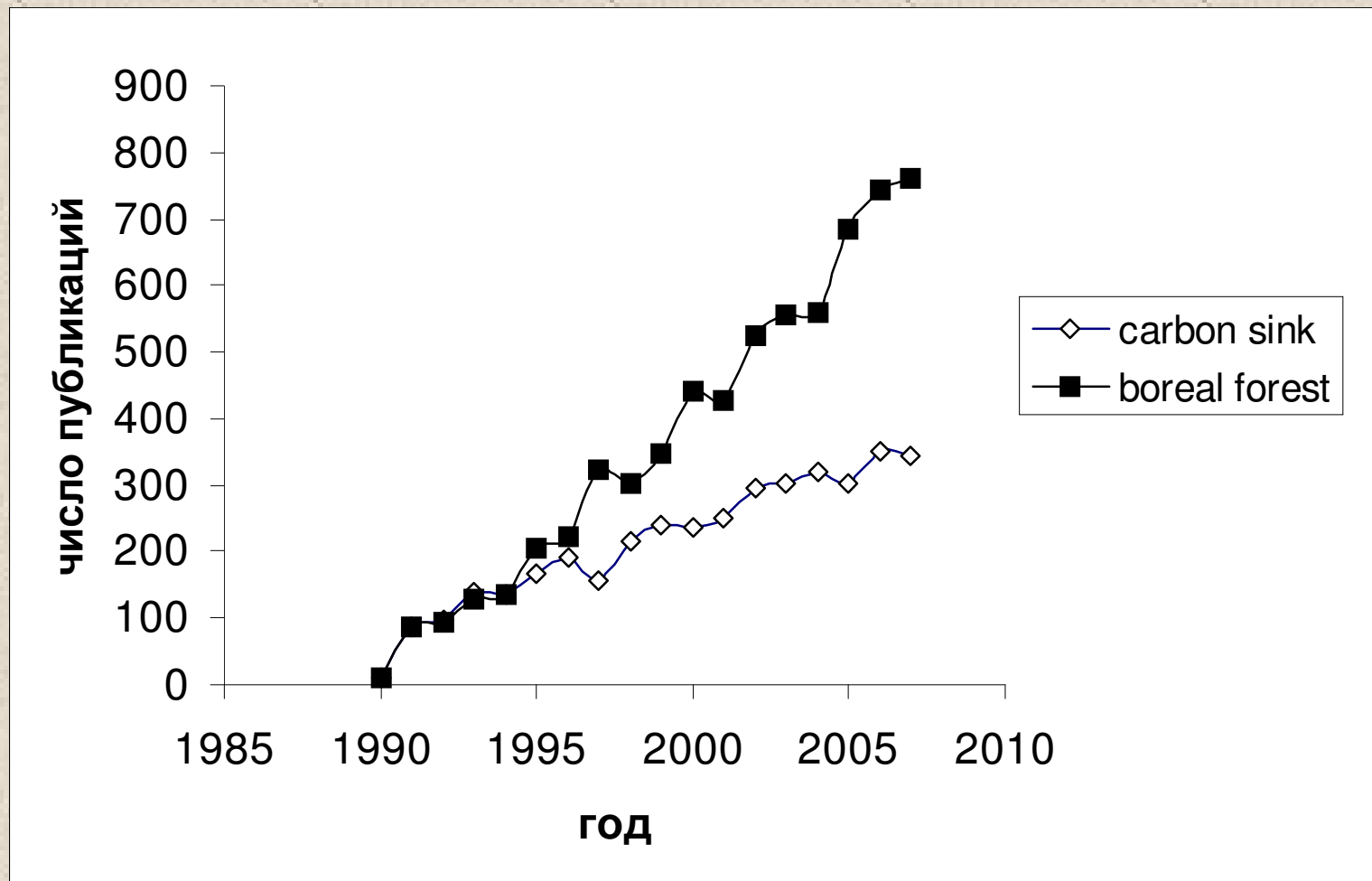


**Математическое  
моделирование ценоза  
бореальных лесов Восточной  
Сибири**

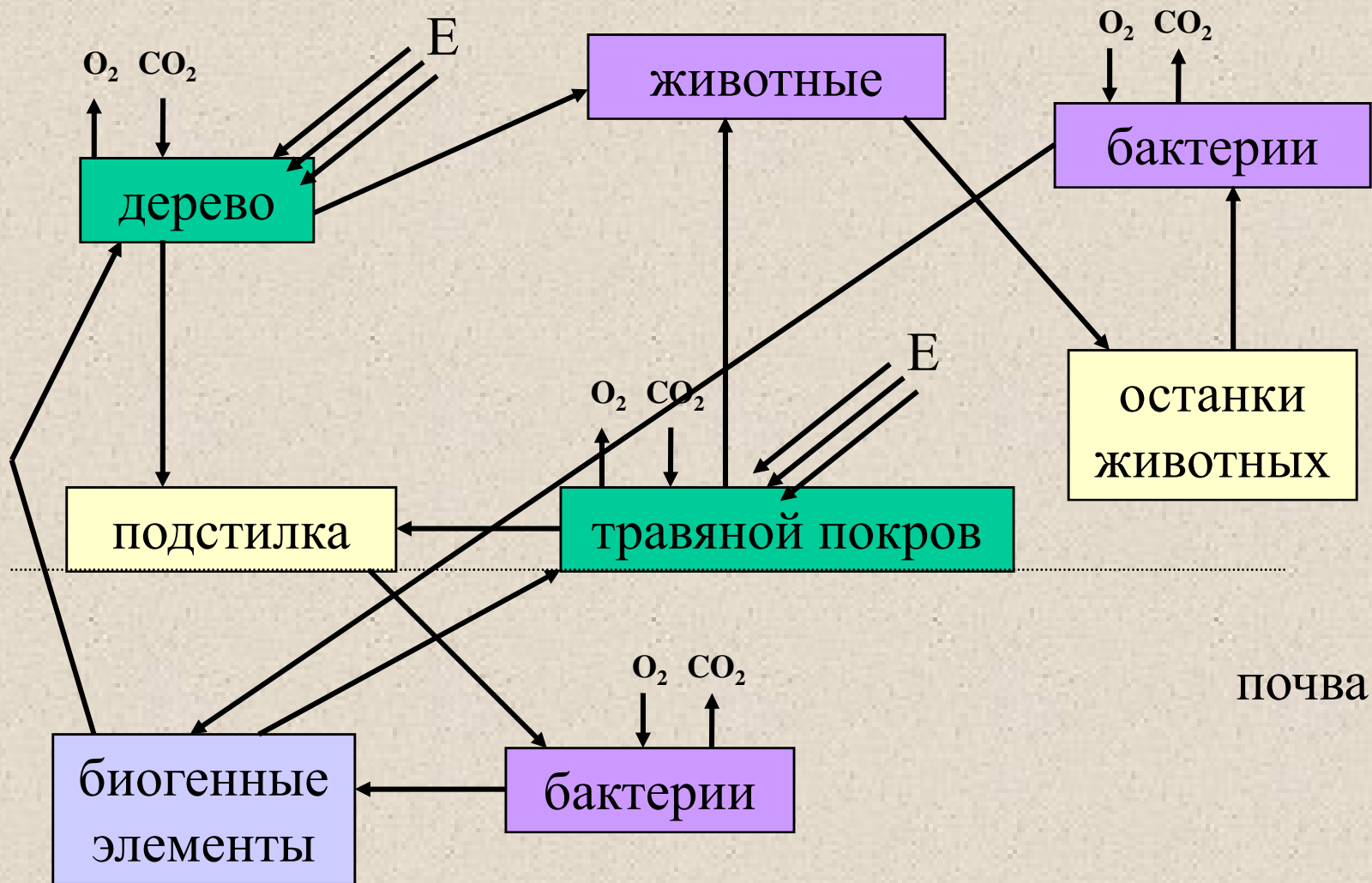
*Бархатов Юрий Валериевич*  
**(ИБФ СО РАН)**



