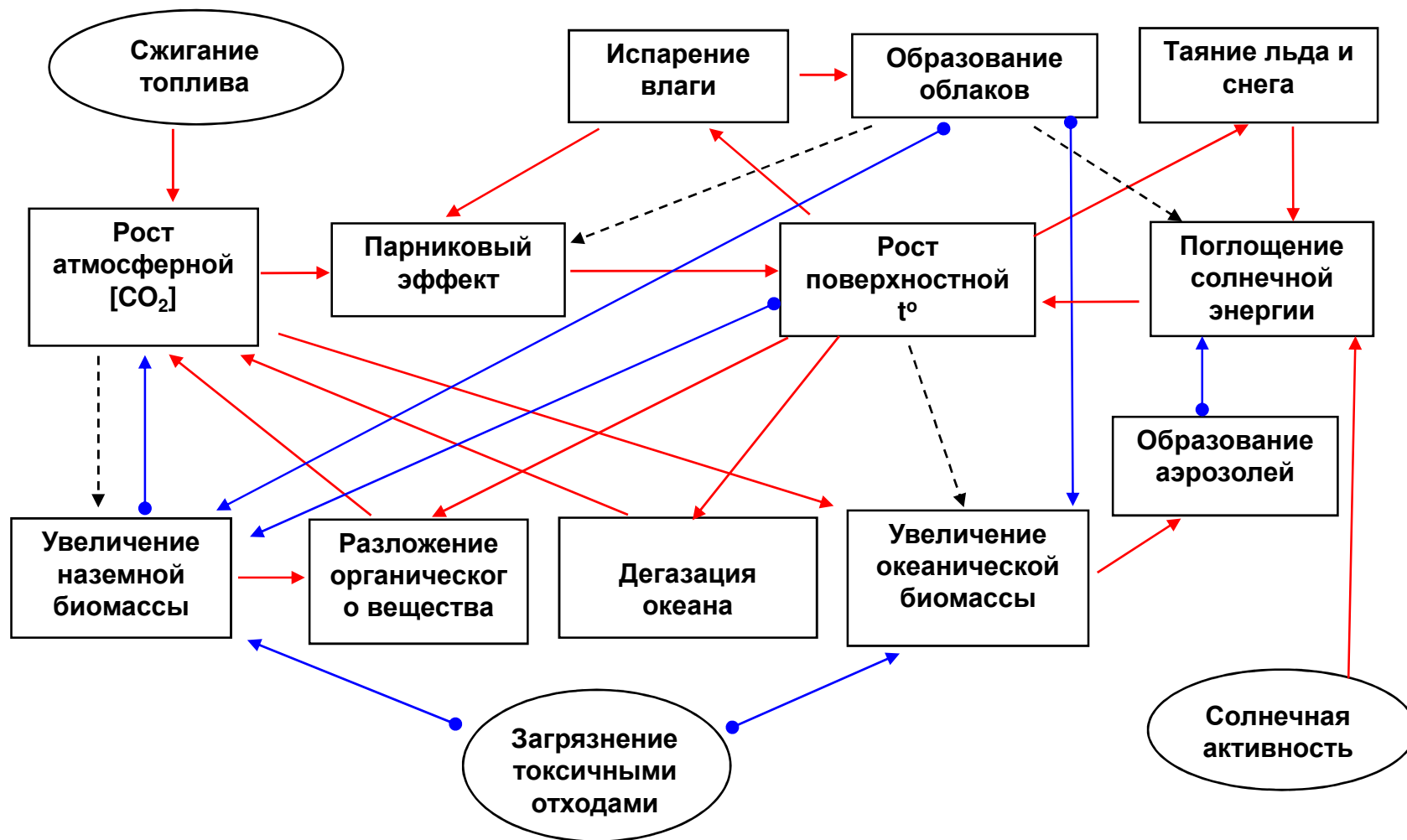


Схема наиболее очевидных взаимодействий между процессами в биосфере.

← - положительный эффект; ←• - отрицательный эффект;

← - - - - - неопределённый эффект.

По принципу построения минимальная модель биосферы не может описывать все эти обратные связи и перед разработчиками стоит задача выбора тех связей, которые могут способствовать самому быстрому наступлению катастрофических изменений, что и является худшим вариантом. То есть принцип наихудшего сценария опять выступает как руководящий принцип построения минимальной модели.

В целом обращение к минимальным моделям имеет ряд преимуществ:

1) использование в минимальных моделях усредненных параметров уменьшает ошибку в их оценке, просто вследствие статистических свойств выборочного среднего;

2) влияние усреднения достаточно легко отслеживать на минимальных моделях, рассматривая сценарии, соответствующие разным значениям параметров внутри доверительных интервалов;

3) минимальные модели позволяют, пусть и не в полном объеме, использовать аналитические подходы к оценке устойчивости и предельных состояний системы.

