

**ОЦЕНКА НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ ПРОГНОЗА БИОСФЕРНОЙ  
ДИНАМИКИ В МИНИМАЛЬНОЙ БИОСФЕРНОЙ МОДЕЛИ,  
ПОСТРОЕННОЙ ПО ПРИНЦИПУ НАИХУДШЕГО СЦЕНАРИЯ**

Дегерменджи А.Г., **Барцев С.И.**Щемель А.Л., Иванова Ю.Д.

*Институт биофизики СО РАН, Красноярск, Россия*  
Проект № 50 (этап 2009 г)

**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 наихудшего из них, для оценки глобального экологического риска при различных вариантах ресурсо-потребительской 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» (чувствительность системы) (ИБФ).

# Предпосылки выполнения этой работы:

- 1) Согласно принципу наихудшего сценария наибольшее практическое значение имеет знание наиболее неблагоприятного, но возможного при данных доверительных интервалах сценария. Однако вследствие существенной нелинейности модели наихудшее сочетание параметров модели может оказаться контринтуитивным. Поэтому без прямого расчета сценариев при различных сочетаниях параметров не обойтись.
- 2) Поскольку исходные данные имеют значительный разброс, приводящий к существенной неопределенности параметров модели, то представляется полезным визуализировать степень неопределенности прогнозов.

## О СТЕПЕНИ НЕОПРЕДЕЛЕННОСТИ НАШИХ ПРЕДСТАВЛЕНИЙ О БИОСФЕРЕ

Оценки пулов углерода и скоростей его перехода из пула в пул по оценкам разных авторов существенно различаются.

Оценки количества углерода в атмосфере варьируют от 600 до 760 Гт;

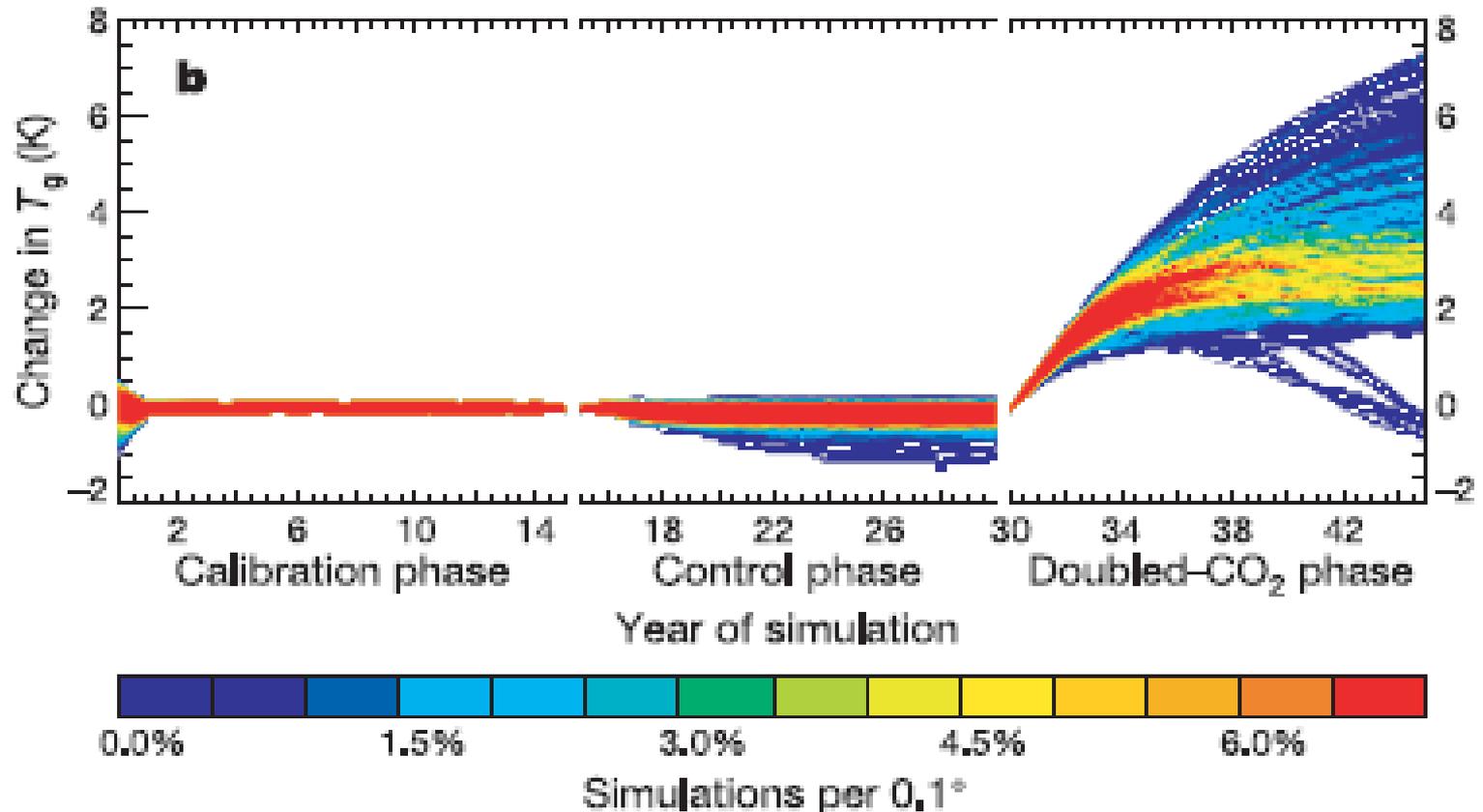
В биомассе - от 500 до 850 Гт;

В почве - от **1080** до **2000** Гт.

Первичная продукция фотосинтеза – диапазоне 110-120 ГтС/год.

ЧПП и дыхание почв – в диапазоне 55-60 ГтС/год.