Динамика роста числа публикаций по ключевым словам «сток углерода» и «бореальные леса» (по базе данных ISI)

Задачи моделирования бореальных лесов Сибири:

- определение углеродного баланса в экосистеме Северной Евразии. Возможность расширения модели на экосистемы соответствующей группы (Евразия, Северная Америка).
- изучение направленности и интенсивности круговоротов лесных экосистем в меняющемся климате, количественная оценка круговоротов с определением, какие из них и в каких условиях становятся источниками или остаются аккумуляторами тепличных газов
- оценка буферной роли природных экосистем по основным биогенным элементам для обширных территорий Сибири и способность поглощения углерода сибирскими лесами и болотами.



Блок-схема математической модели ценоза бореального леса Каждый из блоков модели в свою очередь может представлять собой сложную структуру – субмодель.

Используются дифференциальные уравнения вида

$$\frac{dX_n}{dt} = F(X_1, \dots, X_n, \dots, X_m)$$

где -  $X_n$  одна из переменных экосистемы

Зеленая фитомасса

$$\frac{dX_1}{dt} = X_1(\mu_{X_1} - \sigma_{X_1}) - \frac{\mu_{A_1} A}{Y_{X_1}}$$

$$\mu_{X_1} = \begin{cases} R(at^2 + bt + c) \cdot \frac{1}{1 - K_T (|T - T_{opt}|)} \cdot \frac{1}{1 - K_W (|W - W_{opt}|)} \cdot \frac{1}{1 - K_E (|E - E_{opt}|)} \\ 0 \end{cases}$$

t – время, прошедшее с начала вегетативного сезона, T – температура, W – влажность, E - освещенность

## Нефотосинтезирующая фитомасса

$$\frac{dX_2}{dt} = X_1 \mu_{X_2}$$

$$\mu_{X_2} = \frac{\hat{\mu}_{X_2} N}{N + K_N}$$

Древесина

$$\frac{dX_3}{dt} = \begin{cases} 0 \\ X_2 \quad t = t_{end} \end{cases}$$

Трава

$$\frac{dG}{dt} = G(\mu_G - \sigma_G) - \frac{\mu_{A_2} A}{Y_G}$$

$$\mu_G = \begin{cases} R_G (a_1 t^2 + b_1 t + c_1) \cdot \frac{1}{1 - K_{T1} (|T - T_{opt1}|)} \cdot \frac{1}{1 - K_{W1} (|W - W_{opt1}|)} \cdot \frac{1}{1 - K_{E1} (|E - E_{opt1}|)} \\ 0 \end{cases}$$

Подстилка

$$\frac{dP}{dt} = -\frac{\mu_{B_2} B_2}{Y_P}$$

Гетеротрофы

$$\frac{dA}{dt} = A(\mu_A - \sigma_A)$$

$$\mu_A = \mu_{A1} + \mu_{A2}$$

$$\mu_{A1} = \alpha_1 \hat{\mu}_{A1} \frac{X_1}{X_1 + K_{X1}}, \quad \mu_{A2} = \alpha_2 \hat{\mu}_{A2} \frac{G}{G + K_G}$$

$$\alpha_1 = \frac{1}{A} \cdot \frac{X_1}{X_1 + K_{X1}}, \quad \alpha_2 = \frac{1}{A} \cdot \frac{G}{G + K_G}, \quad A = \frac{X_1}{X_1 + K_{X1}} + \frac{G}{G + K_G}$$