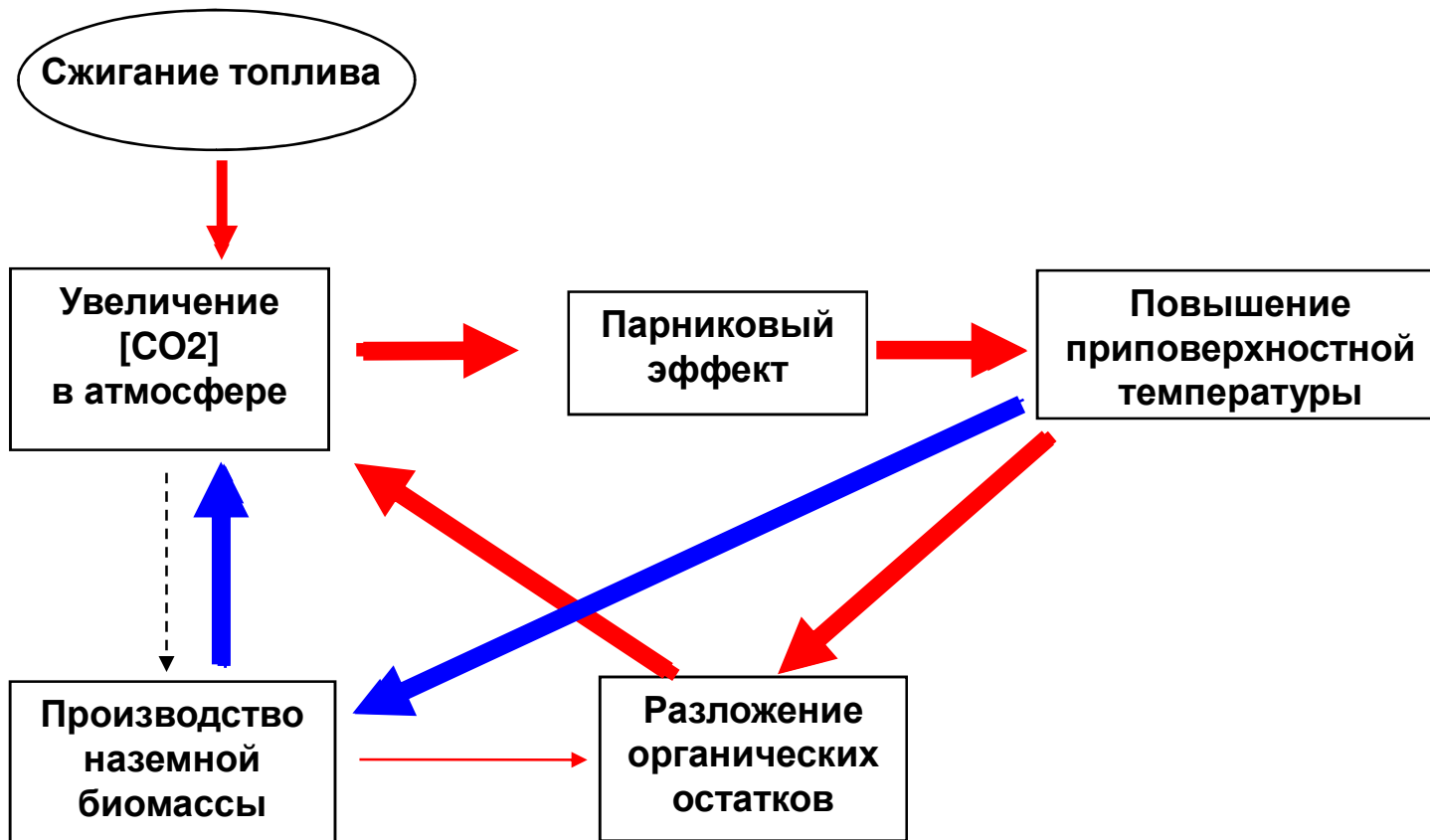
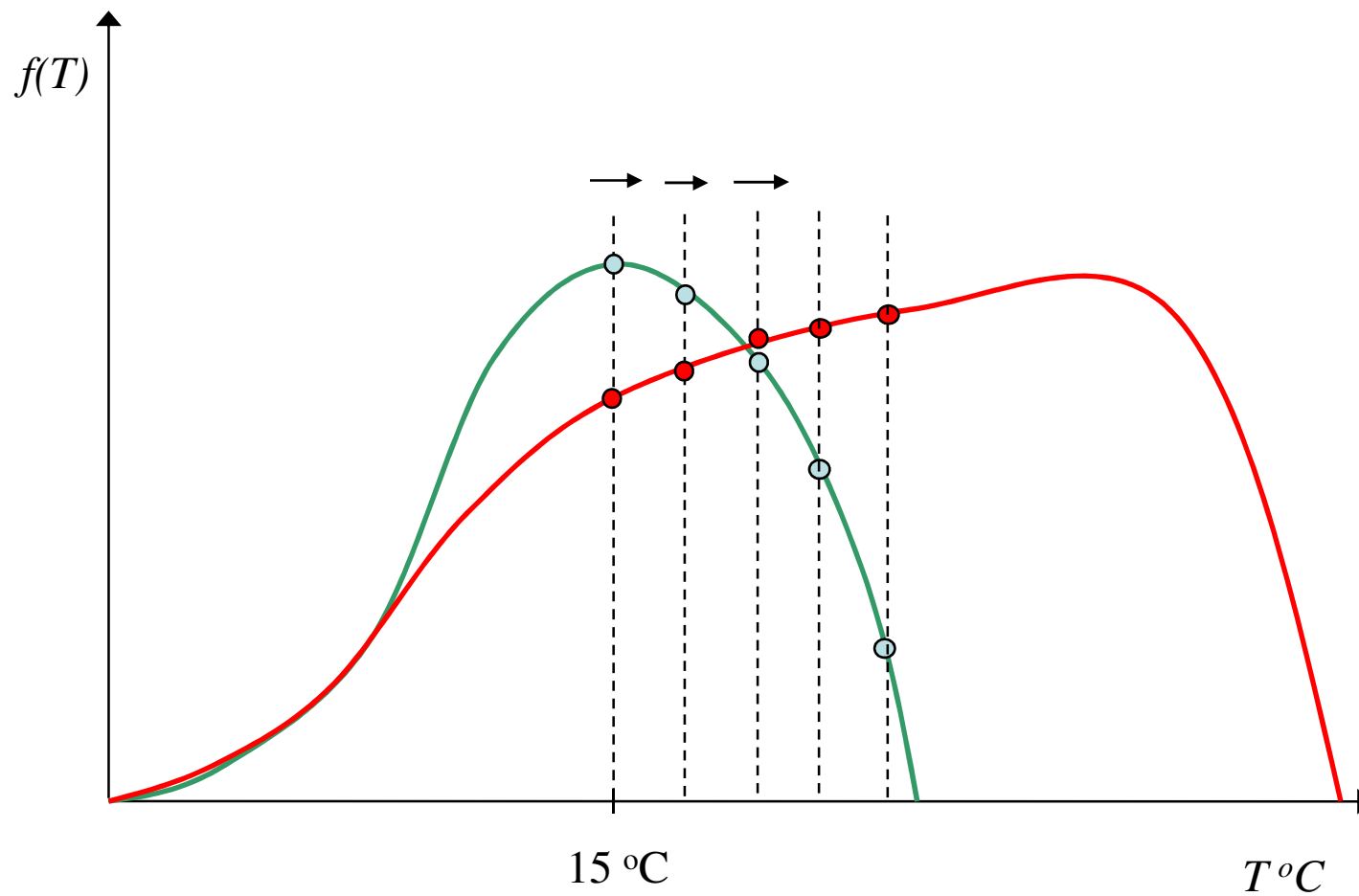
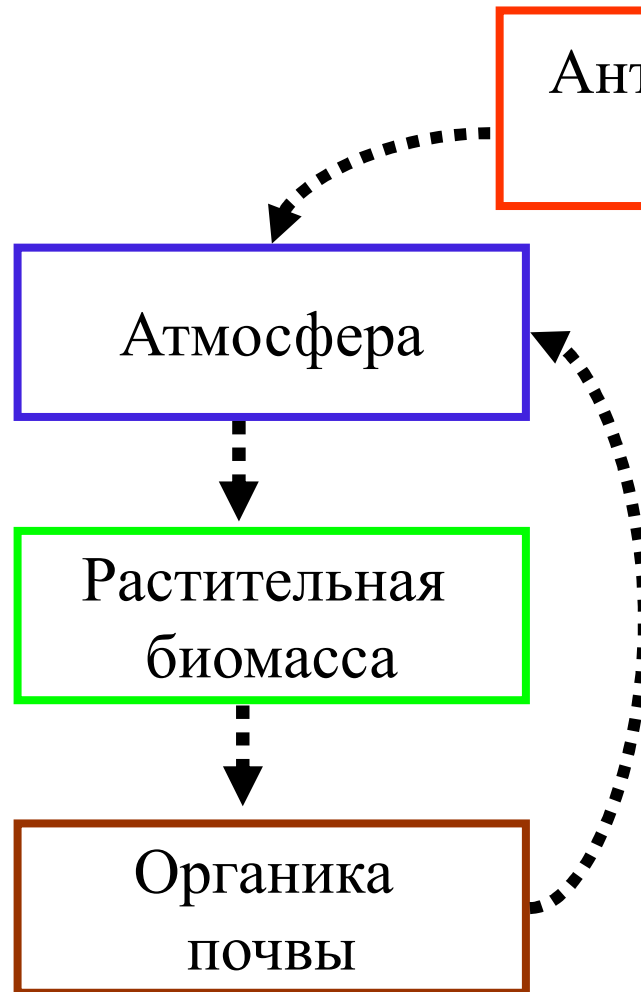


Схема взаимодействий между процессами, рассмотренными в модели
 ← - положительный эффект; ← - отрицательный эффект;
 ← - - - неопределенный эффект.

Условные температурные зависимости фотосинтеза и почвенного дыхания



«БАЗОВАЯ» МИНИМАЛЬНАЯ МОДЕЛЬ ГЛОБАЛЬНОЙ ДИНАМИКИ УГЛЕКИСЛОГО ГАЗА



$$\begin{cases} \frac{dC}{dt} = fuel(t) \\ \frac{dx}{dt} = P(x, A, T(A)) - D(x) \\ \frac{dy}{dt} = D(x) - S(y, T(A)) \\ C = A + x + y \end{cases}$$

$$f_P(T) = T^d (T_P - T)$$

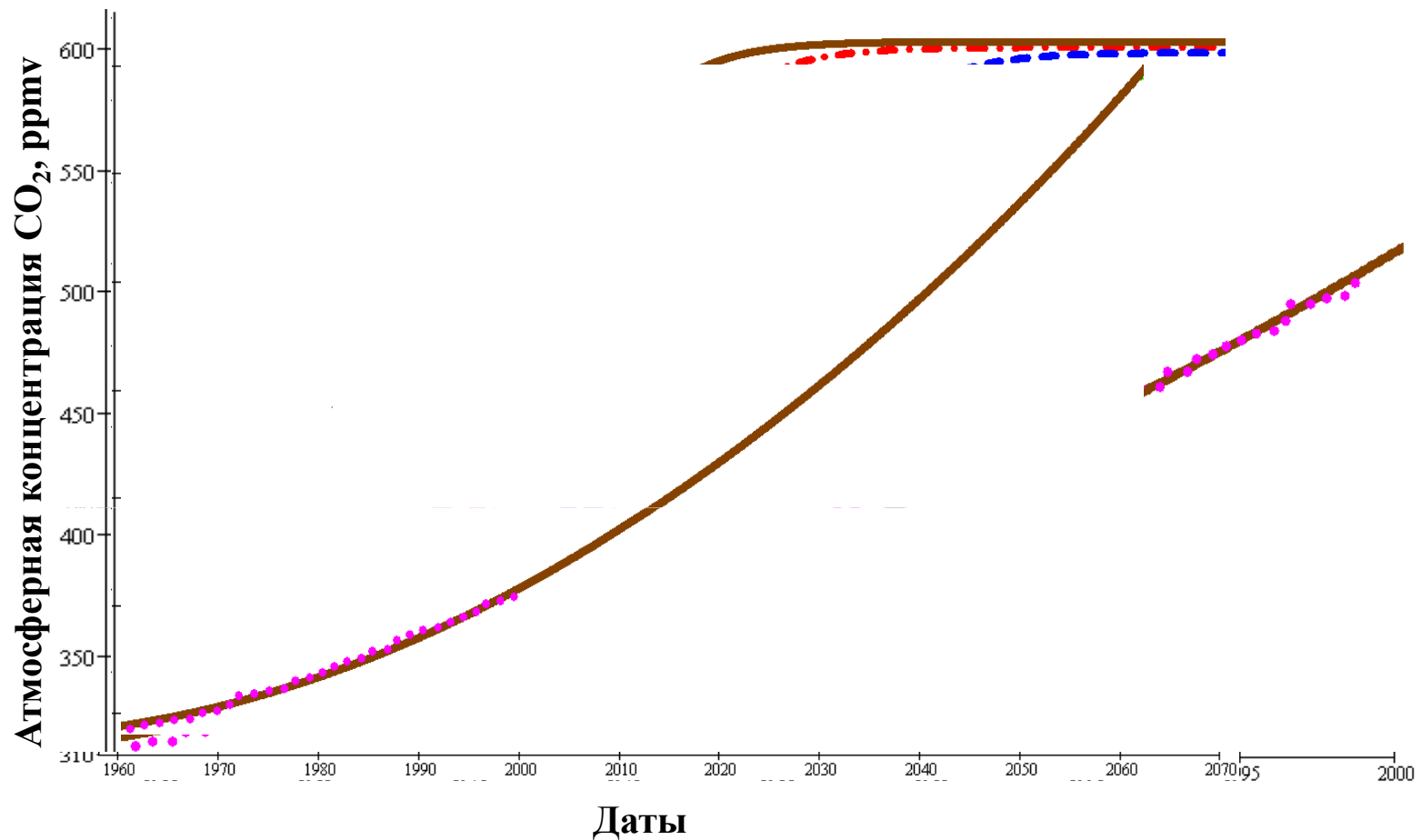
$$T(A) = T_o + T_{del} \cdot \log_2 \left(\frac{A}{A_0} \right)$$