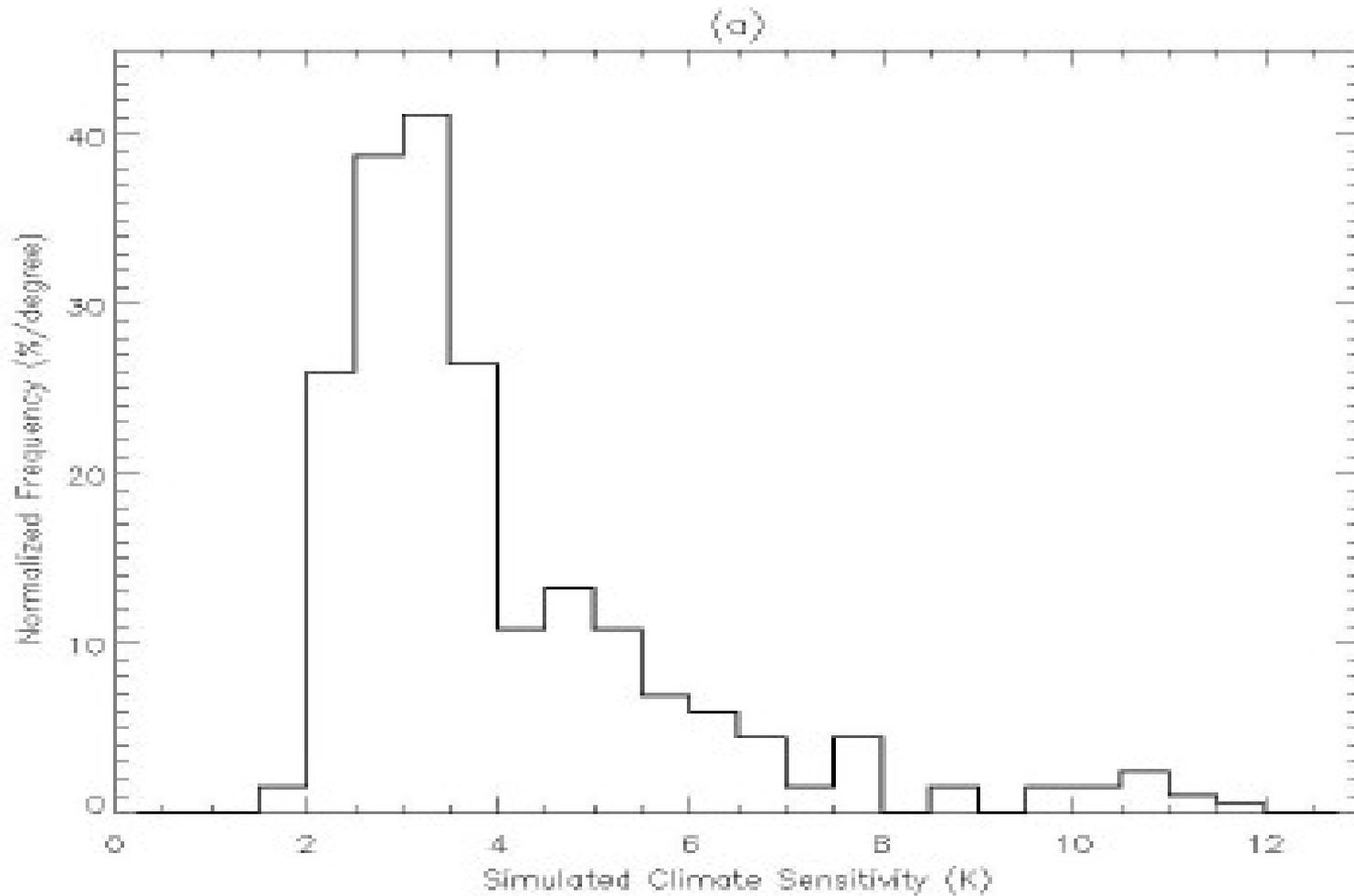
## «Веер» сценариев, соответствующих разной чувствительности климата к удвоению CO<sub>2</sub>



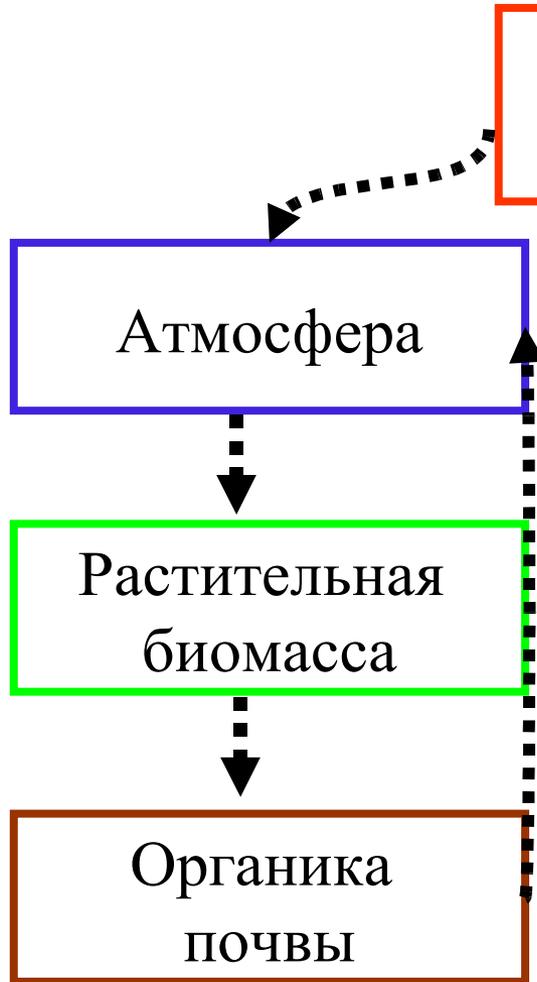
**Частотные распределения  $T_g$  (цвет показывает плотность траекторий на 0.1 К интервал) на трех фазах моделирования.**

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.

