

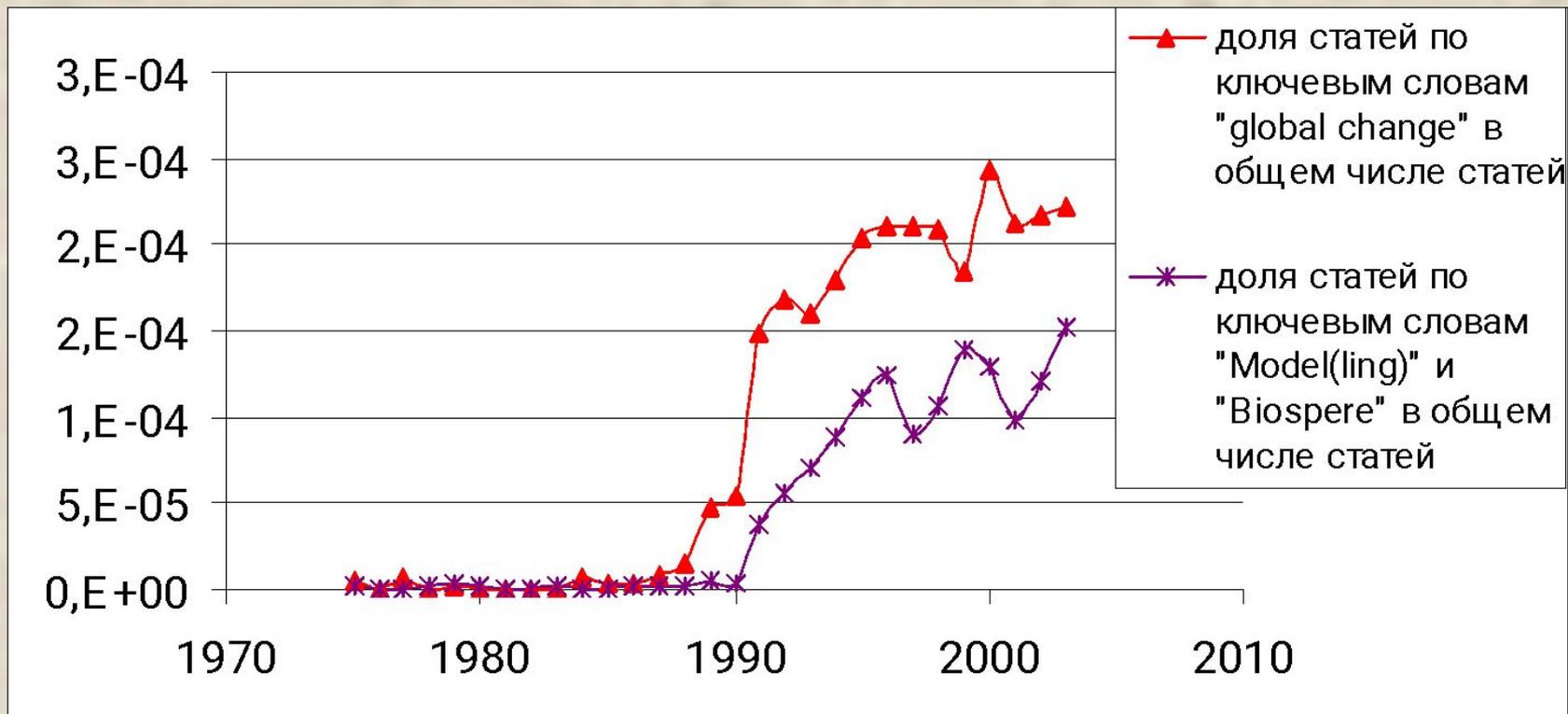
**Новый подход к
моделированию динамики
продуктивности и газообмена
бореального леса**

Бархатов Ю.В., Дегерменджи А.Г.

Институт биофизики СО РАН, Красноярск,

Академгородок, 660036

Регистрируемые климатические изменения планетарного масштаба, как естественные, так и антропогенные, обуславливают новые режимы функционирования природных экосистем. Изменяются не только физические и биофизические характеристики взаимодействия составляющих литосферы, атмосферы, гидросферы и биосферы, но и скорости и направленности круговоротов основных биогенных элементов, возникают новые, усиливаются или ослабляются прямые и обратные связи, ускоряются или замедляются первичные процессы сукцессии экосистем.



Динамика количества статей по глобальной биосферной тематике за 1975-2003 годы в “импактовых” журналах (по данным ISI).