$$P(x, A) = V_x \cdot x \cdot (x_{max} - x) \cdot V(A) \cdot f_P(T(A))$$

$$D(x) = V_d \cdot x$$

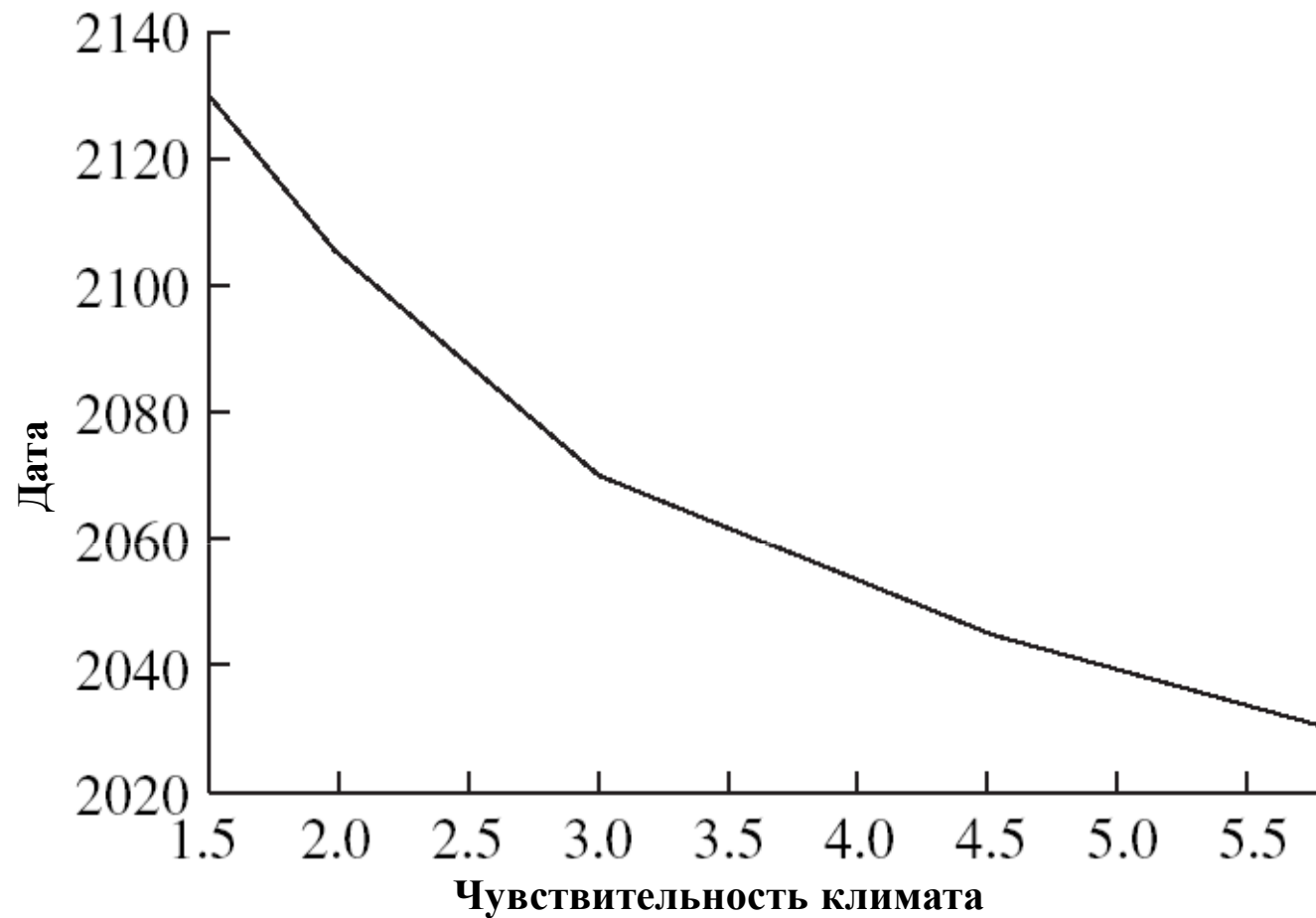
$$S(y, T) = V_s \cdot y \cdot f_M(T)$$

РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ «БАЗОВОЙ» МИНИМАЛЬНОЙ МОДЕЛИ



Динамика атмосферной концентрации CO₂ при различных датах полного прекращения сжигания топлив. Обозначения: ●●●● - данные Мауна-Лоа; — — — — - 2059; ■■■■■■ - 2064; ■■■■■■ - 2070 год; — — — — - 2090 год.

РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ «БАЗОВОЙ» МИНИМАЛЬНОЙ МОДЕЛИ



Теоретическая функциональная зависимость даты необратимости от увеличения коэффициента T_{del} , характеризующего рост температуры при удвоении концентрации CO_2 .