# Распределение полученных сценариев по чувствительности климата к удвоению CO<sub>2</sub>



# «БАЗОВАЯ» МИНИМАЛЬНАЯ МОДЕЛЬ ГЛОБАЛЬНОЙ ДИНАМИКИ УГЛЕКИСЛОГО ГАЗА



Антропогенный углерод

Атмосфера

Растительная биомасса

Органика  
ПОЧВЫ

$$\frac{dC}{dt} = fuel(t)$$

$$\frac{dx}{dt} = P(x, A, T(A)) - D(x)$$

$$\frac{dy}{dt} = D(x) - S(y, T(A))$$

$$C = A + x + y$$

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

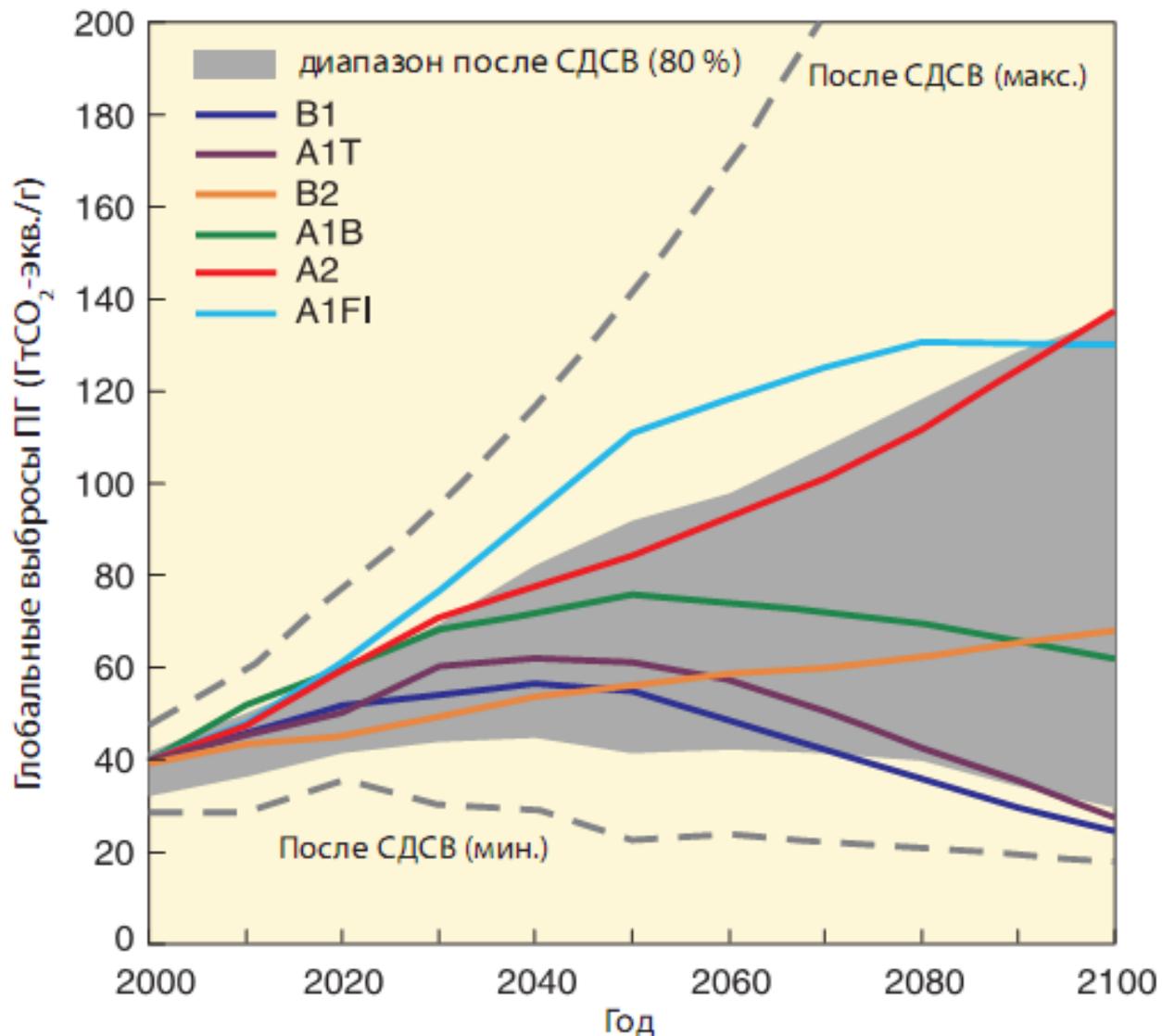
$$T(A) = T_o + T_{del} \cdot \log_2 \left( \frac{A}{A_0} \right)$$