Останки гетеротрофов

$$\frac{dD}{dt} = A\sigma_A - \frac{\mu_D B_1}{Y_D}$$

Бактерии 1

$$\frac{dB_1}{dt} = B_1(\mu_{B1} - \sigma_{B1})$$

$$\mu_{B1} = \hat{\mu}_{B1} \frac{D}{D + K_D}$$

Бактерии 2

$$\frac{dB_2}{dt} = B_2(\mu_{B2} - \sigma_{B2})$$

$$\mu_{B2} = \hat{\mu}_{B2} \frac{P}{P + K_P}$$

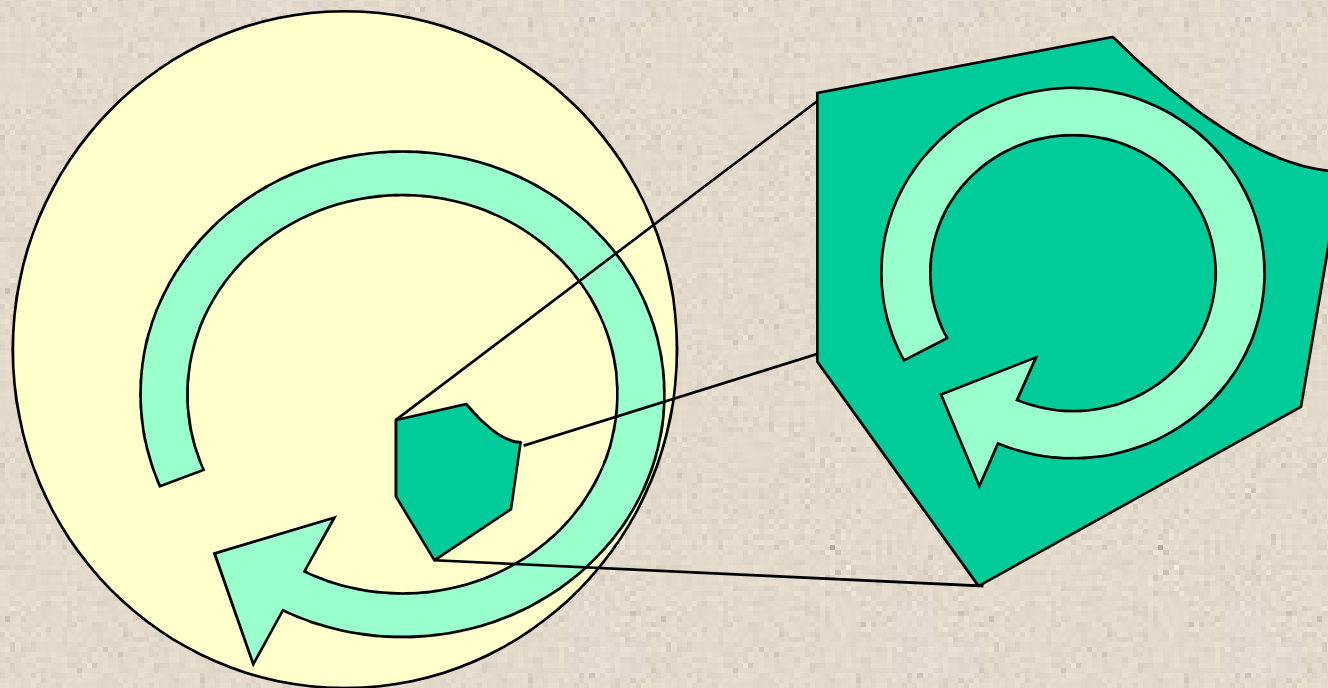
Азот

$$\frac{dN}{dt} = -\frac{X_1 \mu_{X2}}{Y_N} + \alpha_{B1}^* \left( \frac{1}{Y_D} - 1 \right) \mu_D B_1 + \alpha_{B2}^* \left( \frac{1}{Y_D} - 1 \right) \mu_P B_2$$

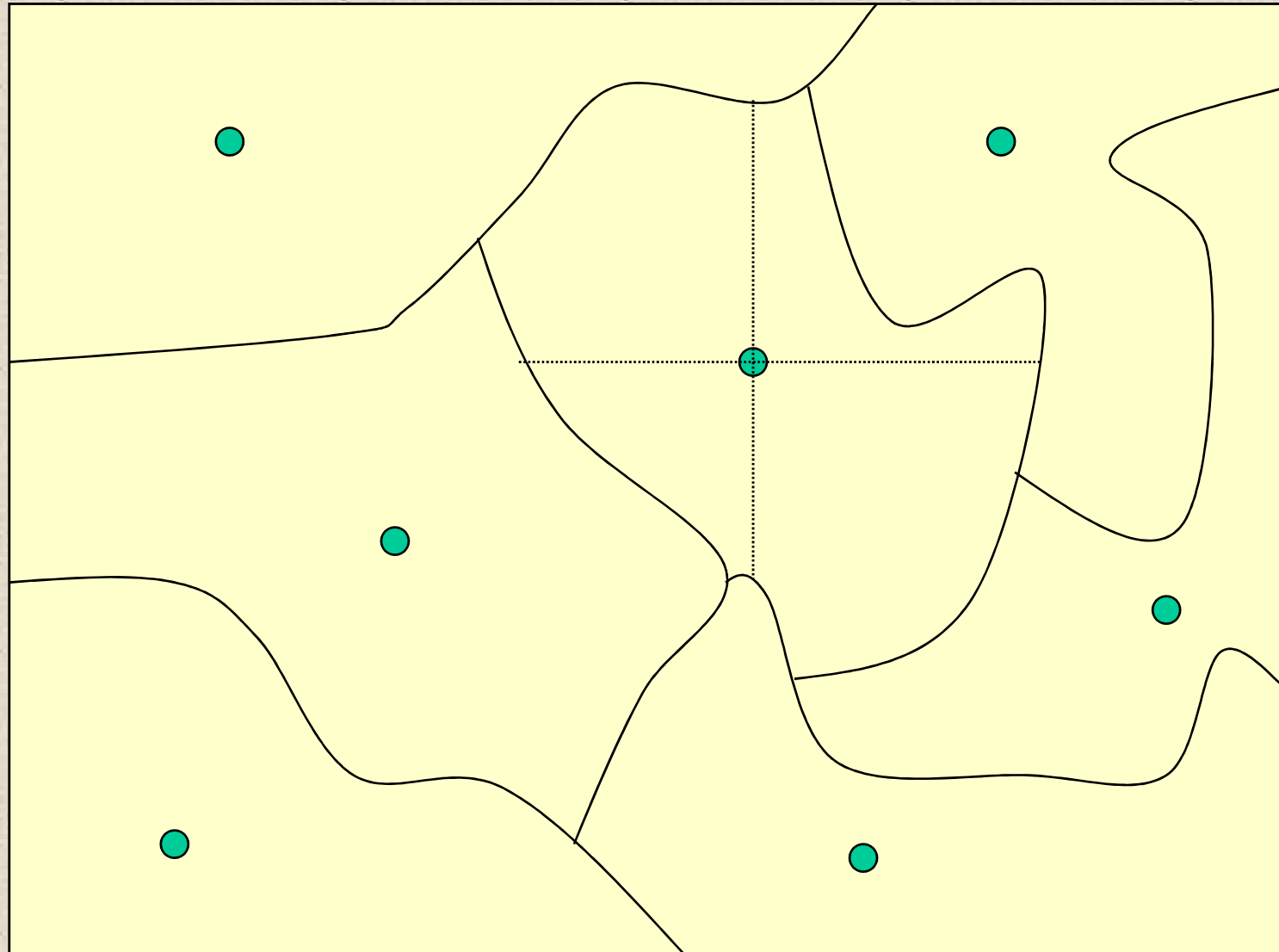
Традиционным подходом для глобальных вегетационных моделей является так называемый "клеточный" (cell grid) метод. В представляемой модели используется более простой в техническом плане, но не менее действенный метод. Этот метод основан на разделении рассматриваемого региона на компартменты, однородные по своим структурно-функциональным характеристикам (биоценозы), и каждый из этих компартментов будет рассматриваться как единое целое. Моделирование компартмента-биоценоза происходит при помощи обыкновенных дифференциальных уравнений. Число компартментов и границы между ними определяются путем анализа баз данных по исследуемому региону - спутниковых и других. Подобный подход позволяет совместить как простоту описательной части, так и возможность глубокой проработки исследуемых процессов.



Данный метод предпочтительнее еще и потому, что имеет дело с реальным биологическим объектом – биоценозом, тогда как традиционные методы создают искусственную градиацию.