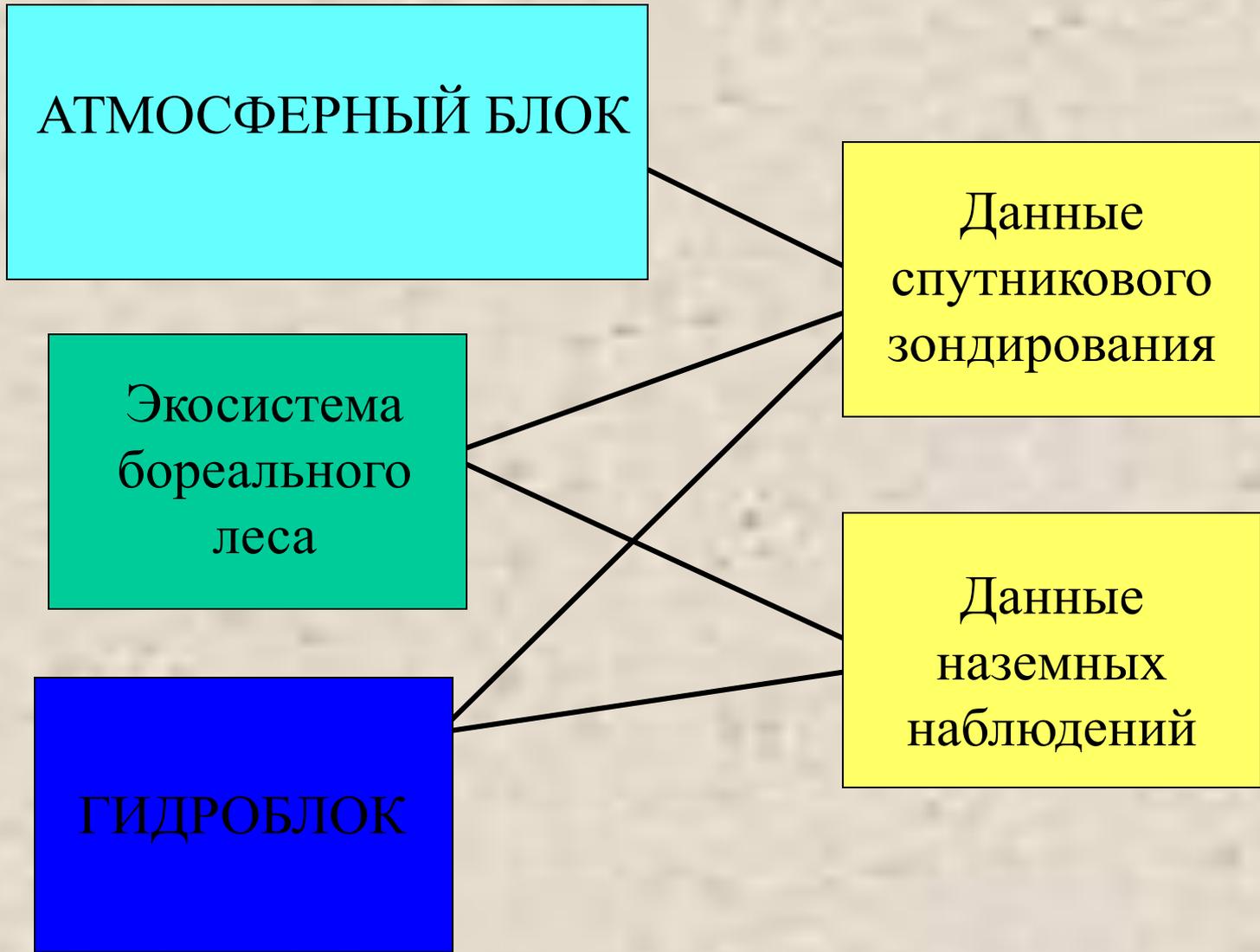
Природные экосистемы Сибири играют существенную роль в стабилизации атмосферы и гидросферы в условиях современного климата, особенно в связи с аккумулярованием тепличных газов из атмосферы. Лесные экосистемы Средней Сибири играют важную роль в поддержании структурного баланса углерода и баланса минеральных веществ, обладают высокой способностью к саморегуляции и установлению равновесия процессов обмена вещества с окружающей природной средой. В настоящее время неизвестно, как будут функционировать и изменяться существующие природные экосистемы на территории Сибири в условиях меняющегося глобального и особенно регионального климата.



Динамика роста доли публикаций по тематикам «сток углерода» и «моделирование бореальных лесов» (по базе данных ISI)

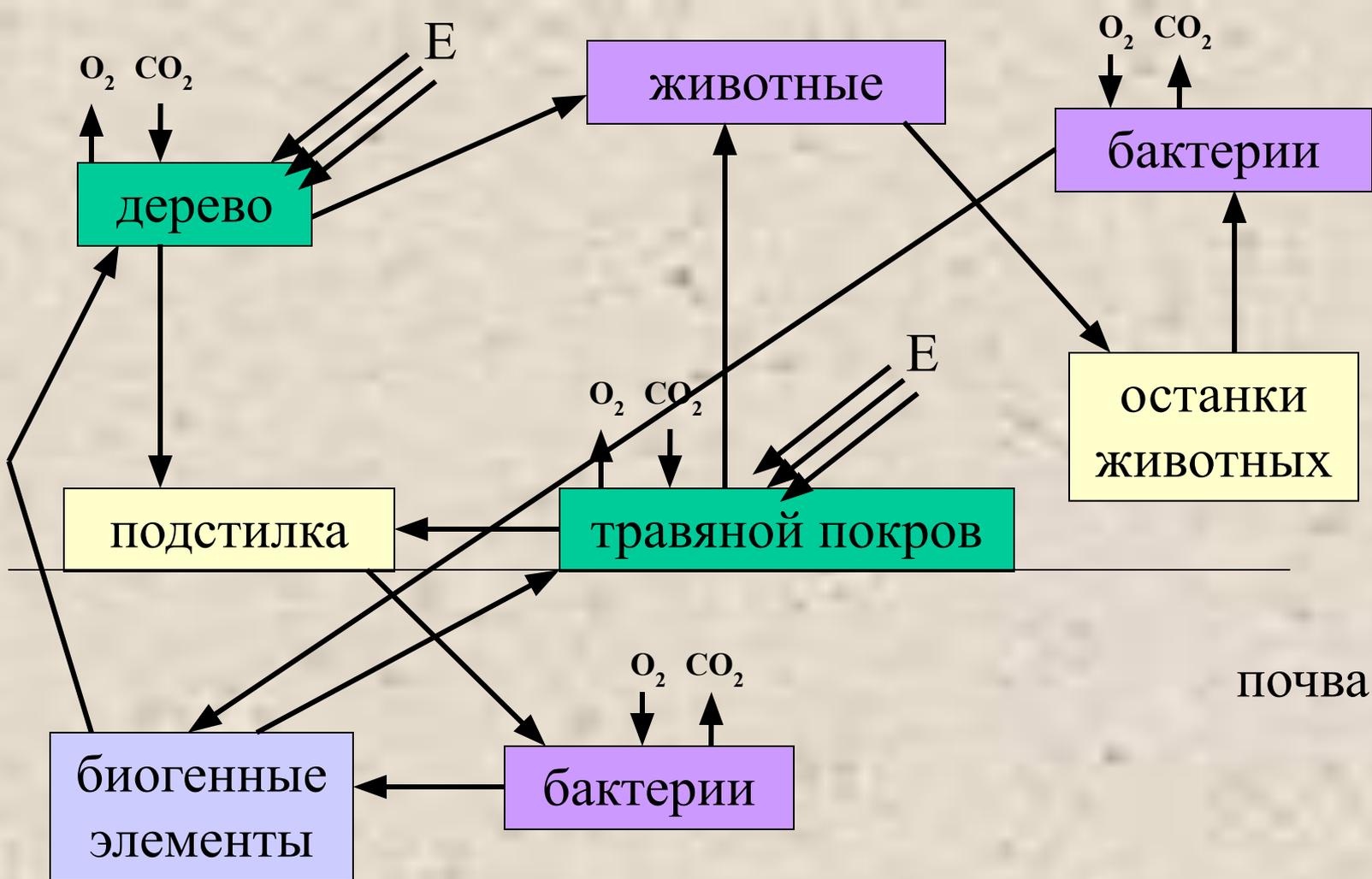
Задачи моделирования бореальных лесов Сибири:

- 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.