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

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

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

$$x_{\max} \equiv x_0 \cdot G$$

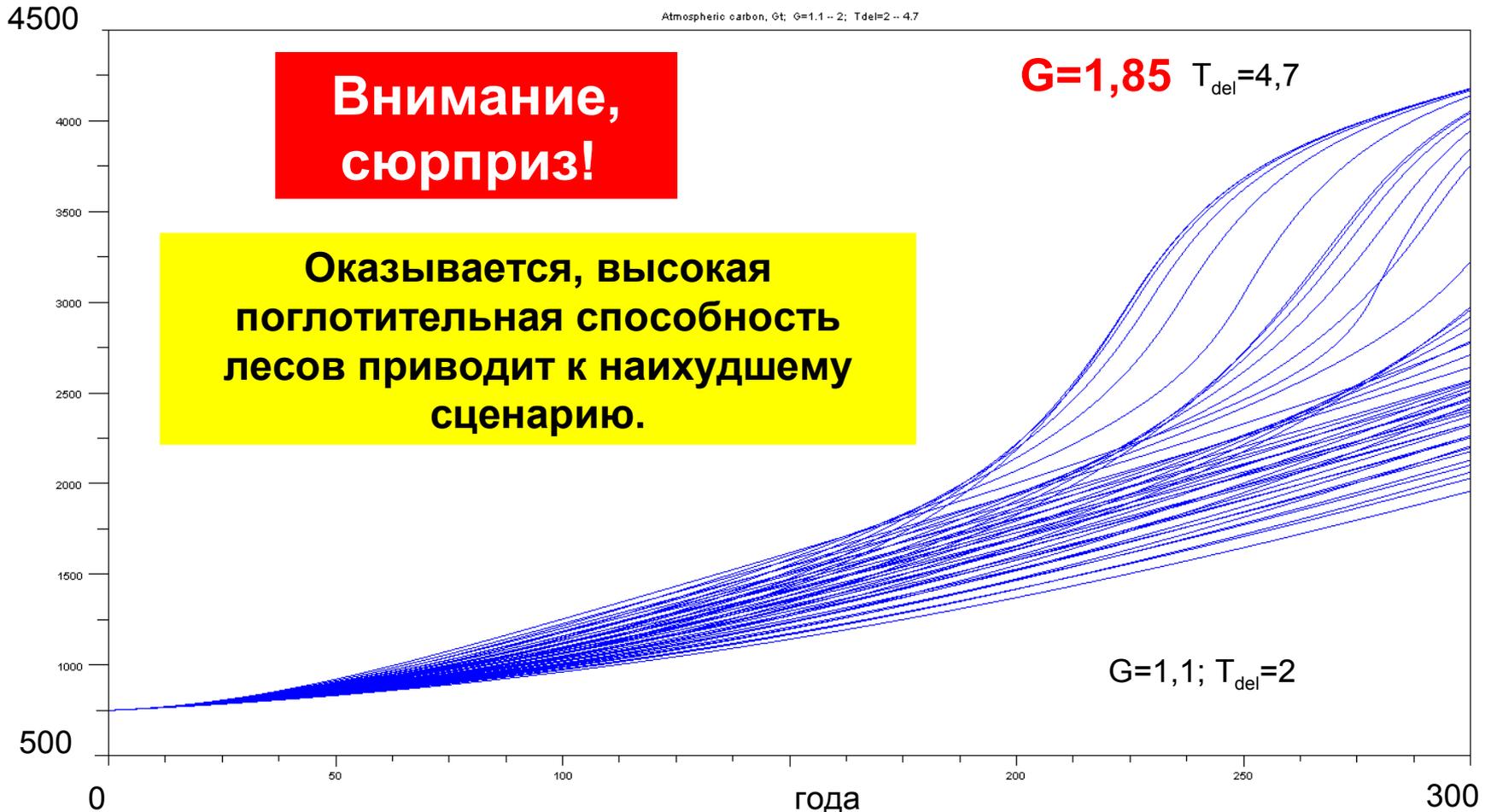


СДСВ –  
специальный  
доклад IPCC  
2000 г

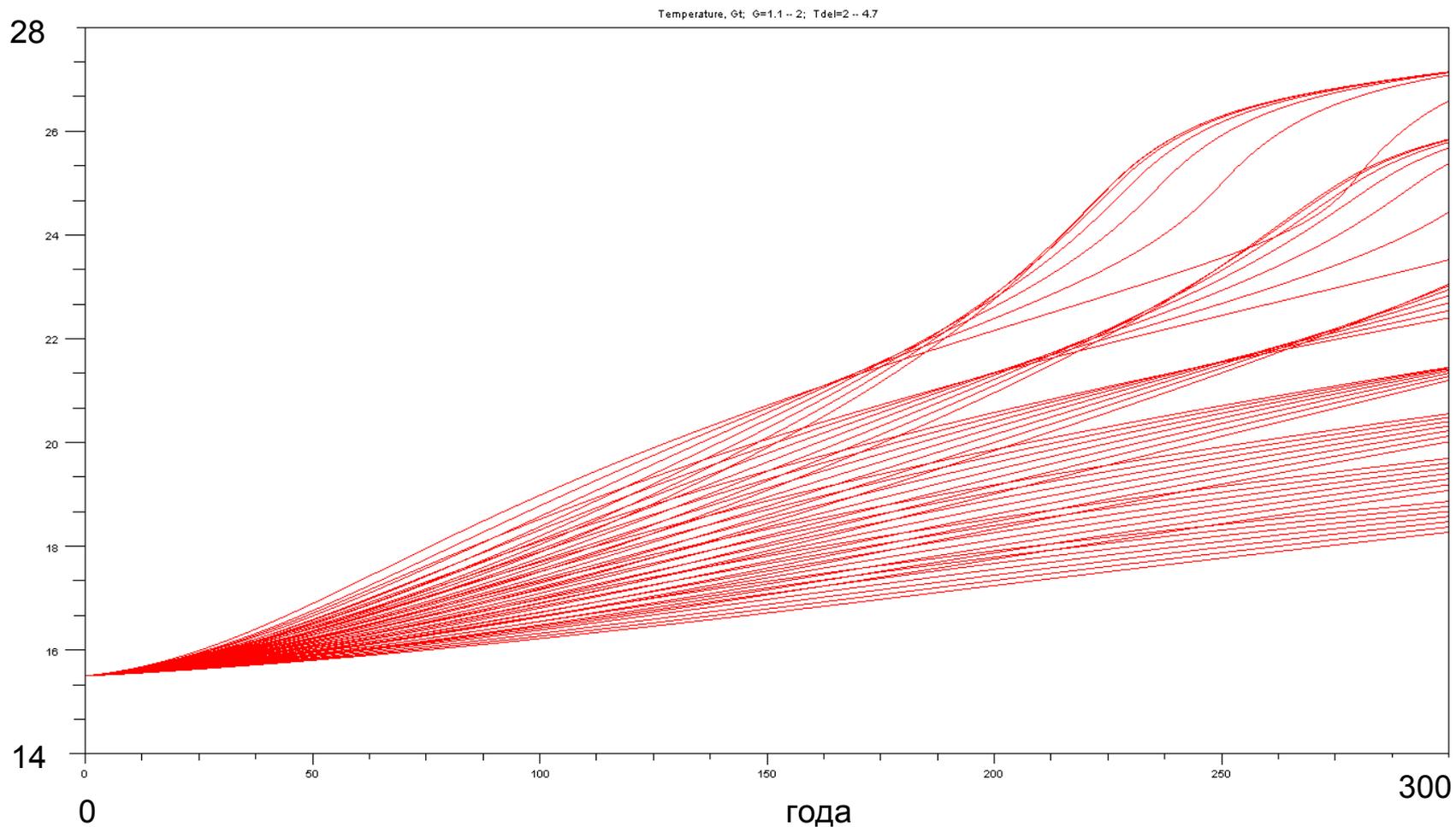
**Рис. 3.1.** Глобальные выбросы ПГ (в ГтСО<sub>2</sub>-экв./г) в отсутствие климатической политики: шесть иллюстративных показательных сценариев СДСВ (цветные линии) и 80-й процентиль диапазона недавних сценариев, опубликованных после СДСВ (закрашенная серым цветом область). Прерывистые линии указывают полный диапазон сценариев после СДСВ. Выбросы включают: СО<sub>2</sub>, СН<sub>4</sub>, N<sub>2</sub>O и Ф-газы. {РГ III 1.3, 3.2, рисунок РП.4}