«ОБЪЕДИНЁННАЯ» МИНИМАЛЬНАЯ МОДЕЛЬ ГЛОБАЛЬНОЙ ДИНАМИКИ УГЛЕКИСЛОГО ГАЗА

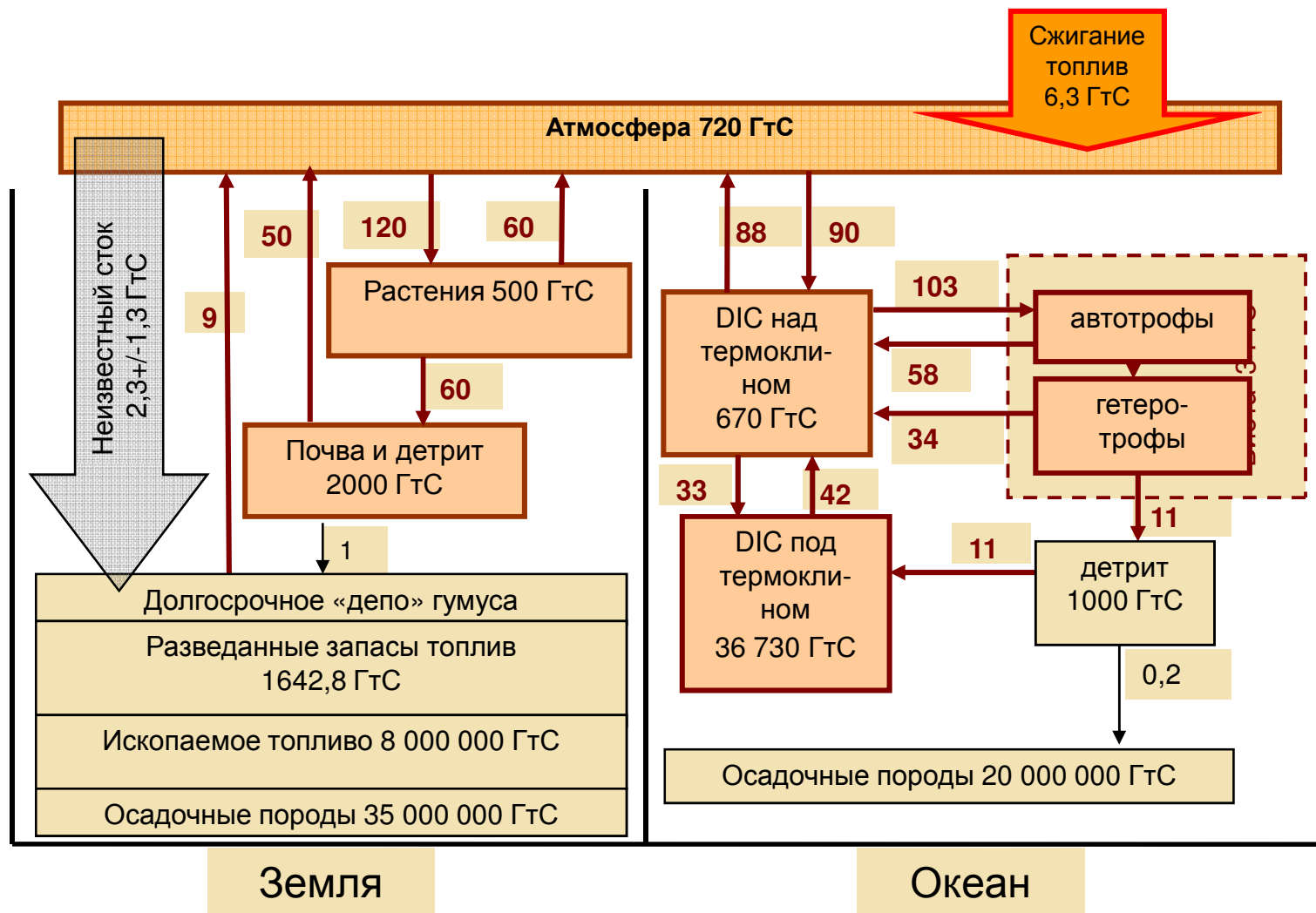
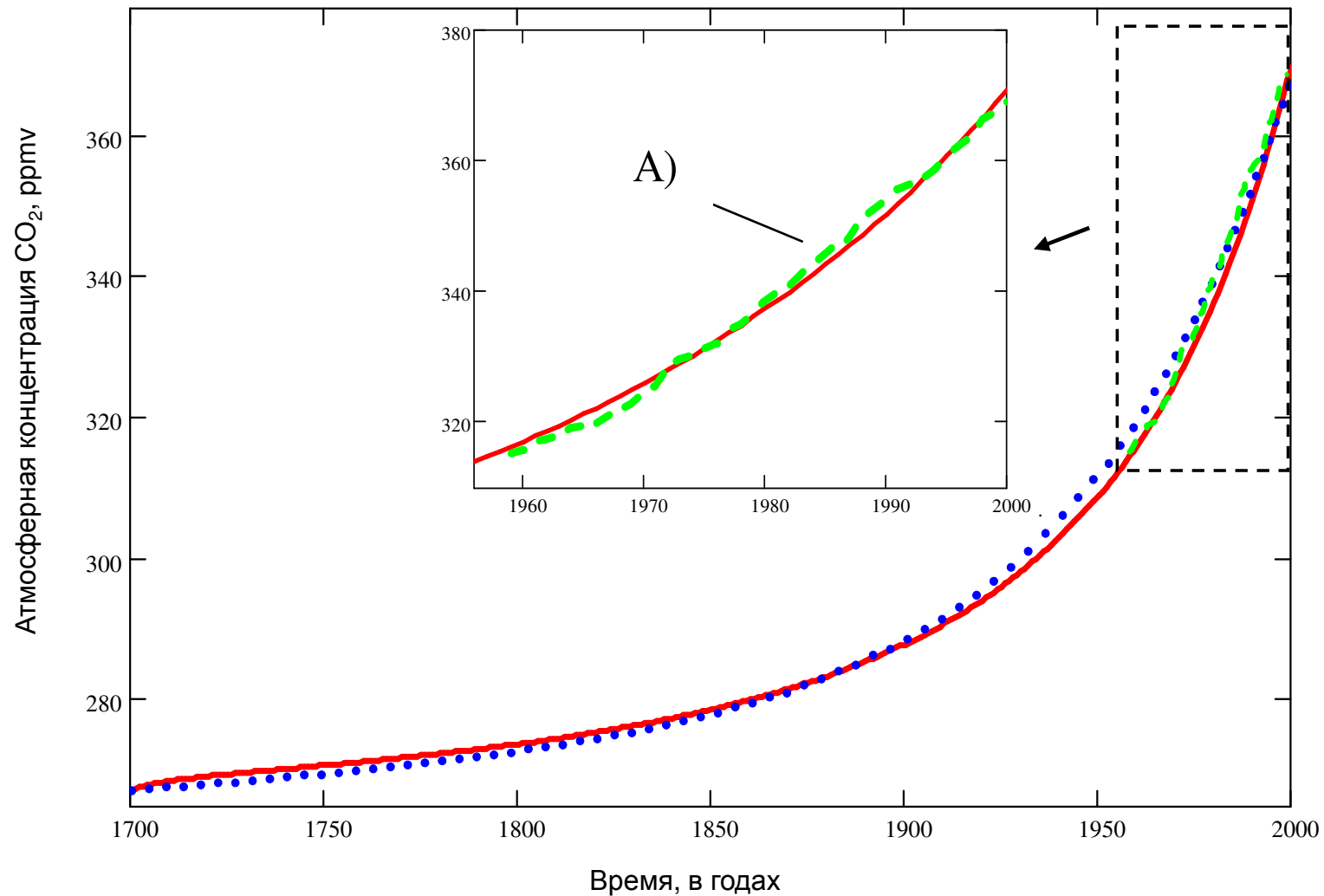


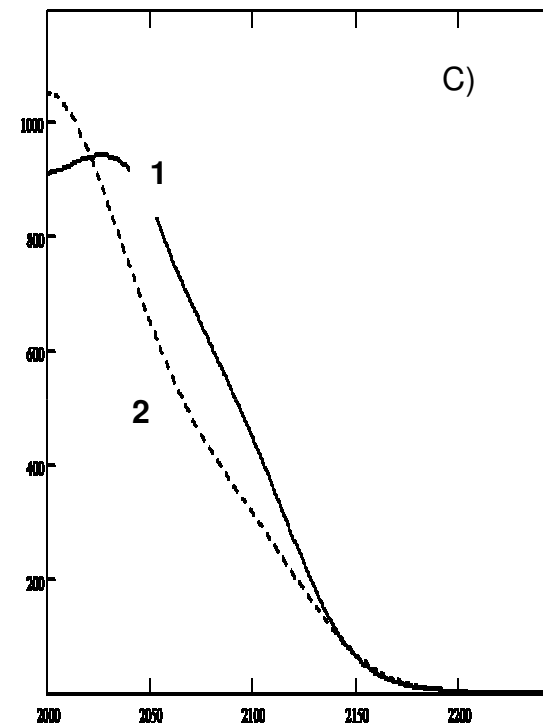
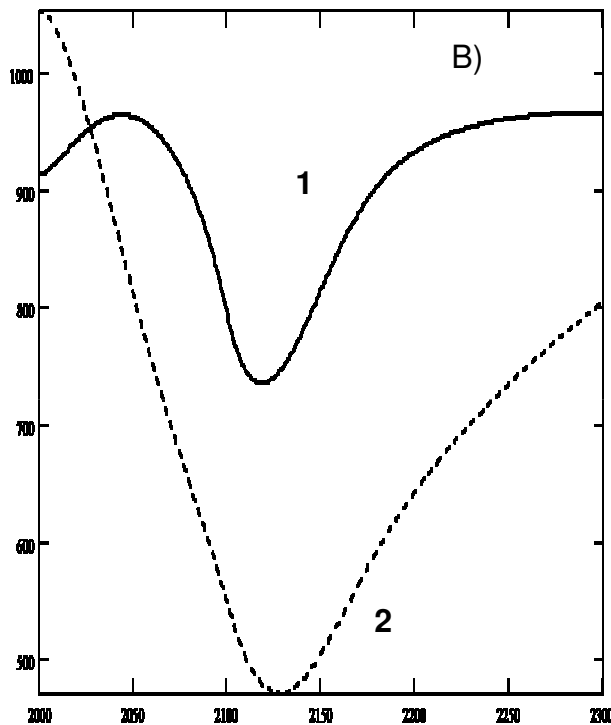
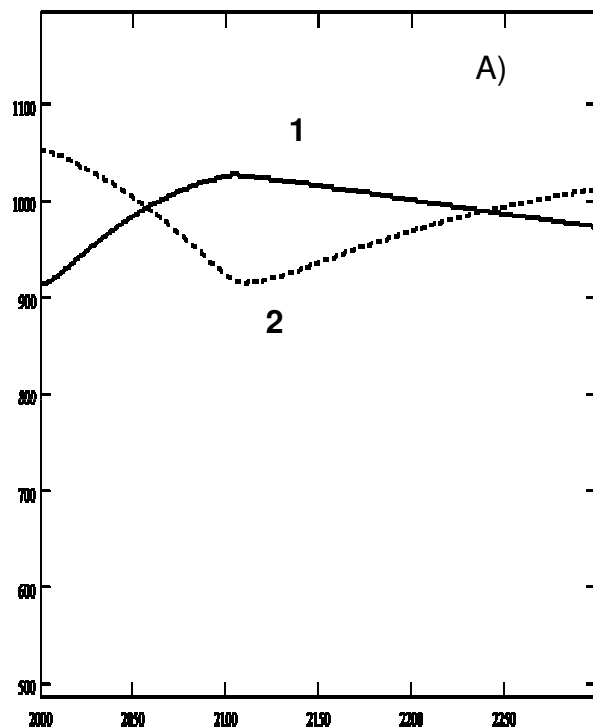
Схема круговорота углерода, которая использовалась для создания объединённой минимальной модели «наземная биота-атмосфера-океан».