Блоки модели

Блоки контроля



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

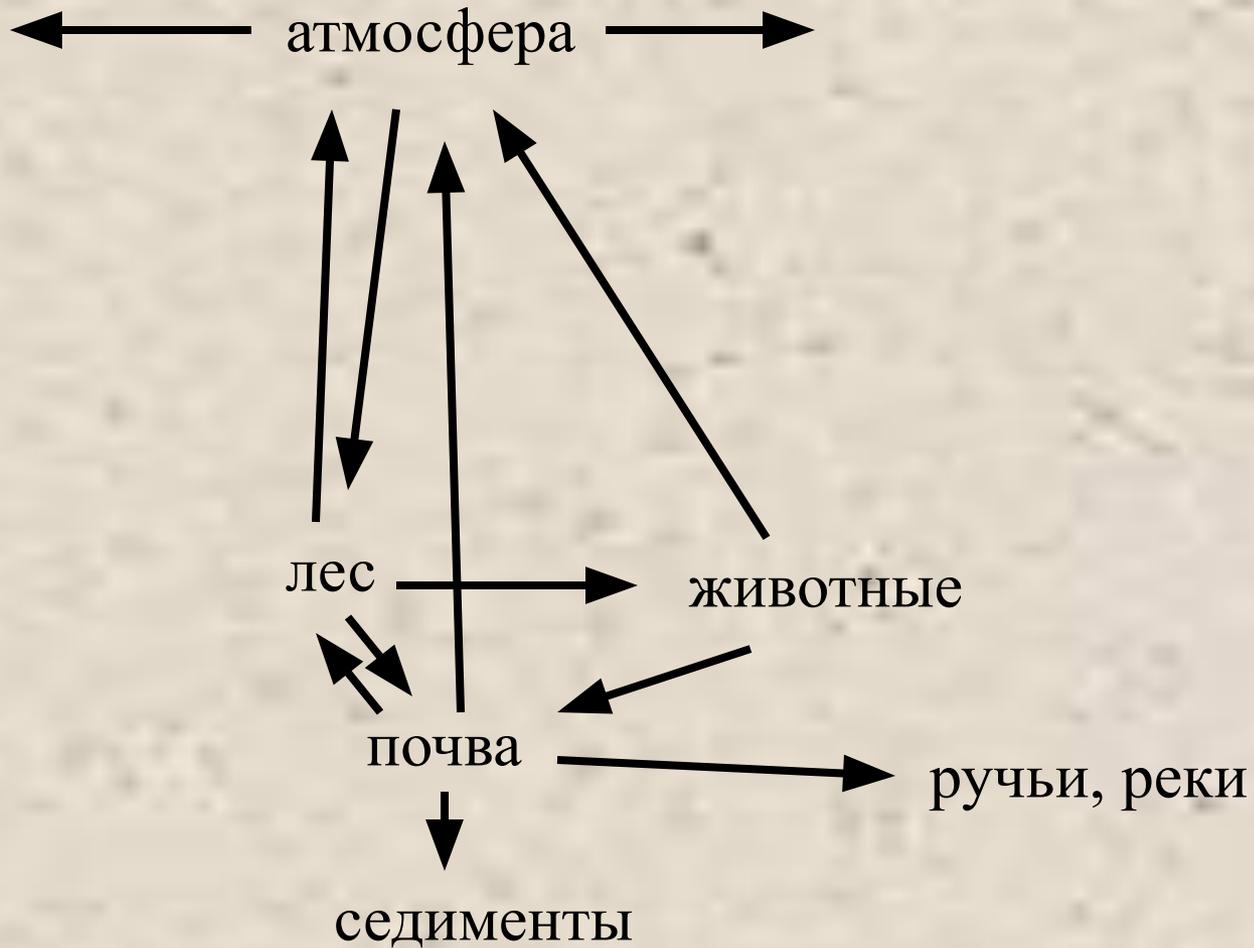


Схема потоков углерода в экосистеме бореального леса

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

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

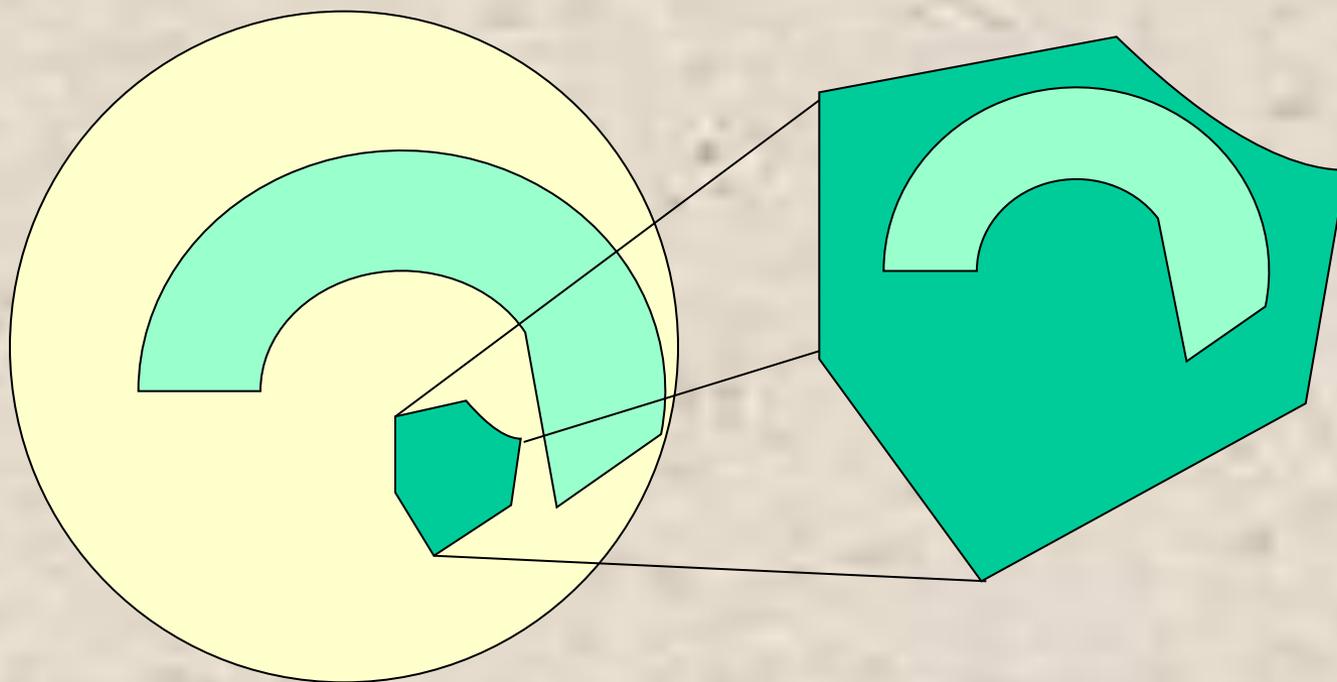