# Прогноз количества углерода в атмосфере в базовой модели на 300 лет (A2 сценарий).

Изменение чувствительности климата 2-4,7 совместно с изменением коэффициента G в пределах 1,1-2,0

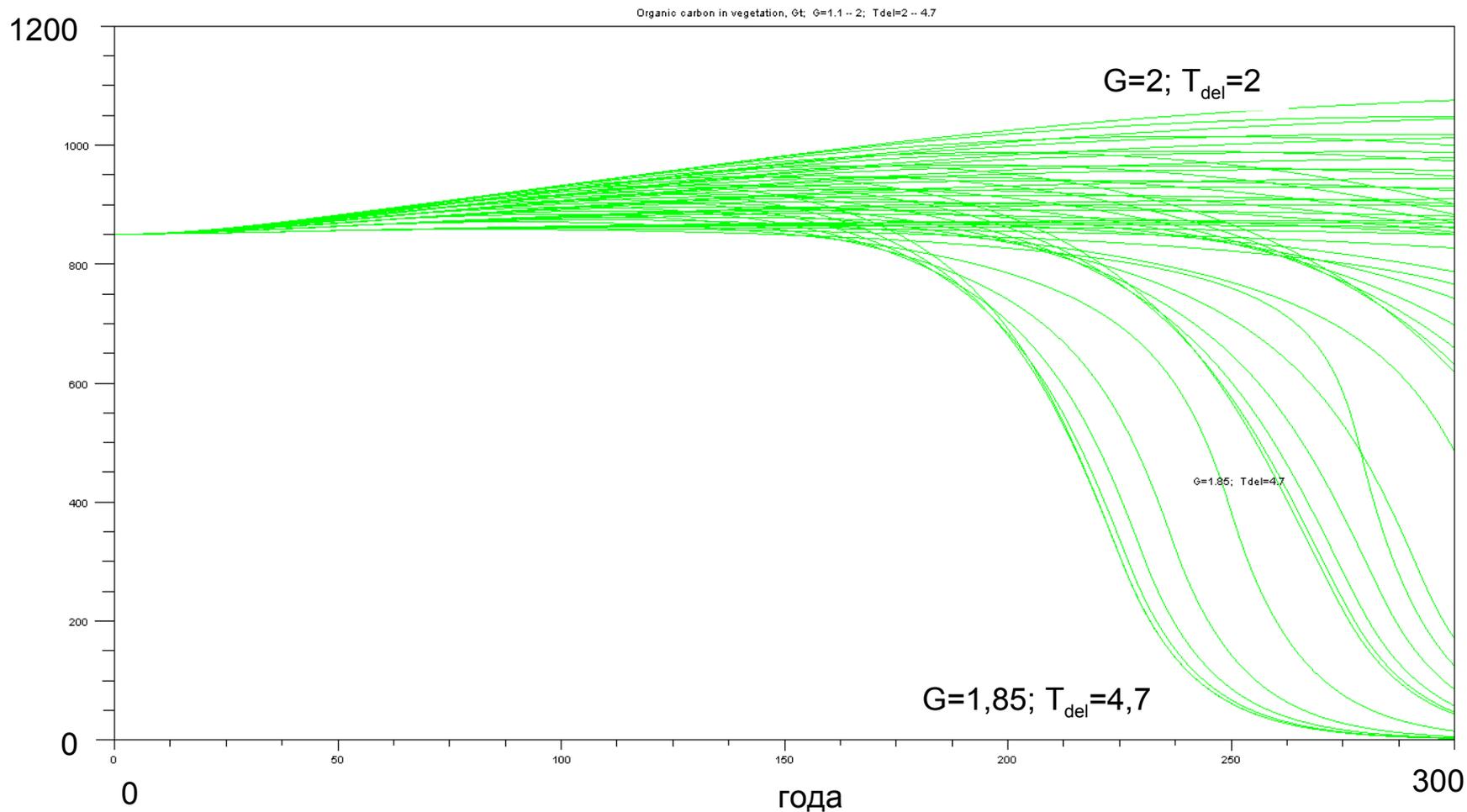


Прогноз температуры в базовой модели на **300** лет.  
Изменение чувствительности климата 2-4,7 совместно с  
изменением коэффициента G в пределах 1,1-2,0