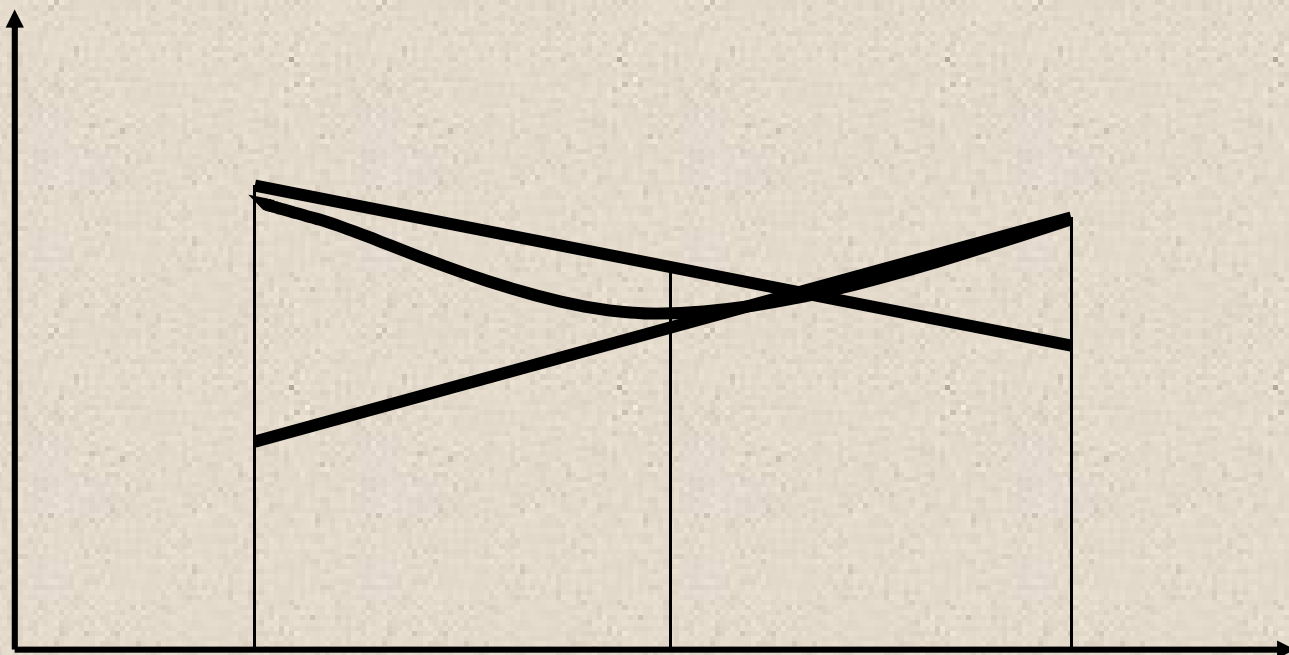


Биоценоз как условно независимая часть биосферы



Модельное представление биоценоза

Параметр X



расстояние

Центр биоценоза

границы биоценоза

Схема компарментов включает границы биоценозов, а также их условные центры. Модельный центр не обязательно физический центр компартамента-биоценоза, это точка, в которой значения определяющего компонента биоценоза равно среднему по всему биоценозу. Эта точка считается центром координат при определении координат всех других точек биоценоза (показано пунктирными линиями). Параметры, влияющие на динамику биомассы определяющего компонента биоценоза изменятся по отношению к центральной точке, т.е. имеется их градиент. Форма записи зависимости параметров может быть разной, в данном случае выбрана простая линейная (векторная) зависимость  $\overline{(x, y)}$ .

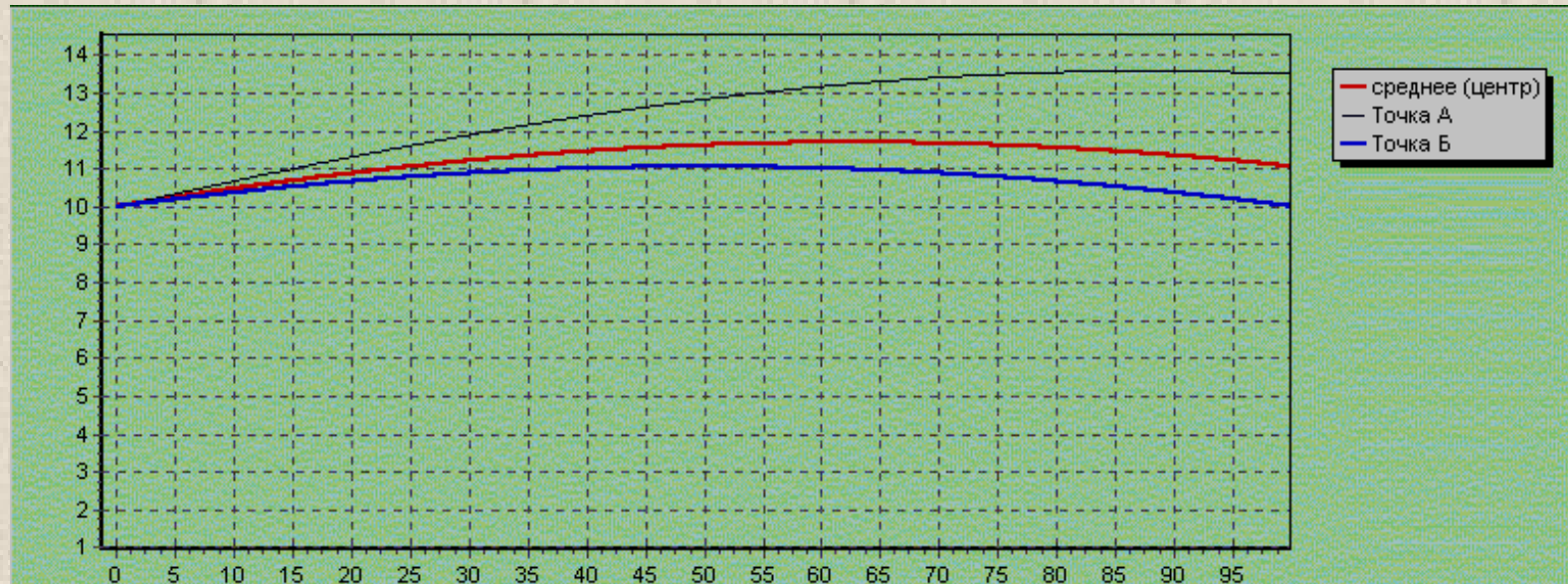
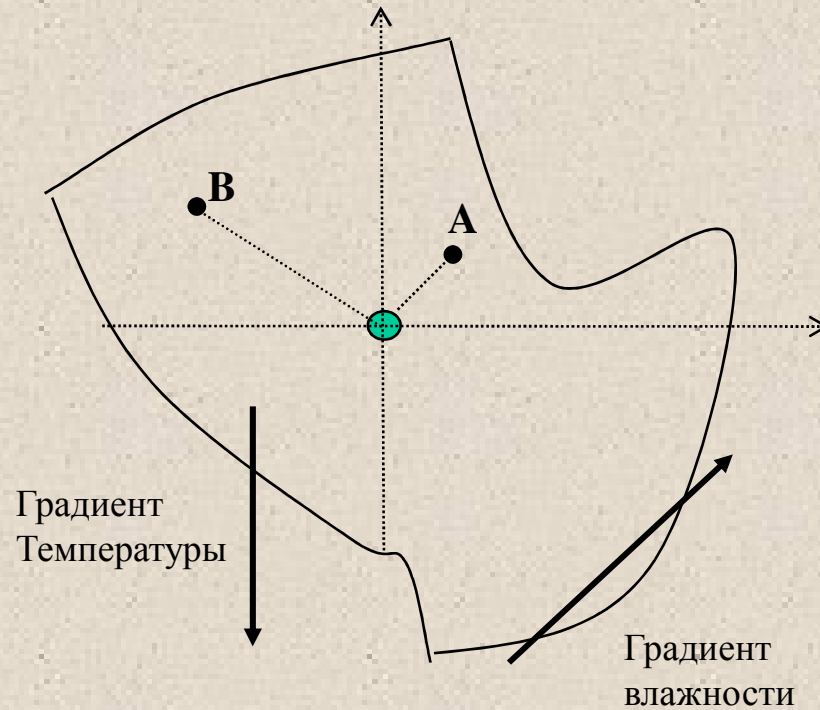
Имея два изменяющихся параметра (направление их векторов показано на рисунке), мы рассчитываем отклонение фитомассы в точках А и Б от средней. Таким образом можно рассчитать динамику любого компонента системы в любой интересующей нас точке.