$$\mu_{B2} = \hat{\mu}_{B2} \frac{P}{P + K_P}$$

Азот

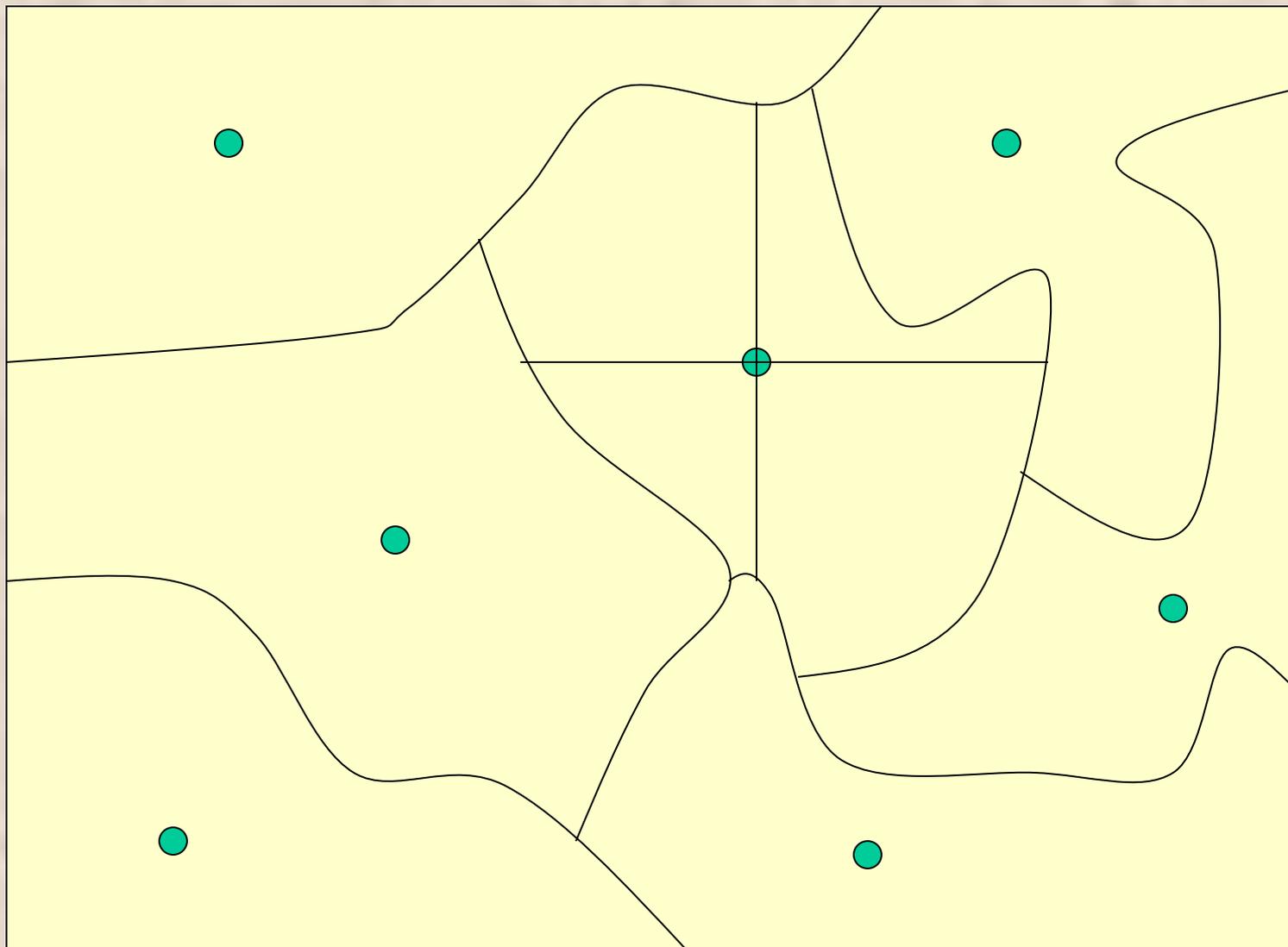
$$\frac{dN}{dt} = -\frac{X_1 \mu_{X2}}{Y_N} + \alpha_{B1}^* \left(\frac{1}{Y_D} - 1 \right) \mu_D B_1 + \alpha_{B2}^* \left(\frac{1}{Y_D} - 1 \right) \mu_P B_2$$

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 градацию.