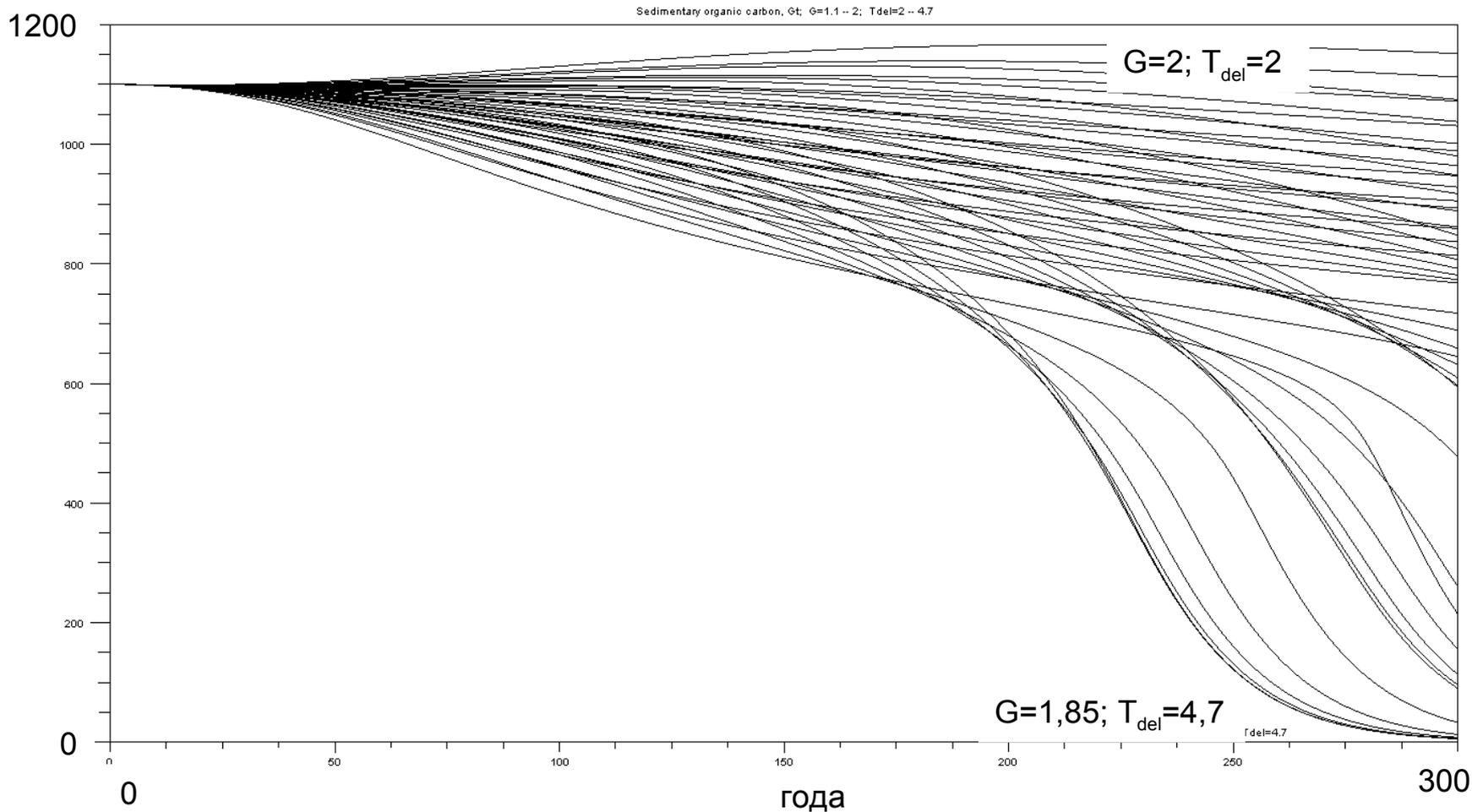
# Прогноз количества углерода в биомассе в базовой модели на 300 лет.

Изменение чувствительности климата 2-4,7 совместно с изменением коэффициента  $G$  в пределах 1,1-2,0