# Расчет значений параметров экосистемы в любой точке

## компартамента

Пример расчета изменения фитомассы (условные единицы) при условии линейного изменения градиентов внешних условий для точек

$$A(x_1, y_1), B(x_2, y_2)$$



# Универсальная система для расчета экологических моделей (на основе MatLab)

Вывод результатов в виде зависимости одной переменной от другой

Главное меню и используемые файлы

Вывод результатов в табличном виде формата Excel

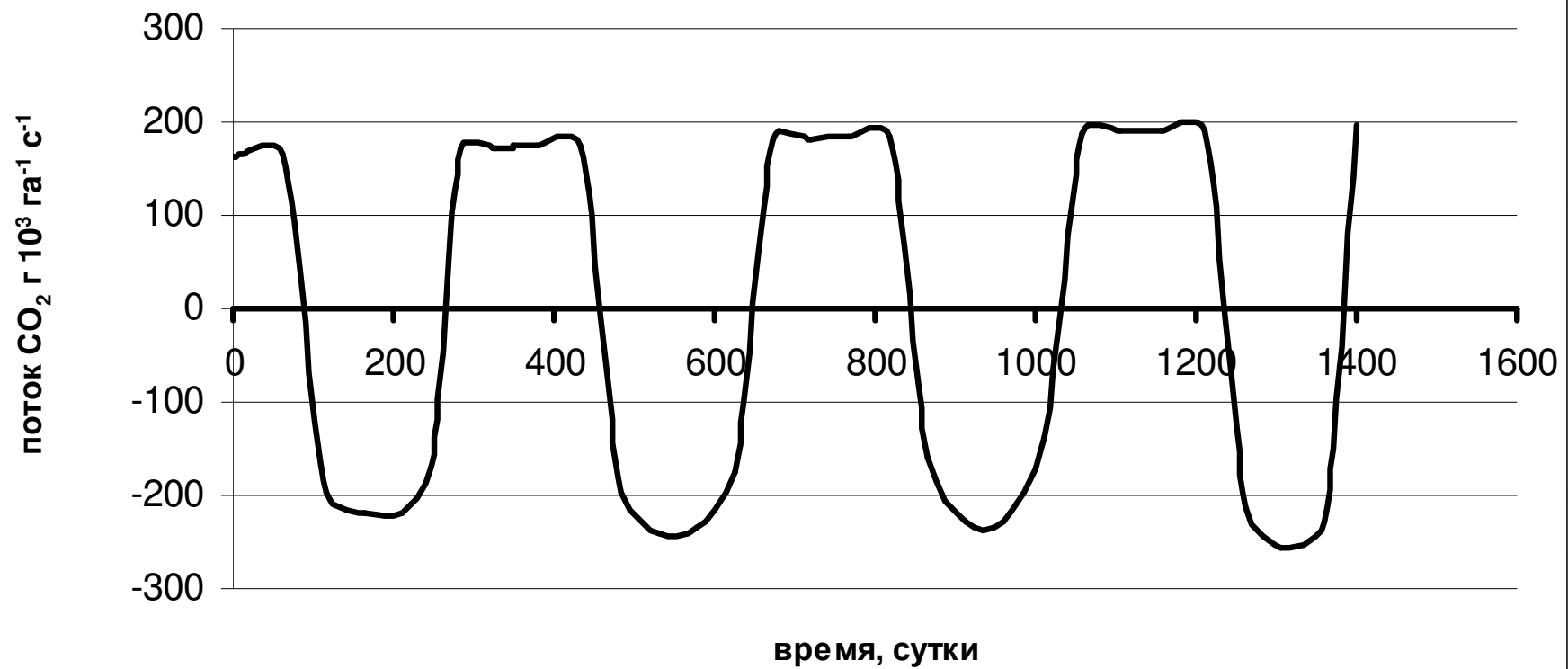
Ввод информации о модели – формулы, коэффициенты, параметры, начальные условия