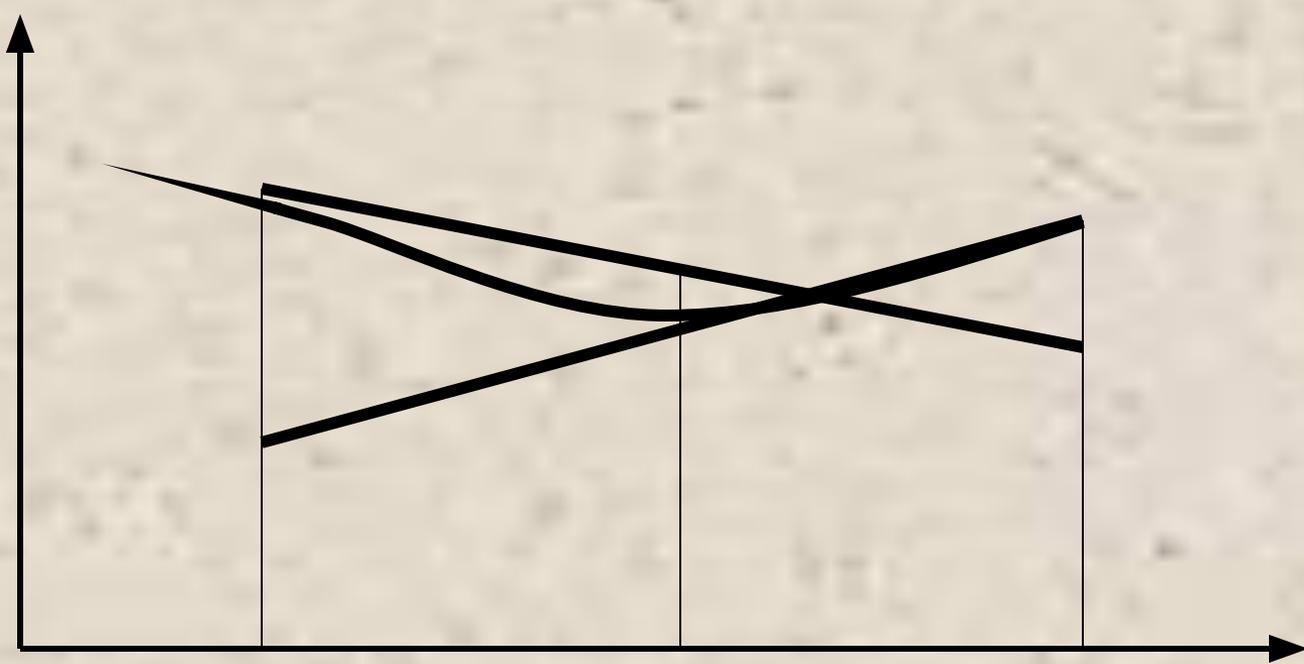


Биоценоз как условно независимая часть биосферы



Модельное представление биоценоза

Параметр X



расстояние

↑
Центр биоценоза

↙ ↘
границы биоценоза

Схема компартментов включает границы биоценозов, а также их условные центры. Модельный центр не обязательно физический центр компартмента-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 $\overline{(x, y)}$.

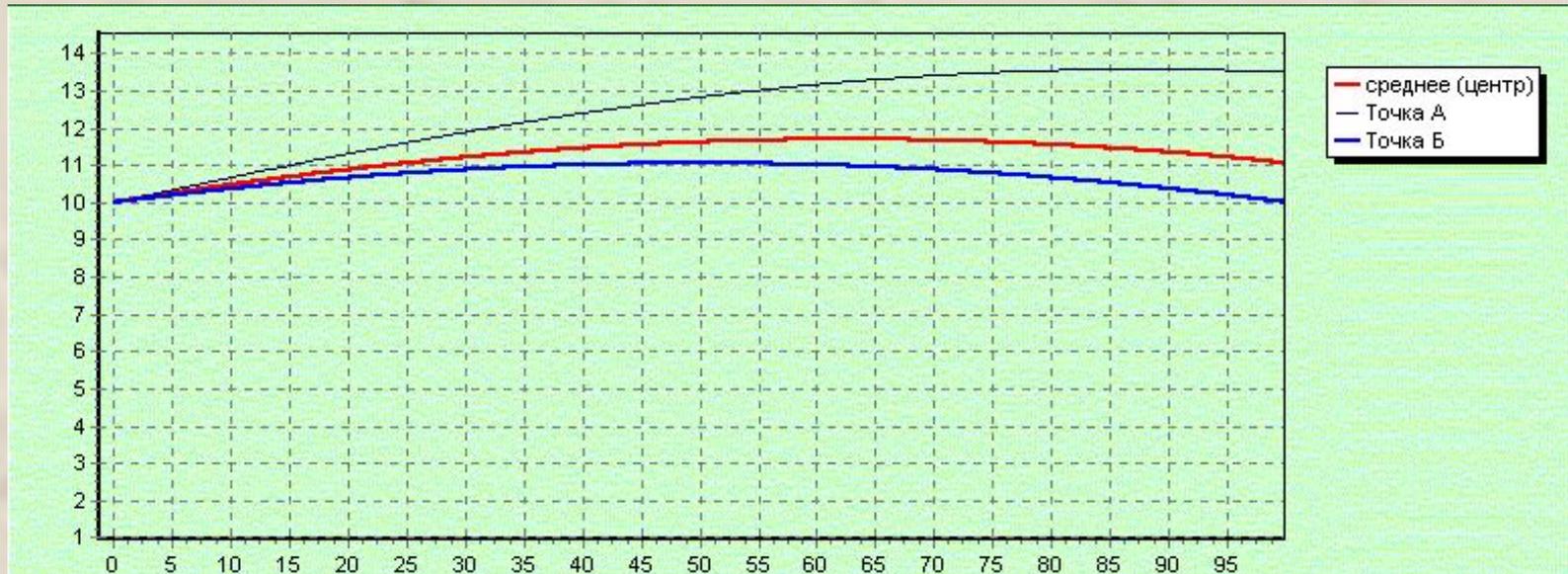
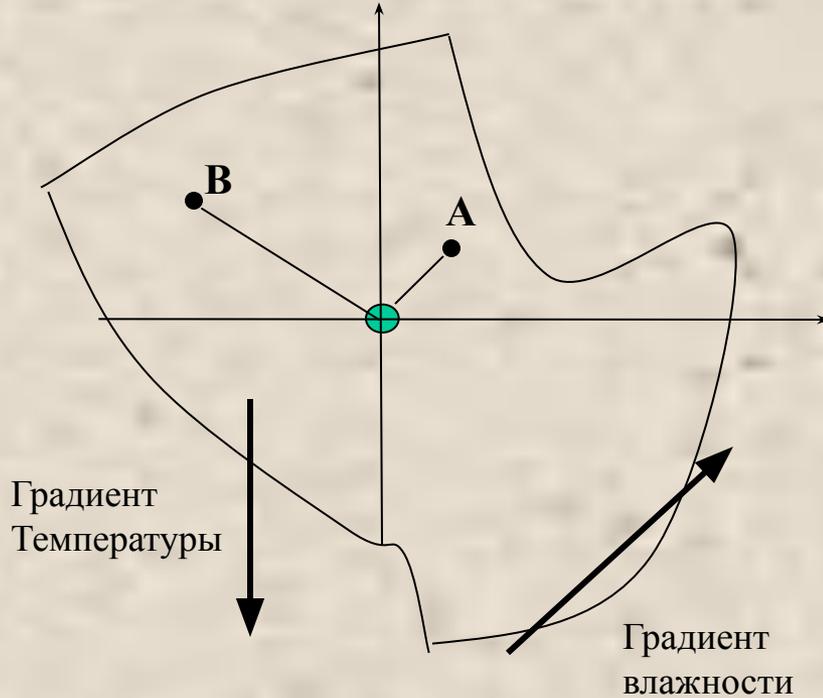
Имея два изменяющихся параметра (направление их векторов показано на рисунке), мы рассчитываем отклонение фитомассы в точках А и Б от средней. Таким образом можно рассчитать динамику любого компонента системы в любой интересующей нас точке.