РЕЗУЛЬТАТЫ ВЕРИФИКАЦИИ «ОБЪЕДИНЁННОЙ» МИНИМАЛЬНОЙ МОДЕЛИ



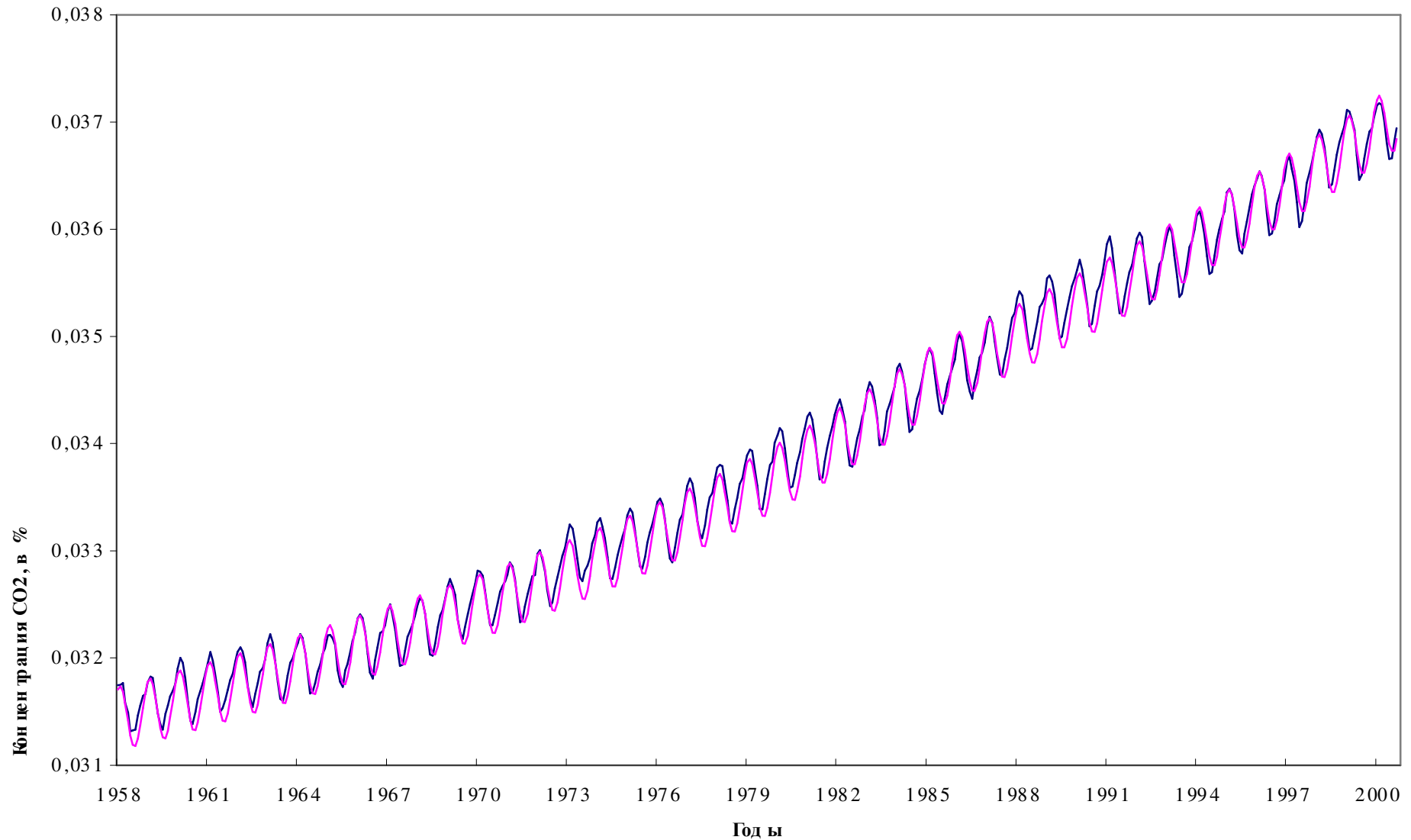
Сравнение данных наблюдений и вычислительных экспериментов по динамике углекислого газа. Вставка А) - фрагмент сравнения с данными Мауна-Лоа.

РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ «ОБЪЕДИНЁННОЙ» МИНИМАЛЬНОЙ МОДЕЛИ



Варианты сценариев развития биосферы при различных значениях чувствительности климата – параметр T_{del} . Графики соответствуют следующим значениям) T_{del} : А) – 2°C ; В) – 4.5°C ; С) – 6°C . В последнем случае "дата необратимости" – 2054 год. На графиках: 1 – биомасса; 2 – мертвое органическое вещество

Сравнение результатов моделирования сезонной динамики CO₂ (фиолетовая линия) с данными Мауна-Лоа (голубая линия)



Оценка вклада морской биоты в сезонную динамику CO₂

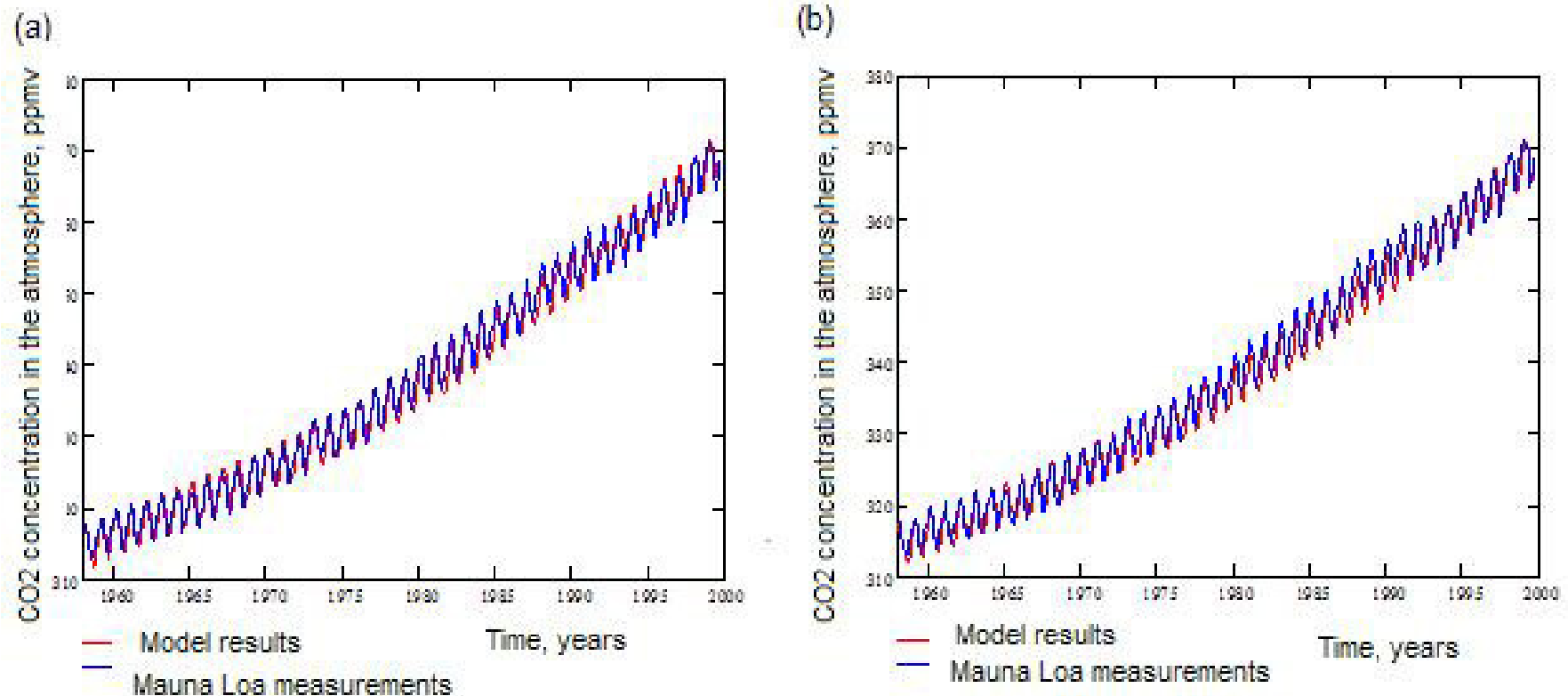
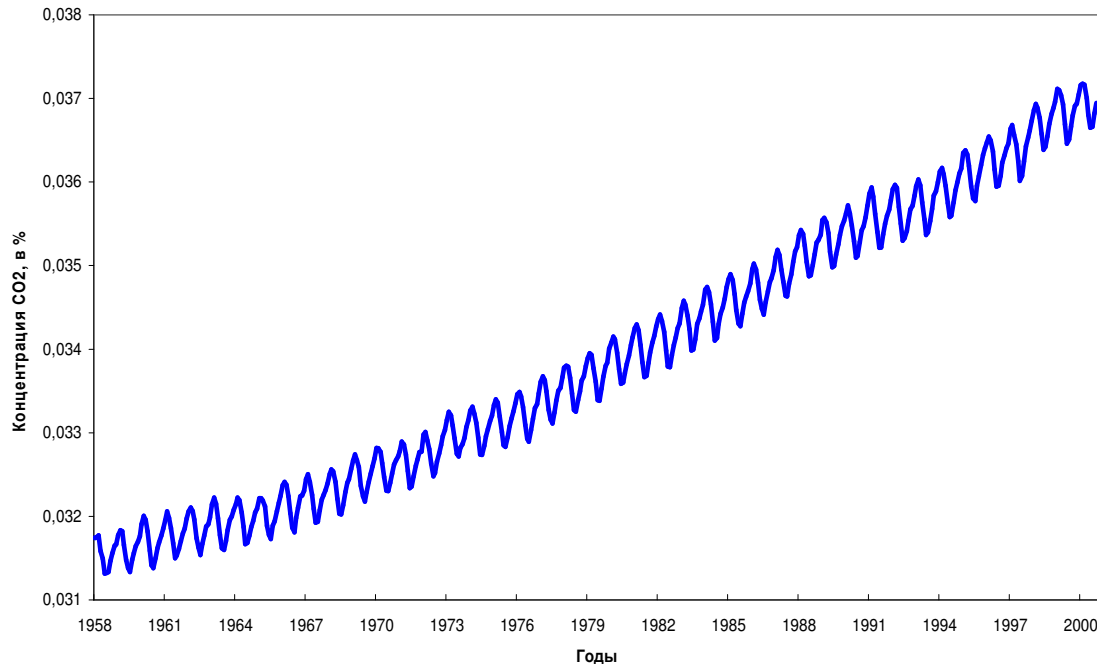


Fig. 12.34. Comparison of the work of two models: (a) – the model of seasonal dynamics without taking marine biota into consideration, (b) – seasonal model taking into consideration the effect of marine biota.