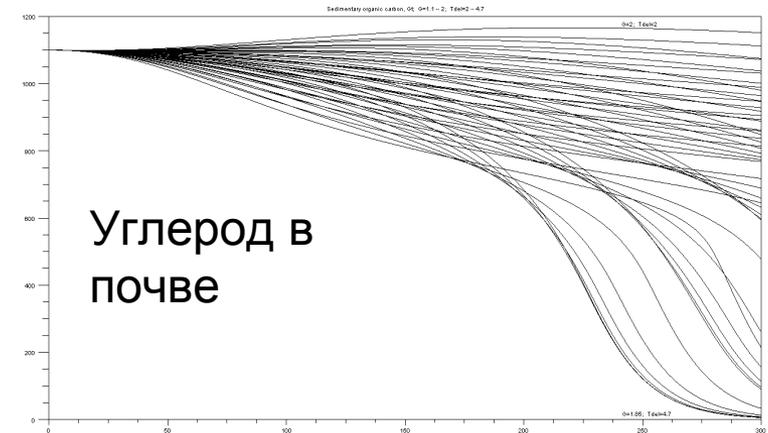
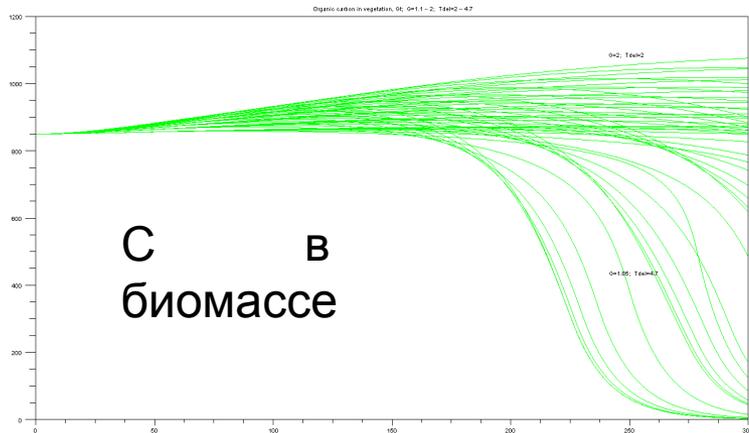
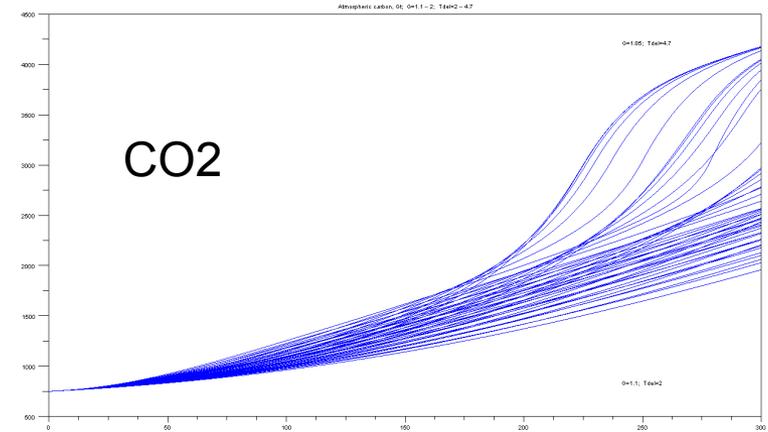
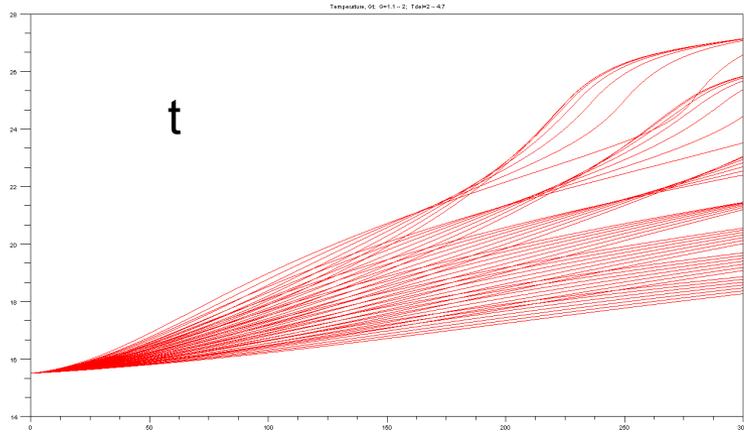


# Прогноз количества углерода в почве в базовой модели на 300 лет.

Изменение чувствительности климата 2-4,7 совместно с изменением коэффициента  $G$  в пределах 1,1-2,0



# Сравнительное сопоставление 300 летних сценариев изменения существенных переменных в базовой модели. Изменение чувствительности климата 2-4,7 совместно с изменением коэффициента $G$ в пределах 1,1-2,0



## **«Объединенная» модель биосферы**

$$\frac{dA}{dt} = S(y, T(A)) + C_{a\_up} BM_{out}(A) - P(x, A, T(A)) - C_{a\_down} AM_{in}(A) + fuel(t) + X(t) \quad (1)$$

$$\frac{dx}{dt} = P(x, A, T(A)) - D(x) \quad (2)$$

$$\frac{dy}{dt} = D(x) - S(y, T(A)) \quad (3)$$

$$\frac{dB}{dt} = [RE(z) + C_{a\_down} AM_{in}(A) + C_{d\_up} U] - [C_{f\_down} B + C_{a\_up} BM_{out}(A) + N(m, z, A, B)] \quad (4)$$

$$\frac{dm}{dt} = N(m, z, A, B) - V(m, z) \quad (5)$$

$$\frac{dz}{dt} = V(m, z) - E(z) \quad (6)$$

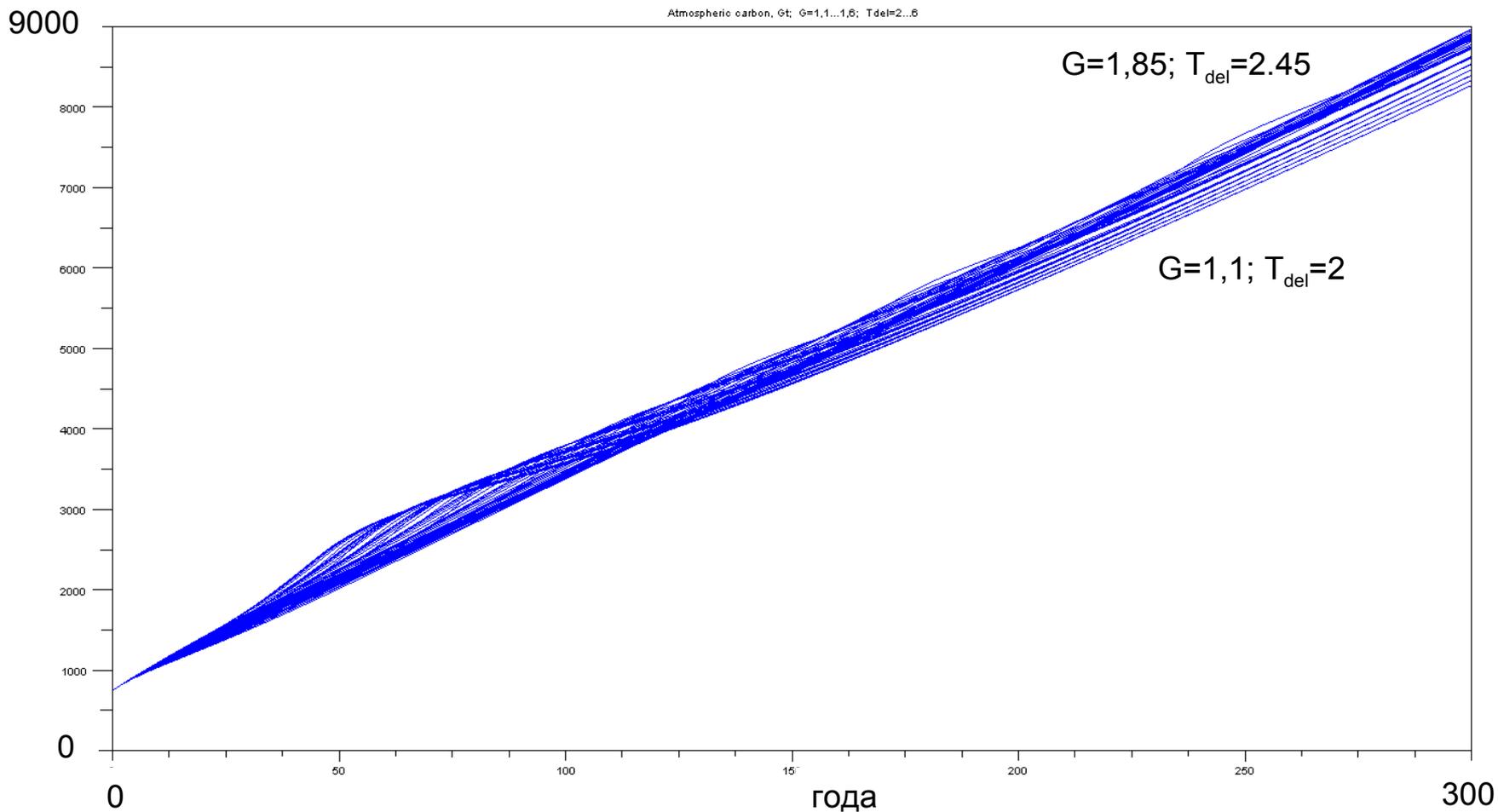
$$\frac{dU}{dt} = C_{f\_down} B - C_{d\_up} U + (1 - R)E(z) \quad (7)$$