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

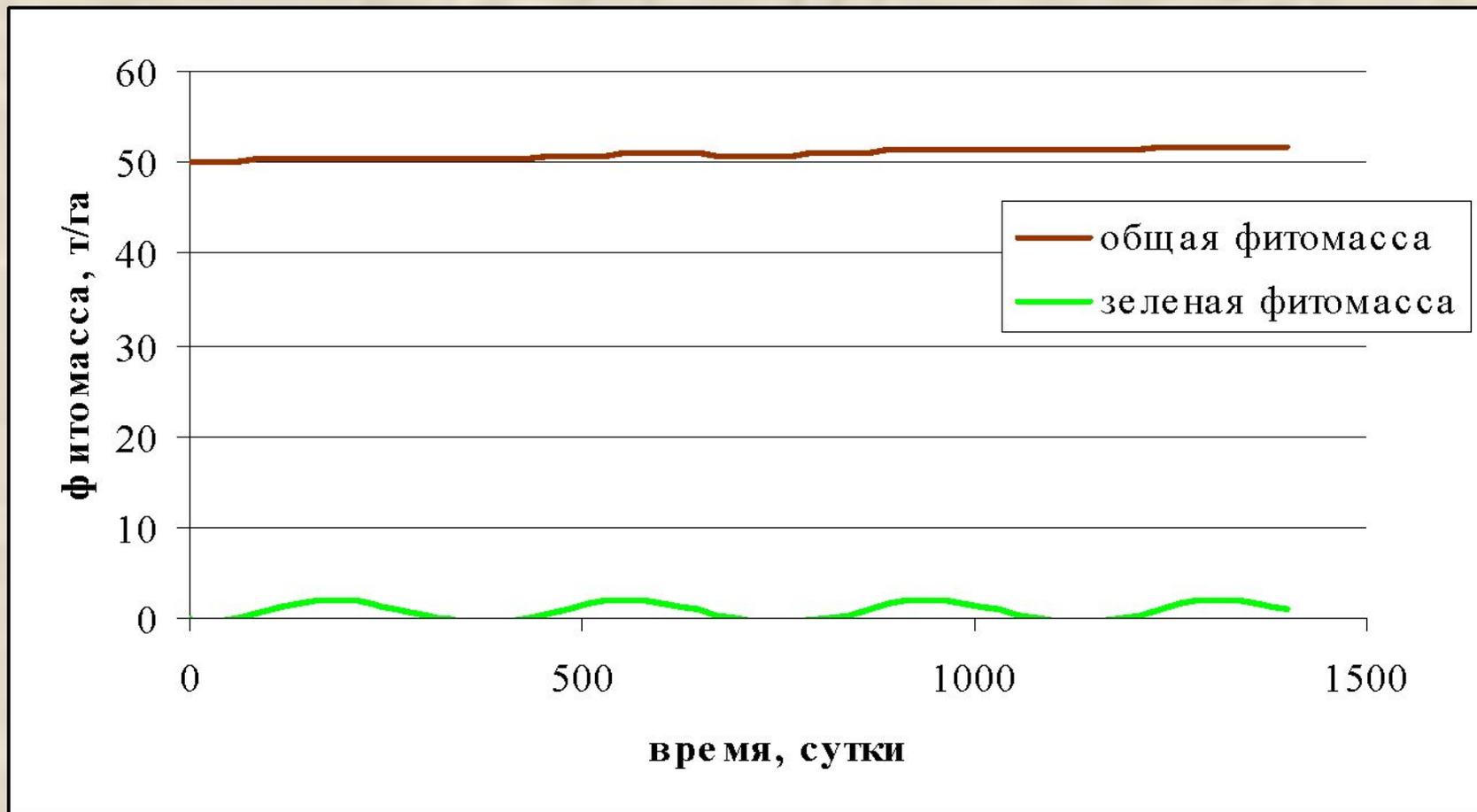
Вывод результатов в табличном виде формата Excel

The screenshot displays the MATLAB interface with several windows open:

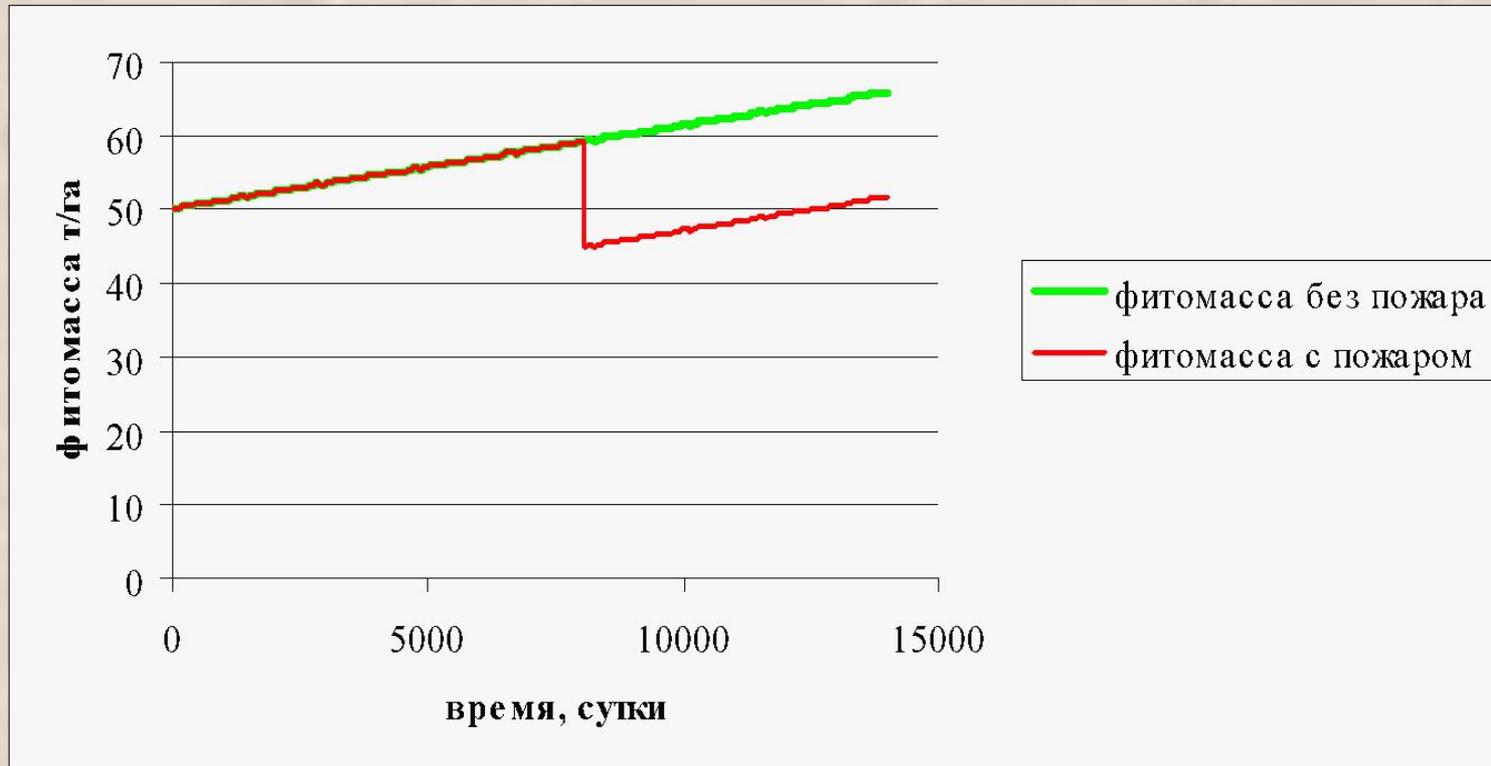
- Command Window:** Shows the execution of a script: `>> script`, `processing model file`, `integrating`, `all done`, `>>`.
- Workspace:** A table showing the results of the simulation, truncated to 10x10. The table has columns for time steps (1-4) and values for variables 1, 2, and 3.
- Figure No. 1:** A plot showing the dependence of a variable on time, with the x-axis ranging from 0 to 3000 and the y-axis from 0 to 600. The plot shows a series of overlapping curves that peak and then decay.
- Figure No. 2:** A plot showing the dependence of a variable on time, with the x-axis ranging from 0 to 100 and the y-axis from 0 to 3000. The plot shows a series of sharp, periodic peaks.
- Script Editor:** A window showing the MATLAB script used for the simulation, including parameters like `p1=0.001`, `p2=0.002`, and functions `f(1)` and `f(2)`.