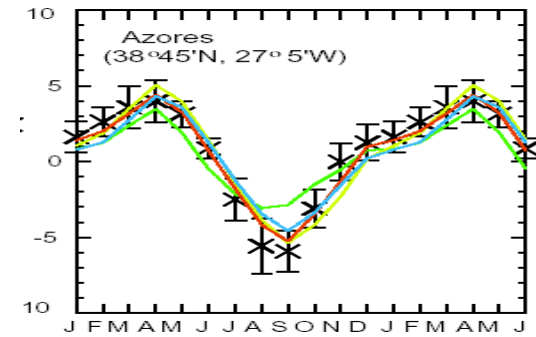
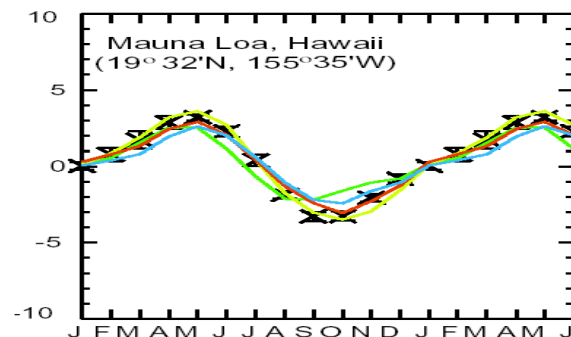
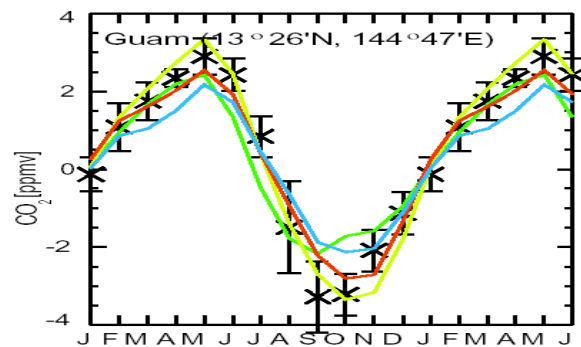
Data for the model verification

Данные измерений сезонной динамики концентрации CO₂ (в %), Мауна-Лоа, Гавайи

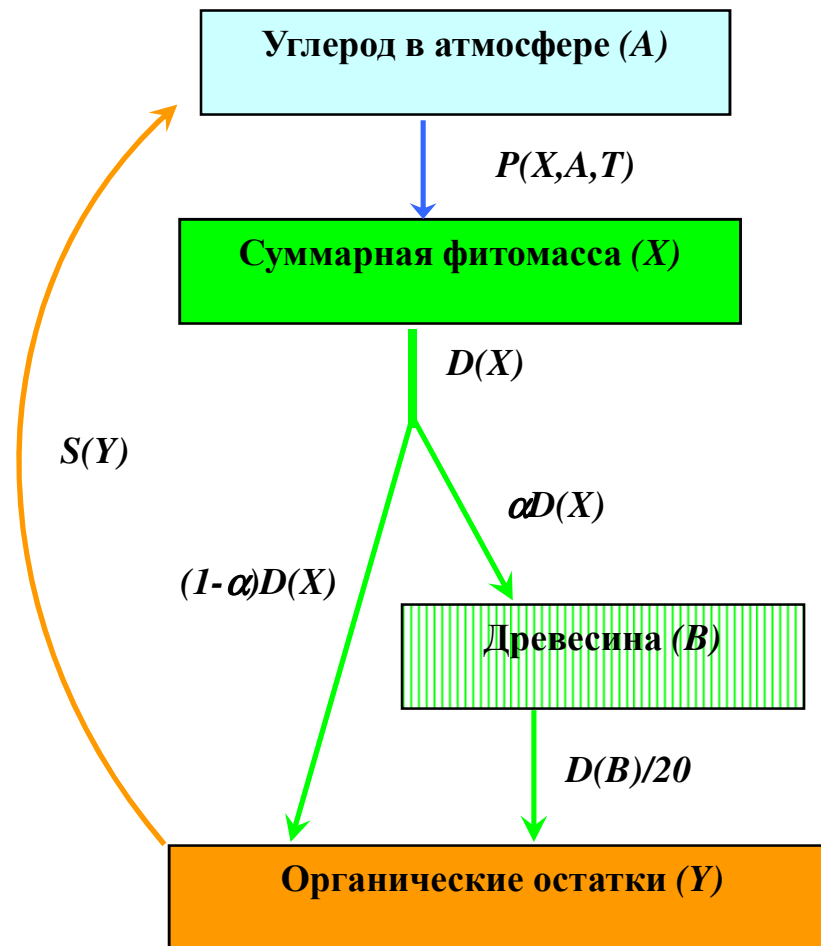


The Mauna-Loa data are chosen due to:

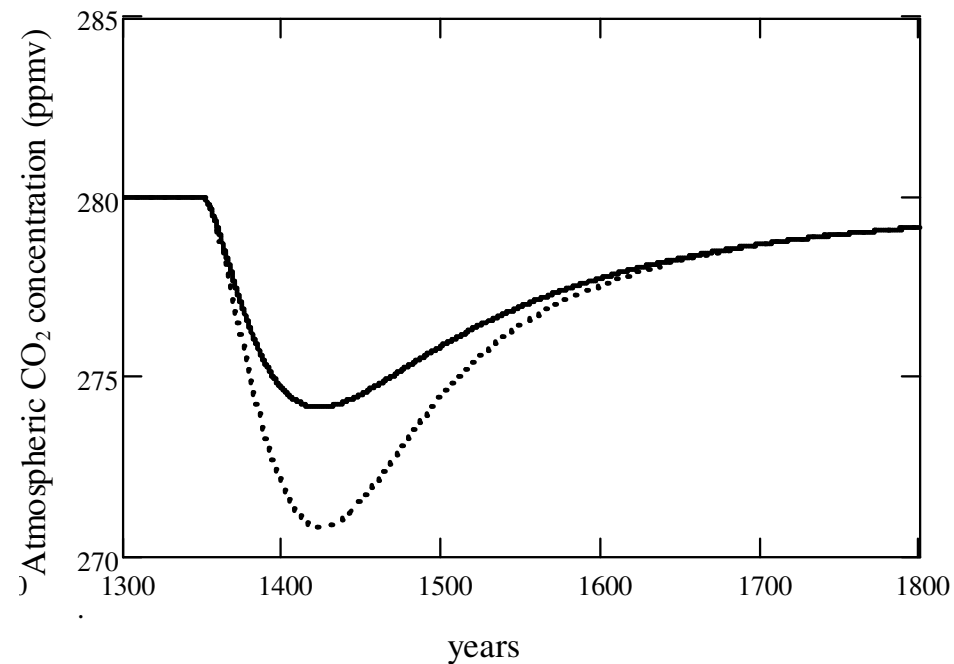
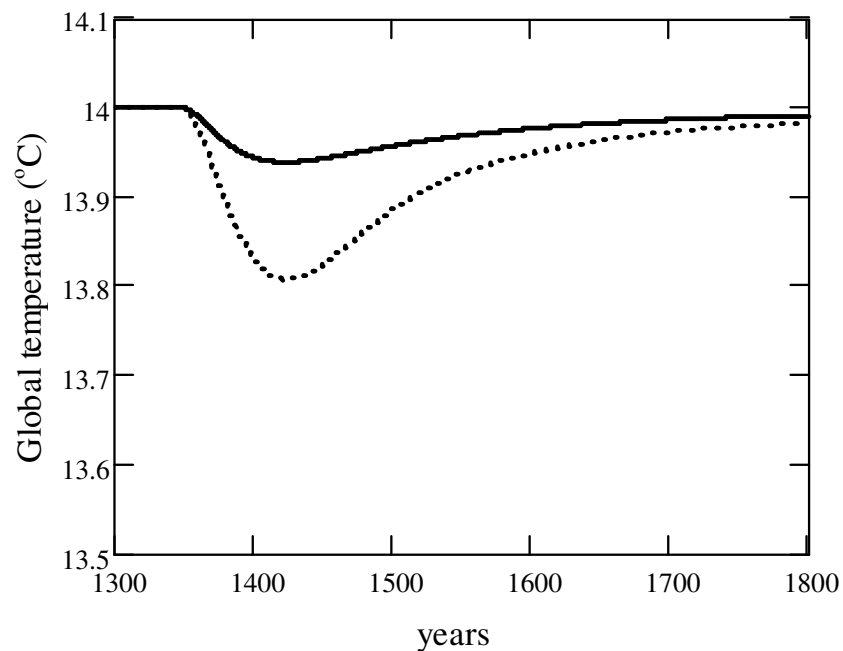
- long duration (since 1958)
- are in wide use by scientists.