Вывод результатов в виде зависимости от времени

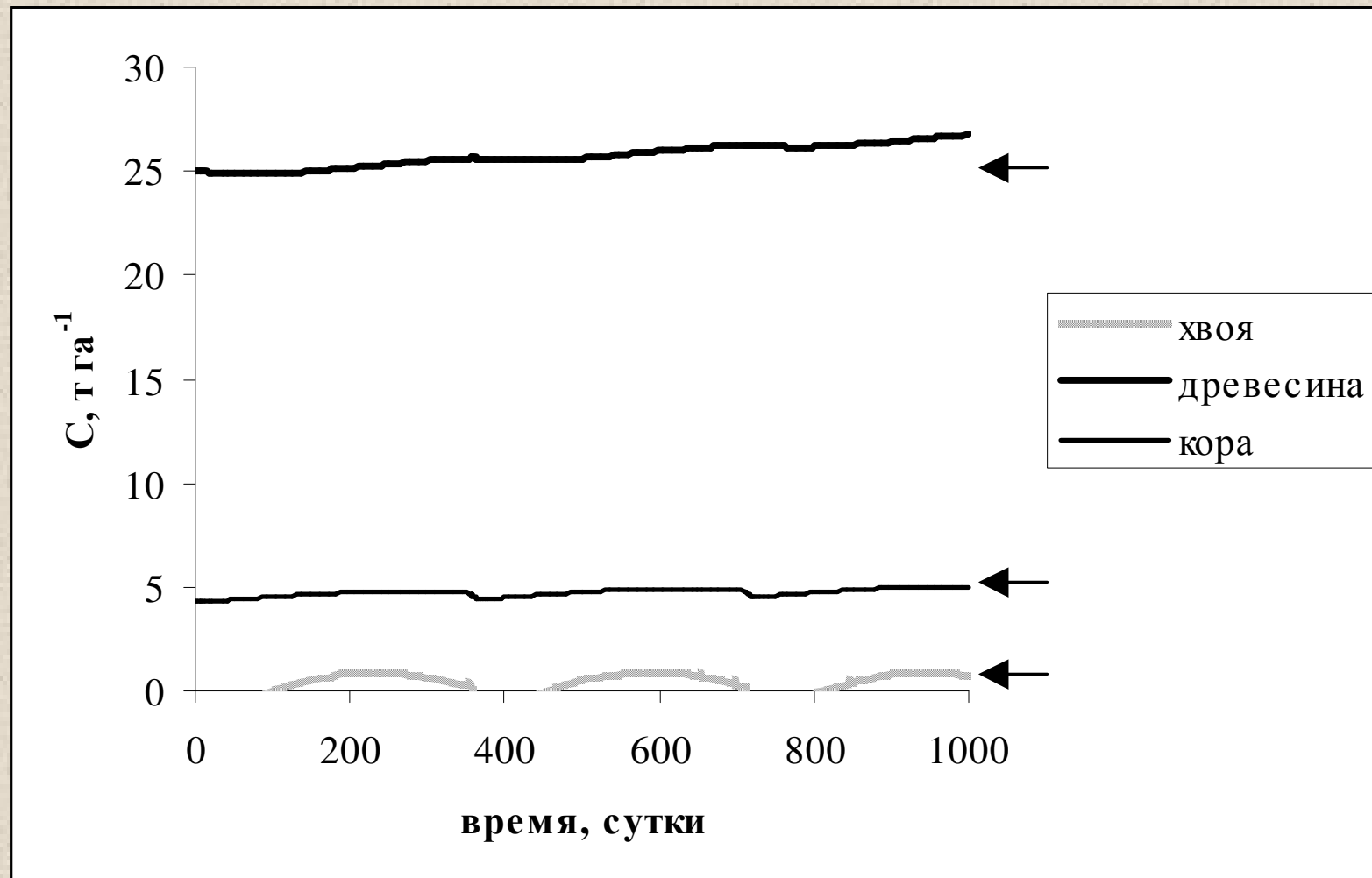
The screenshot displays the MATLAB interface with several windows open:

- File Explorer:** Shows the current directory `C:\MATLAB6p5\work` with a list of files including `a.WMF`, `evnt.m`, `found.m`, `lotka.wkl`, `model.asv`, `model.txt`, `ofile.m`, and `script.m`.
- Command Window:** Contains the following text:

```
Using Toolbox Path Cache. Type 'help' to get started, select 'MATLAB Help' for more information.  
>> script  
processing model file  
integrating  
all done  
>>
```
- Figure No. 1:** A plot showing a series of overlapping curves representing the dependence of one variable on another. The x-axis ranges from 0 to 3000, and the y-axis ranges from 0 to 600.
- Figure No. 2:** A plot showing a series of sharp peaks representing the dependence of a variable on time. The x-axis ranges from 0 to 100, and the y-axis ranges from 0 to 3000.
- Workspace:** Shows a table with columns labeled 's' and 'le', and rows of numerical data.
- Editor:** Shows the code for the `lotka` model, including parameters, initial conditions, and functions.