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

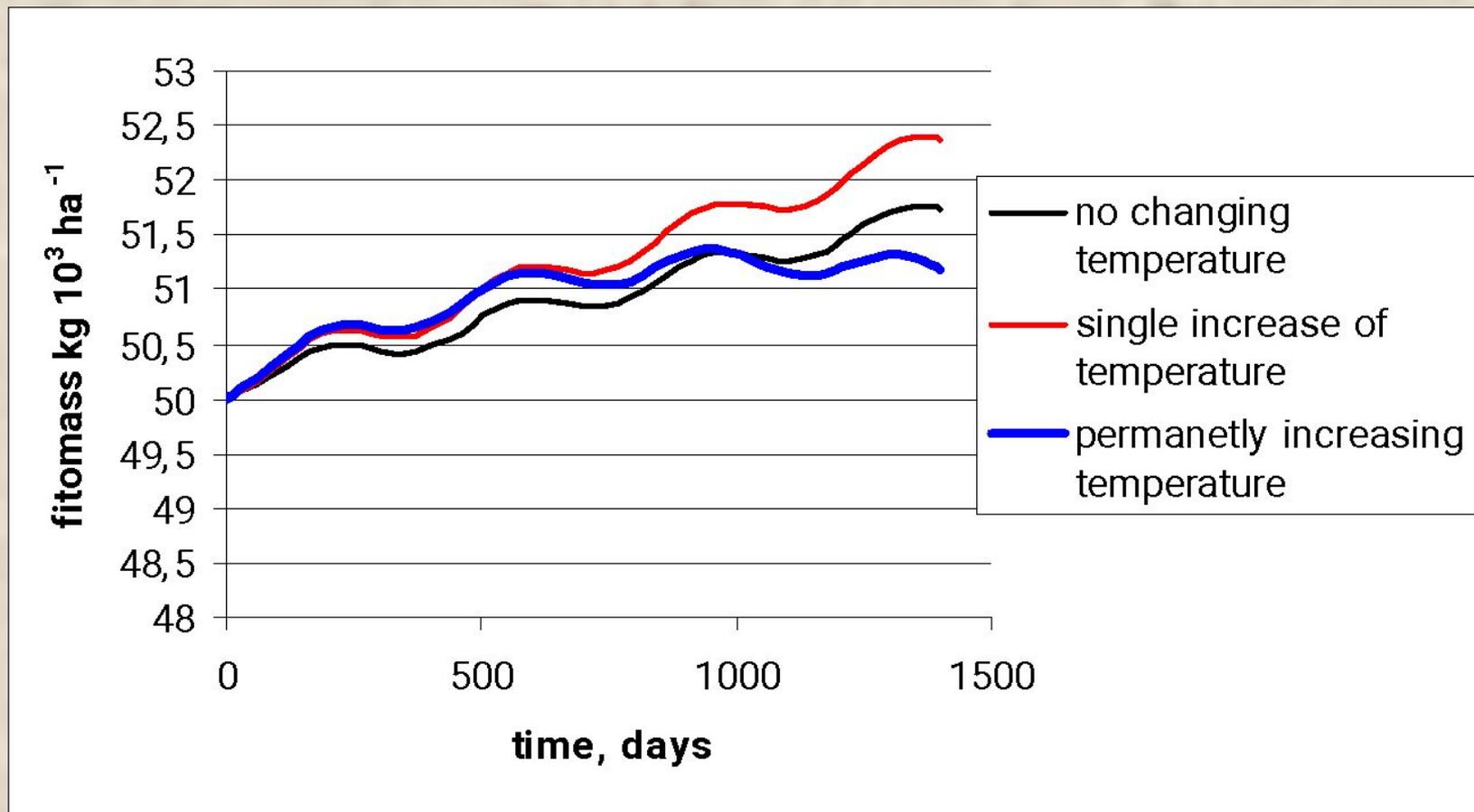
Вывод результатов в виде зависимости от времени



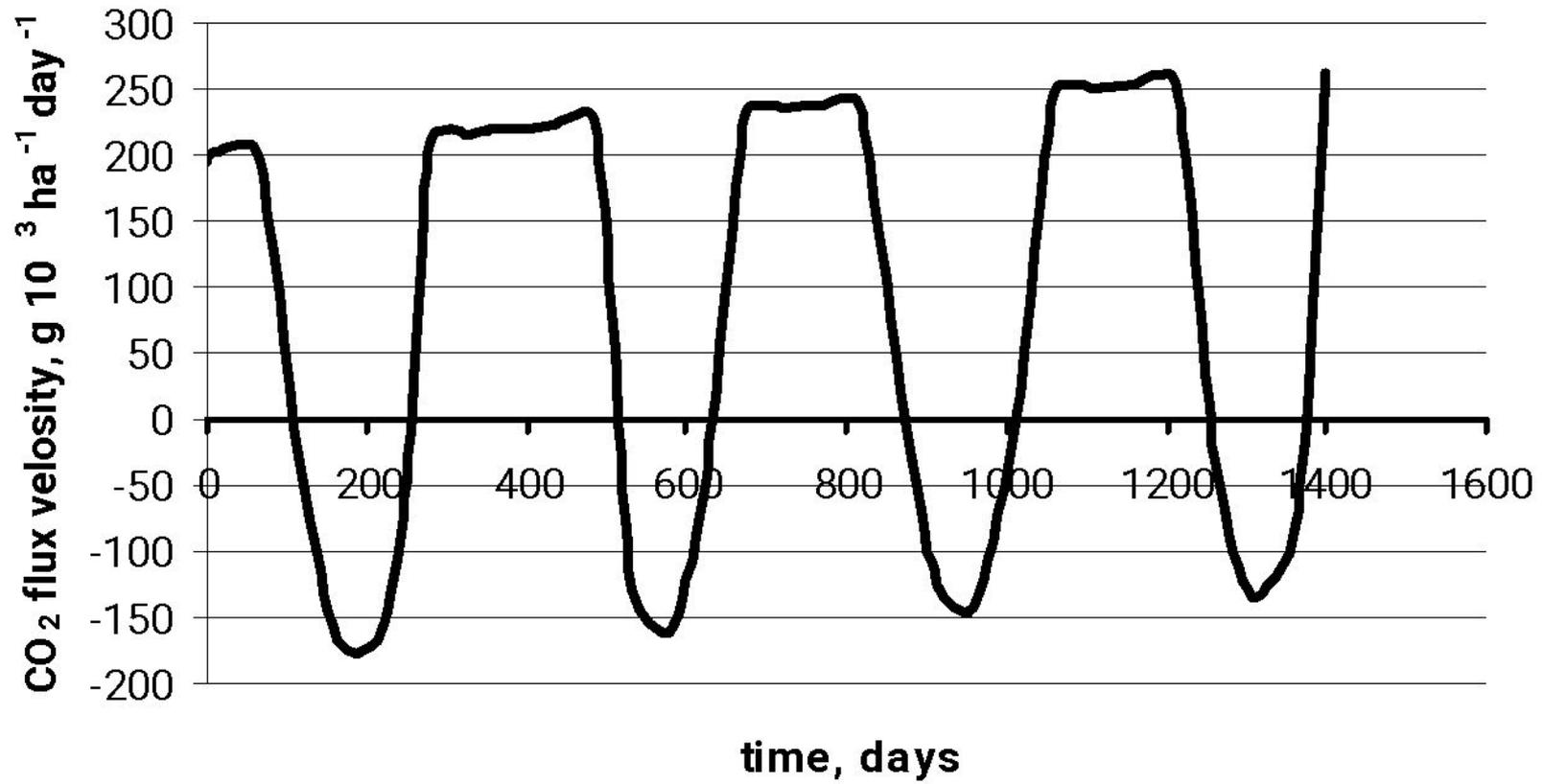
Численный расчет модели –
условный лиственный лес



Численный расчет модели на
больших временах влияние лесных
пожаров



Численный расчет модели – влияние изменения температуры



Численный расчет модели –
скорость потока CO₂