Data on CO₂ dynamics taken from different sources are in a good agreement with Mauna-Loa data



Уточненная схема потоков углерода в модели, описывающей малый ледниковый период.

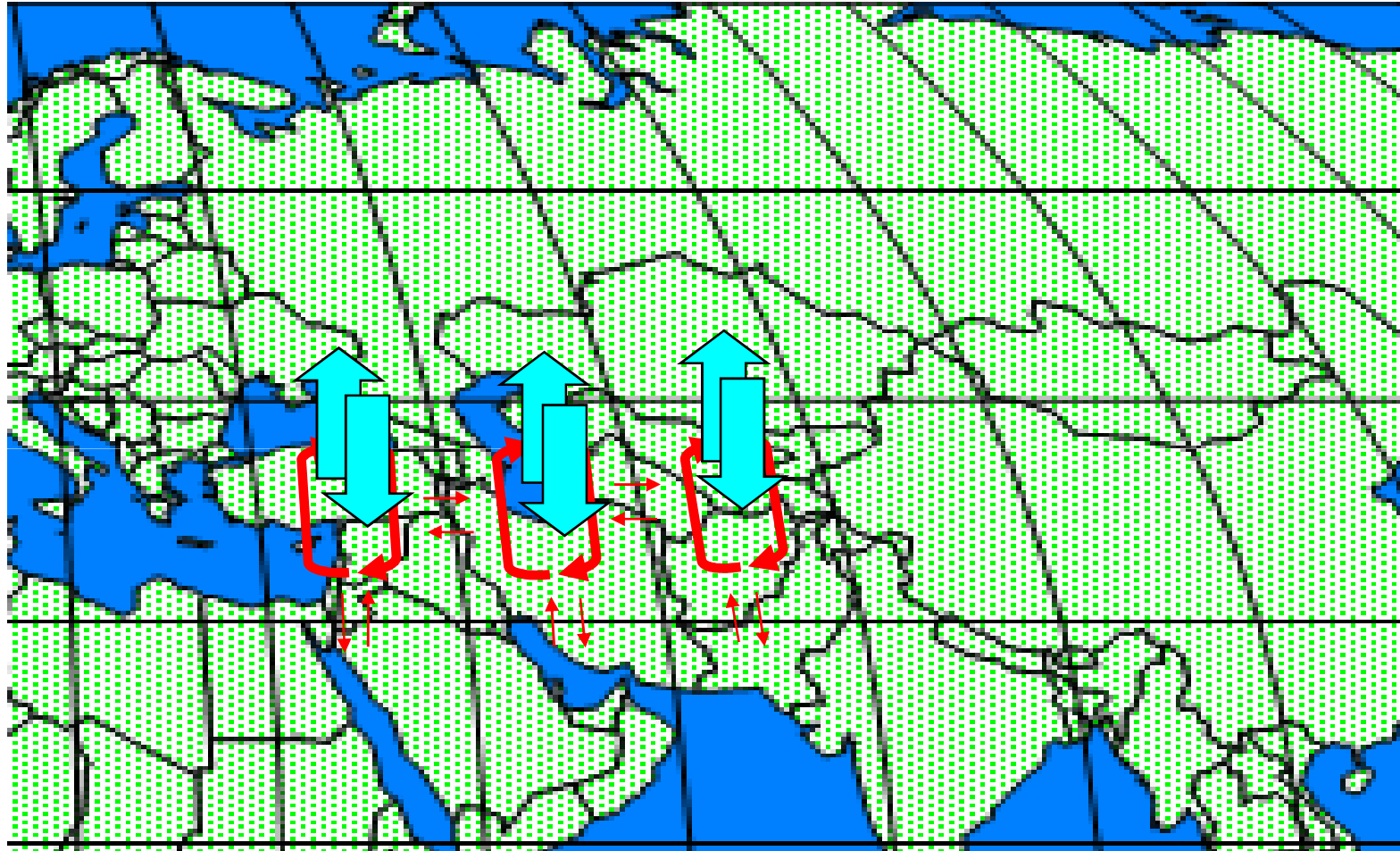


Динамика глобальной температуры и атмосферной концентрации CO₂ при рефорестеризации сельхозугодий. Сплошная линия соответствует $T_{del}=2^\circ\text{C}$, пунктирная - $T_{del}=4^\circ\text{C}$.

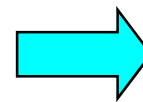
Задачи

- 1) Разработка формальной методики построения минимальных моделей на основе принципа наихудшего сценария.**
- 2) Построение обоснованной процедуры суммирования «клеток» биосферы.**
- 3) Выяснить, что означает представимость наблюдаемой биосферной динамики минимальной моделью, построенной на принципе наихудшего сценария.**

Почему можно просто суммировать вклад клеток



- потоки лимитирующих веществ;



- потоки O₂-CO₂

Представляется, что гораздо лучше, когда отношение участников проекта друг к другу носит явно **потребительский** характер. Поэтому лучше, когда участники сформулируют свои запросы к другим в явном виде.

Для организации эффективного взаимодействия большого количества участников представляется полезным сгруппировать их по какому-либо критерию, имеющему отношение к выполнению проекта. Предложенное в заявке распределение по блокам указывает на предмет исследования и группирует специалистов сходного профиля. Однако более подходящим критерием, имеющим самое прямое отношение к выполнению проекта, представляется распределение участников по типу взаимодействия со **стягом** проекта (центральной задачей, вокруг которой проект формировался). При этом наблюдается частичное соответствие нового разбиения заявленным в проекте блокам.

Блок оценки фитомассы и чистой первичной продукции (спутниковые и наземные данные) и ее естественной и антропогенной трансформации: (ИБФ; ИПА; ЦСБС; ИВМ, СФУ).

Блок моделирования и верификации динамики углерода в экосистемах Сибири: (ИВТ, ИБФ; ИГ; ИЦиГ; ИУУ; ИМКЭС, СФУ).

Блок глобального моделирования динамики углерода с учетом наземной и океанической экосистем: (ИБФ; НГУ).

Блок реконструкции экосетей бореальных лесов и сопутствующих экосистем: (ИЦиГ).

Блок информационно-аналитической поддержки: (ИВТ; ИЦиГ; ИВМ).

Распределение заявленных в проекте задач по типу взаимодействия со стягом проекта (центральной задачей).

Группа задач прогноза динамики системы "биосфера-климат" с помощью глобальной минимальной модели. (Блок глобального моделирования динамики углерода с учетом наземной и океанической экосистем):

Центральная задача: Построение сценариев развития системы «биосфера-климат» с выбором наилучшего из них, для оценки глобального экологического риска при различных вариантах ресурсопотребительской стратегии человечества (ИБФ).

1. Построение серии обоснованных минимальных моделей глобального цикла углерода в системе «биосфера-климат» с различными вариантами обратных связей вида «климатические изменения – углеродный цикл – климатические изменения» (ИБФ, СФУ).

12. Создание серии прогнозных моделей «растительный покров-климат» для предсказания глобальной динамикой углерода (ЦСБС).

Этот пункт возник в последний момент и не у нас. Какое отношение он имеет к моделированию биосферы и какими средствами будет выполняться из задела ЦСБС не ясно.

Группа задач построения и проверки описания локальных экосистем, решение которых создает основу построения адекватной глобальной модели, которая, вследствие своего кросс-верификационного потенциала, выступает как испытательный стенд проверки адекватности описания локальных экосистем.

3. Кросс-верификация оценок чистой первичной продукции, полученным по космическим снимкам, с данными полевых измерений в контексте глобальной динамики CO₂ в атмосфере (СФУ, ИЛ, ИБФ).

4. Моделирование сезонных изменений потока углерода через бореальные леса, являющиеся главными источниками сезонных изменений и наземными аккумуляторами углерода. Оценка вклада бореальных лесов в биосферную динамику углерода (ИВМ, ИЛ, ИБФ).

5. Калибровка локальной сезонной и поширотной модели почвенного дыхания на основе цифровых карт почв Сибири. Построение глобальной карты почв (путем экстраполяции) для оценки глобальной сезонной динамики почвенного дыхания (ИПА, ИВТ, ИБФ).