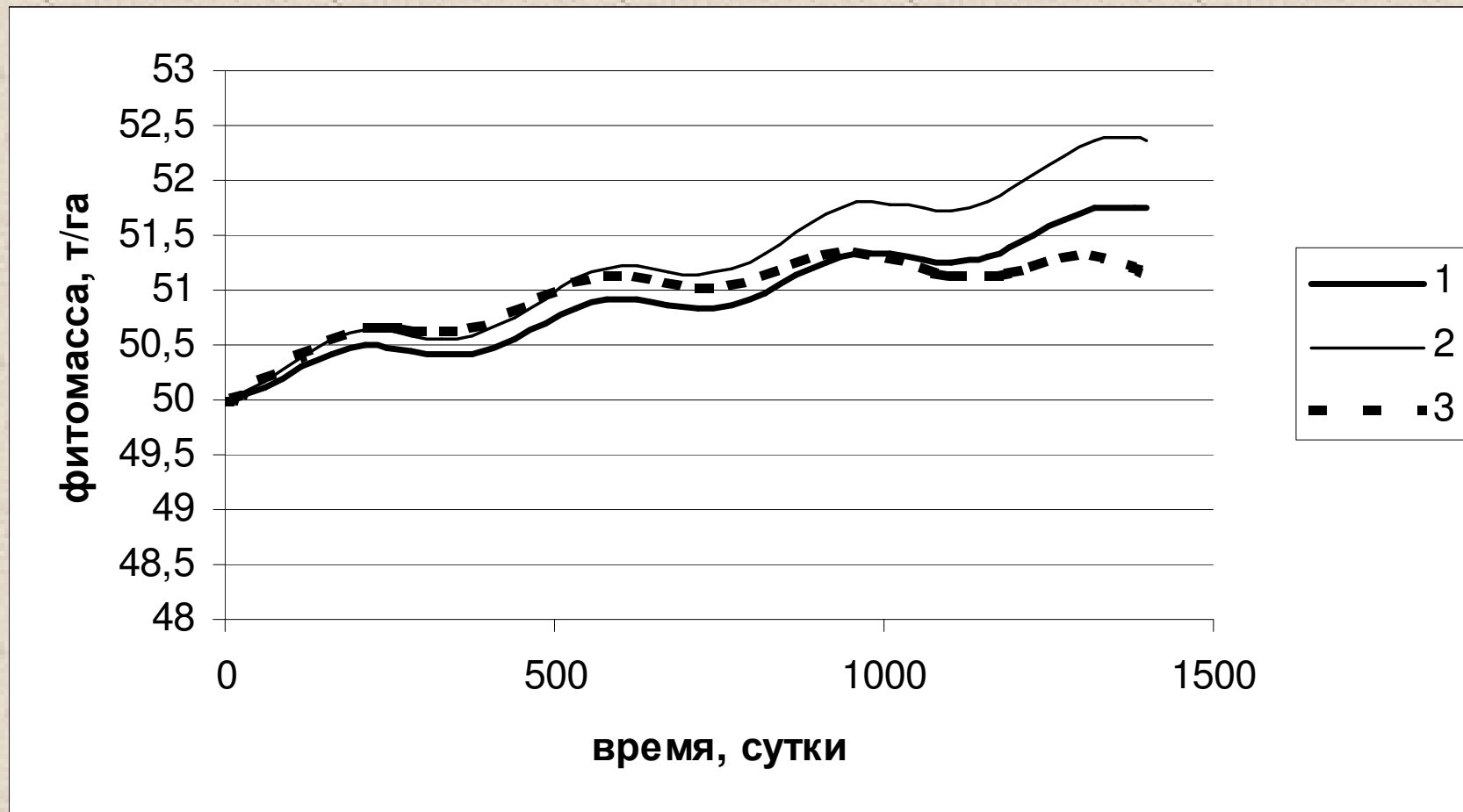


Численный расчет модели –  
скорость потока CO<sub>2</sub>

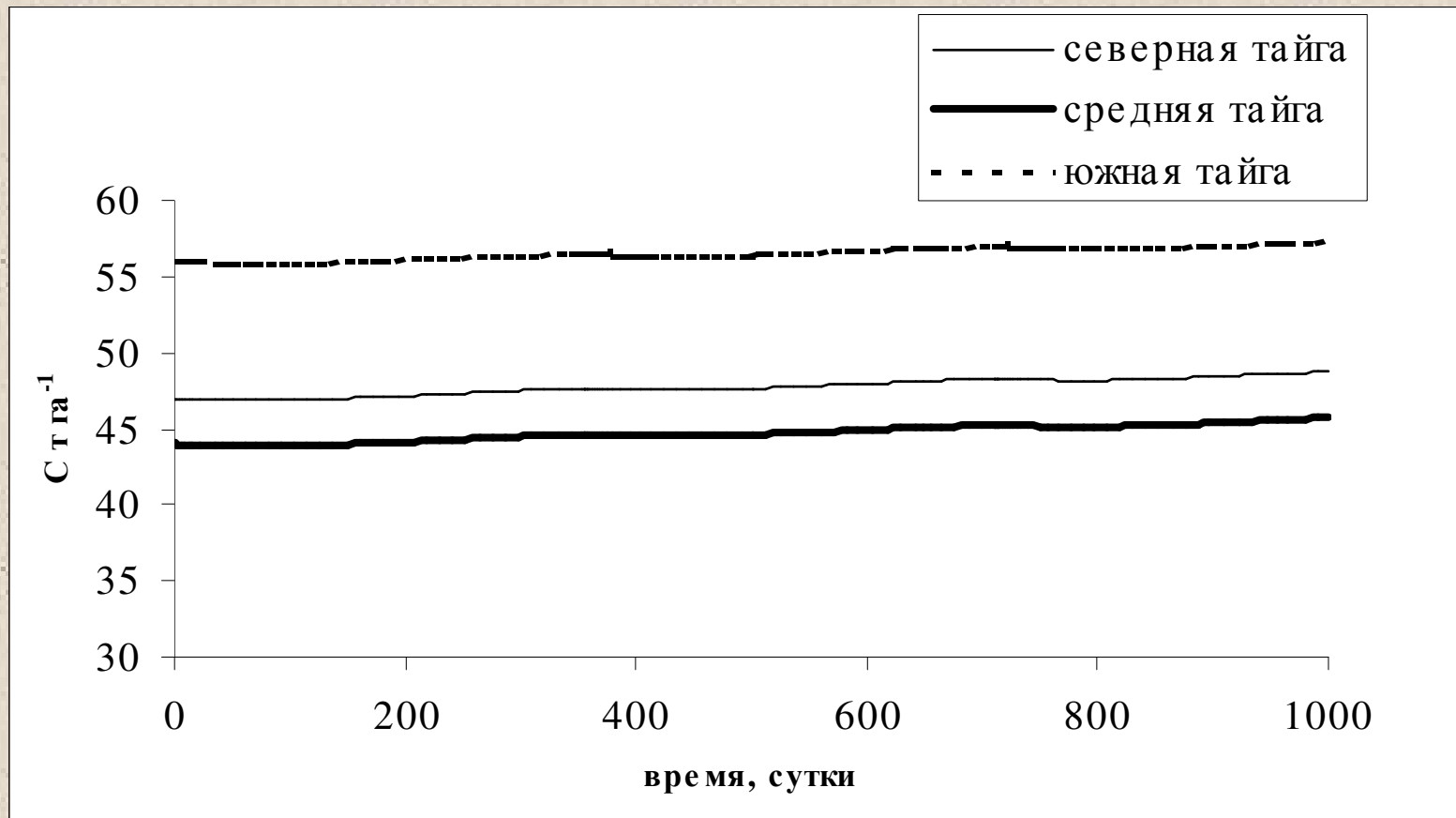


Верификация модели (динамика содержания углерода во фракциях лиственницы) (стрелками обозначены экспериментальные значения)

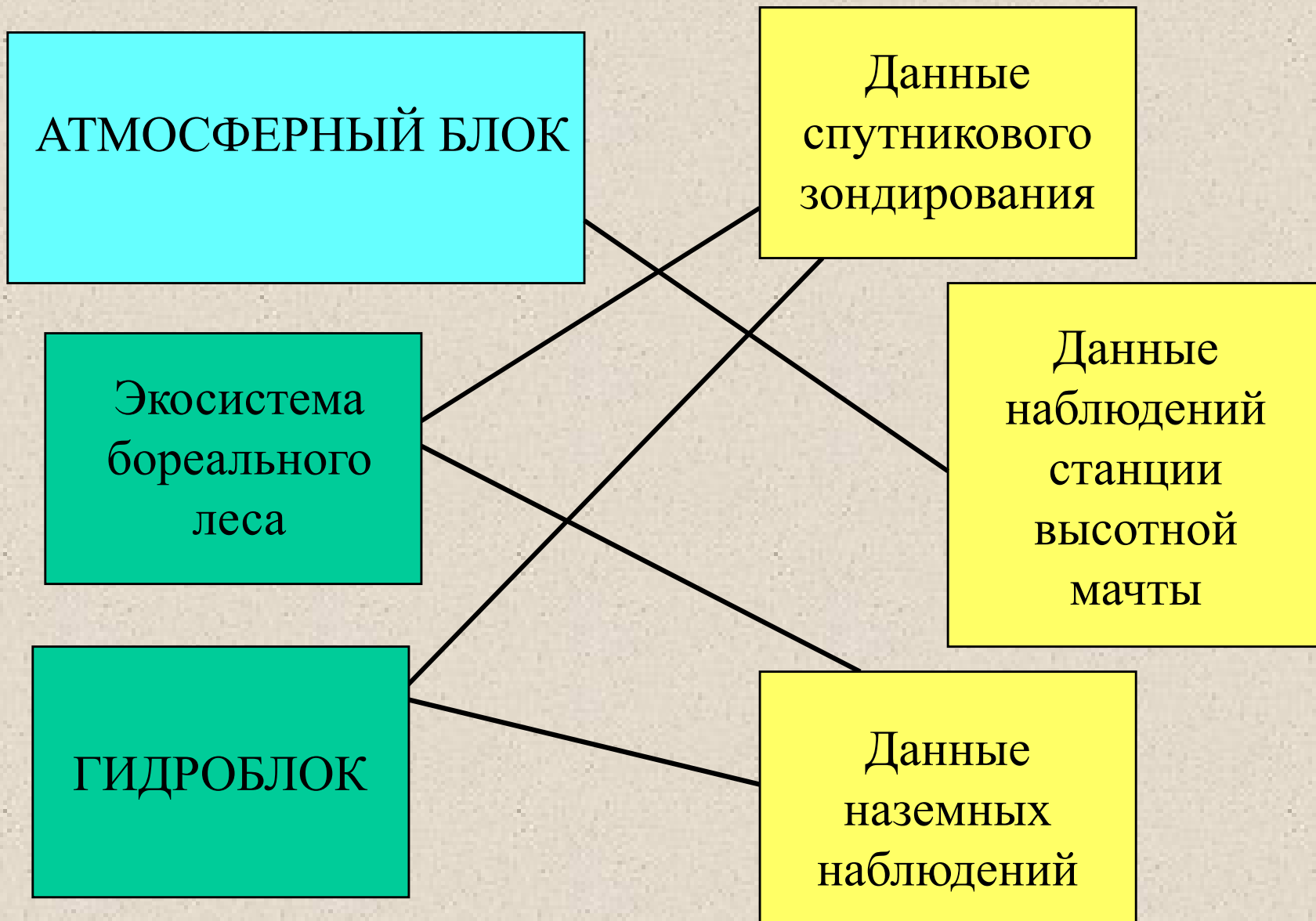




Динамика общей фитомассы системы (численный расчет). 1 – изменений температуры не происходит, 2 – температура изменилась скачкообразно, 3 – температура стабильно растет.

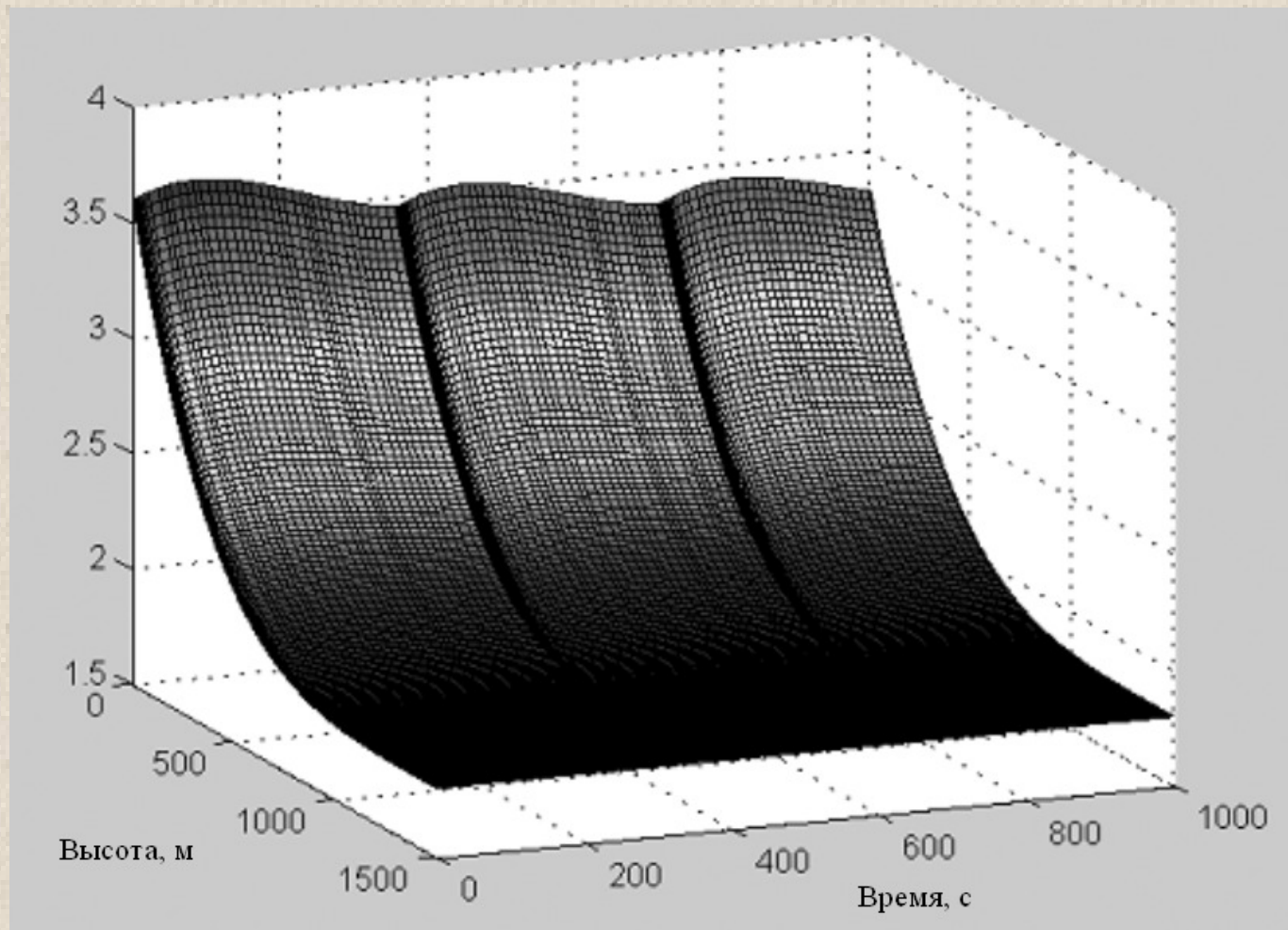


Расчет динамики фитомассы древостоя для трех различных климатических условий.



Блоки модели

Блоки контроля



Распределение концентрации  $\text{CO}_2$   
над бореальным лесом без учета  
переноса (численный расчет)

Необходима тонкая  
верификации модели  
для конкретных участков леса  
для подсчета совокупного  
баланса

# Необходимые параметры

- Состав пород деревьев.
- Годовая (многолетняя) динамика зеленой фитомассы.
- Годовая динамика температуры, освещенности, влажности.
- Динамика концентрации  $\text{CO}_2$  и  $\text{O}_2$  у поверхности.
- Нефотосинтезирующая биомасса и древесина – масса на кв.метр. Динамика, если возможно.
- Динамика биомассы травяного покрова.
- Средняя масса гумуса и подстилки.
- Средняя масса гетеротрофов на один кв. километр.
- Состав видов грибов и почвенных бактерий. Их ростовые характеристики

Спасибо за внимание