6. Сопоставление динамики климатических характеристик с динамикой баланса углерода в прошлом и оценка обратного влияния изменений в биоте на климатические характеристики. Прогноз возможных изменений системы климат-биосфера с учетом обратного влияния биоты (ИМКЭС, ИВТ, ИБФ, НГУ, ИЛ).

Группа задач оценки возможного отклика экосистем на антропогенные и климатические воздействия. Решение этих задач крайне важно для прогноза эффектов глобальной модели, но вклад глобальной модели в решение данных задач незначителен.

7. Оценка отклика локальных (бореальных) экосистем и биосферы в целом на изменения состава газовых примесей при масштабных пожарах и промышленных выбросах с учетом влияния аэрозолей на ЧПП и на баланс потоков углерода в целом (ИЛ, ИВТ, ИУУ, ИБФ).

8. Оценка влияния изменений показателей функционирования экосистем, сопровождающих смещение зональных и высотно-поясных границ таежных ландшафтов вследствие глобального изменения климата на глобальный баланс углерода (СФУ, ИЛ, ИГ, ИБФ, НГУ).

9. Оценка изменений бюджета углерода при изменении типов экосистем вследствие климатически обусловленного смещения границ биоценов с помощью ординационных моделей связей биотических, биокосных и абиотических компонентов экосистем и выявления ведущих факторов внешней среды (ЦСБС, ИВТ, ИБФ). **(подобны, в чем различие?)**

10. Прогноз возможных изменений, предшествующих сукцессионным и филоценогенетическим процессам, в балансе углеродных потоков в биомах в ответ на климатические изменения (ИЦиГ, ИБФ, НГУ).

11-12. Создание серии мелкомасштабных пространственно-временных картографических моделей экосистем как основы оценки изменений бюджета углерода и моделирования бореальной зоны. Верификация полученных моделей на отдельных типах экосистем различного порядка (ЦСБС, СФУ, ИЛ, ИБФ, ИГ).

Группа задач интеграции, обработки и визуализации климато-гео-экологических данных. *(Блок информационно-аналитической поддержки).*

14. Приведение структур имеющихся баз данных к современным стандартам представления метаданных, разработка модулей визуализации и статистического анализа содержимого баз данных в рамках распределенной ГИС ИВТ СО РАН. (ИВТ, ИПА, ЦСБС).

15. Комплексный анализ пространственных данных с помощью технологий Data Mining. Интеграция созданных информационных ресурсов в единую среду (ИВТ, ИВМ).

Задачи первого этапа (2009 год).

Задача прогноза динамики системы "биосфера-климат" с помощью глобальной минимальной модели.

Отработка оптимальной процедуры ландшафтно-широтного суммирования пространственно распределенных компонентов биосферы при инкапсуляции компонентов биосферы (ИБФ).

Задачи построения и проверки описания локальных экосистем.

Кросс-верификация оценок чистой первичной продукции, полученных по космическим снимкам, с данными полевых измерений в контексте глобальной динамики CO₂ в атмосфере (ИЛ и ИБФ).

Обобщение данных по площадям основных типов лесных экосистем Средней Сибири (ИЛ).

Верификация математической модели распределения углерода в атмосфере по данным высотной мачты (ИБФ, ИВМ, ИЛ, СФУ).

Верификация по базе данных математической модели бореального леса, адаптированной под условия Восточной Сибири (ИБФ).

Задачи оценки возможного отклика экосистем

Разработка модели с пространственно-распределенными параметрами в виде сети клеточных автоматов, имитирующей картографическую структуру территории Юга Восточной Сибири. Геоинформационное картографирование динамики географических условий и состояния фаций (ИГ).

Адаптация информационно-компьютерного ресурса EcoNet для описания экосетей бореальных лесов и сопутствующих экосистем. Создание онтологии элементарных объектов и элементарных связей, лежащих в основе бореальных экосистем. Построение описания сети взаимодействий (экосети) экосистем различного уровня иерархии и описание их микро- и макродинамика для ряда сценариев изменения климата. Адаптация алгоритмов моделирования и анализа графа для исследования таких сетей взаимодействий (ИЦиГ, ИЛ, ИВТ).

Вычисление пространственно-временного поведения климатических характеристик, контролирующего развитие бореальных экосистем и процессов их газообмена с атмосферой (ИМКЭС).

Задача интеграции, обработки и визуализации климато-гео-экологических данных.

Представление базы данных «Запасы растительного вещества в экосистемах Сибири» (ИВТ, ИПА).

Создание открытой коллективной экспертно-аналитической ГИС «Пространственно-временная организация экосистем северной Азии» (ЦСБС, ИВТ).

Создание базы данных по натурным характеристикам компонентов бореального леса в контрольной зоне и по динамике распределения атмосферных газов (ИБФ, ИВМ, ИЛ).

Создание баз данных по консументам и оценка их роли в динамике углерода в основных наземных и водных биомах мира (НГУ).

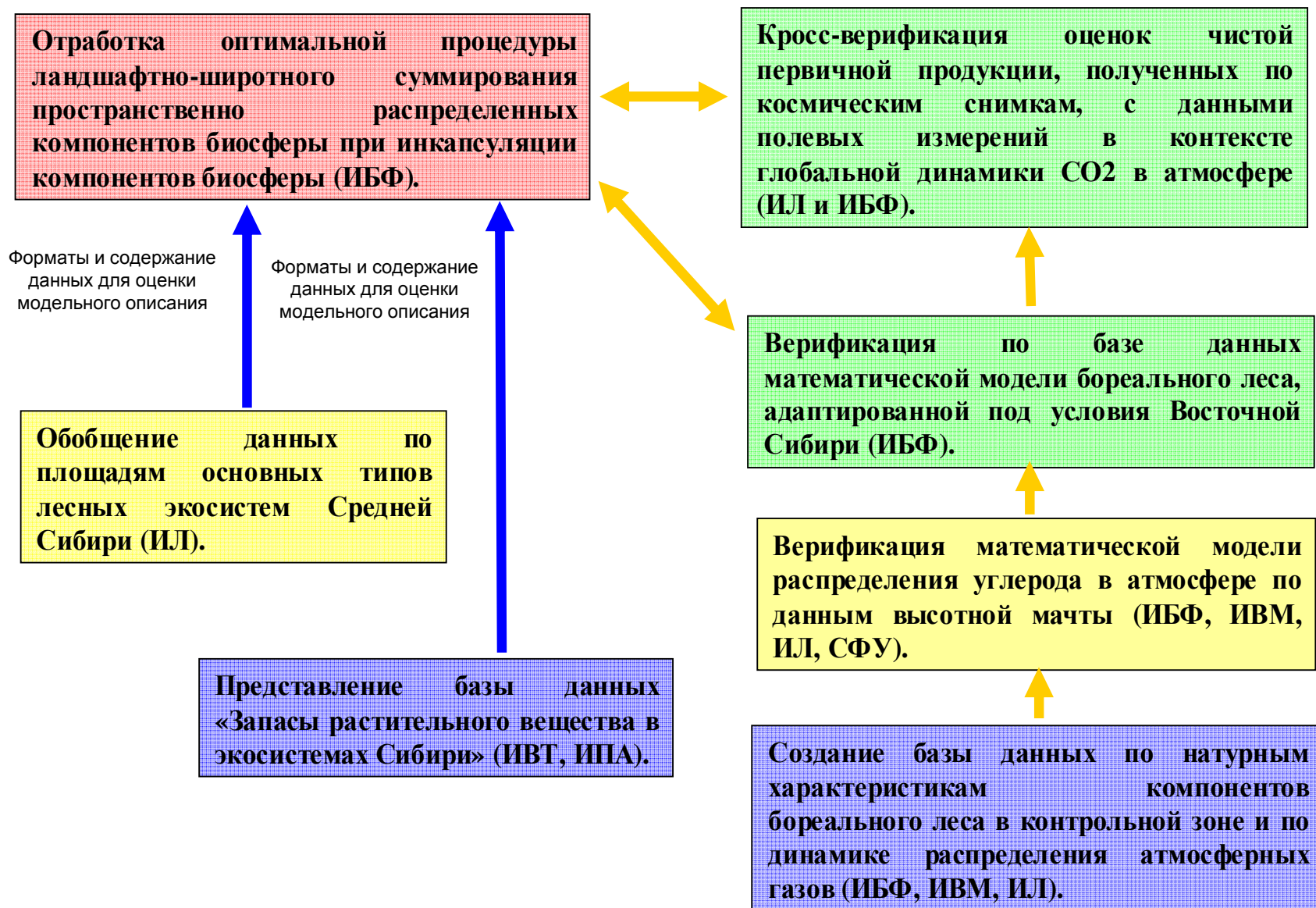
Отработка методологии создания тематических актуальных и прогнозных картографических моделей пространственной организации и динамики экосистем на основе современных методов дешифрирования космической информации на эталонных территориях и в целом на территории Северной Азии (ЦСБС, ИВТ).

Организационно-техническая задача: согласование форматов баз данных.

Схема взаимодействия групп задач (цвет на обеих диаграммах указывает на принадлежность к группе).



Информационные зависимости задач, решаемых ИБФ на первом этапе (2009 г.)



**БЛАГОДАРЮ
ЗА
ВНИМАНИЕ!**