$$N(m, z, A, B) = V_M m(m_{lim} - z - m) K_m W(B) f_m(T(A))$$

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

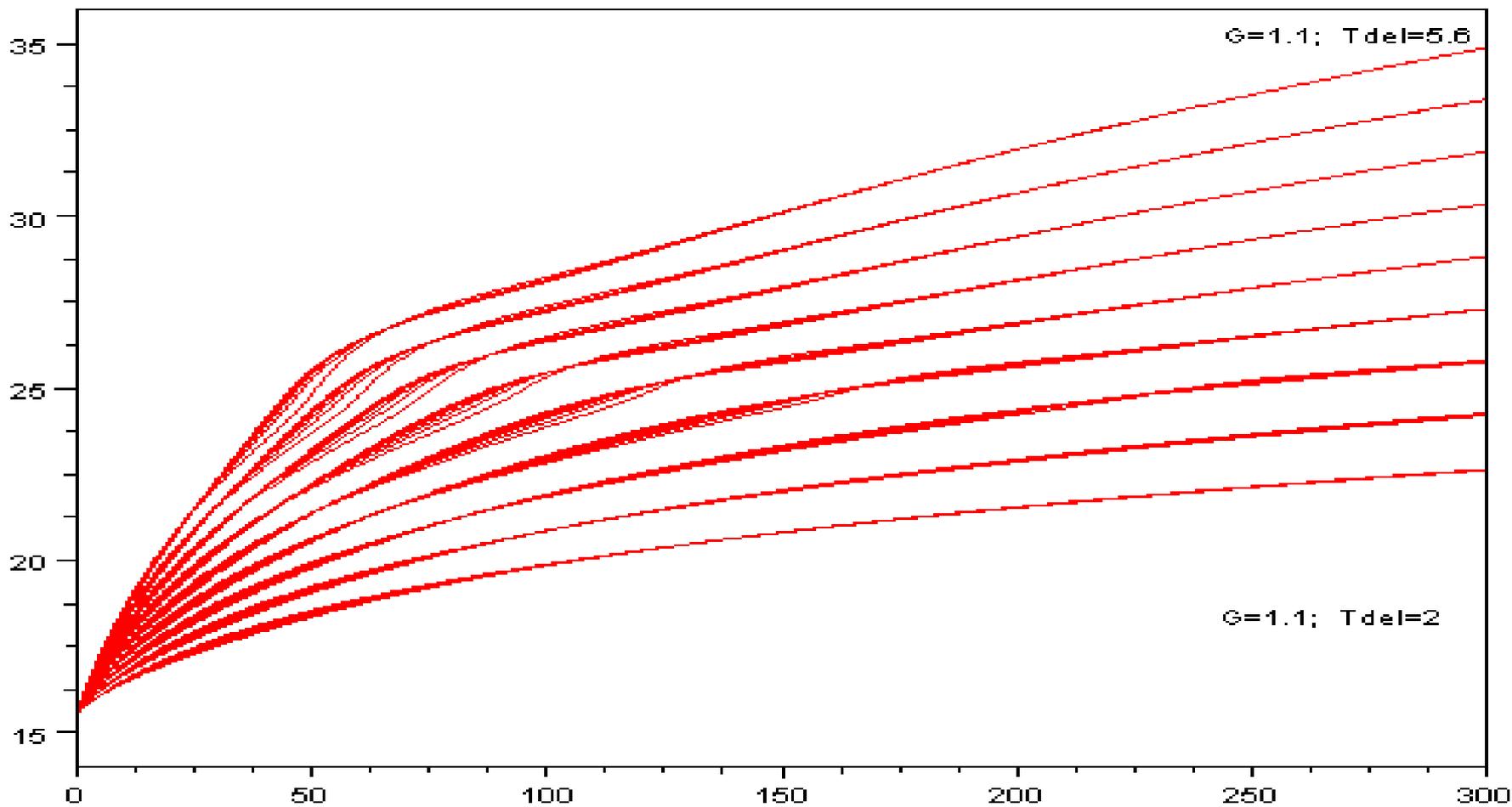
# Прогноз количества углерода в атмосфере в объединенной модели на **300** лет.

Изменение чувствительности климата 2-6 совместно с изменением коэффициента  $G$  в пределах 1,1-2,0



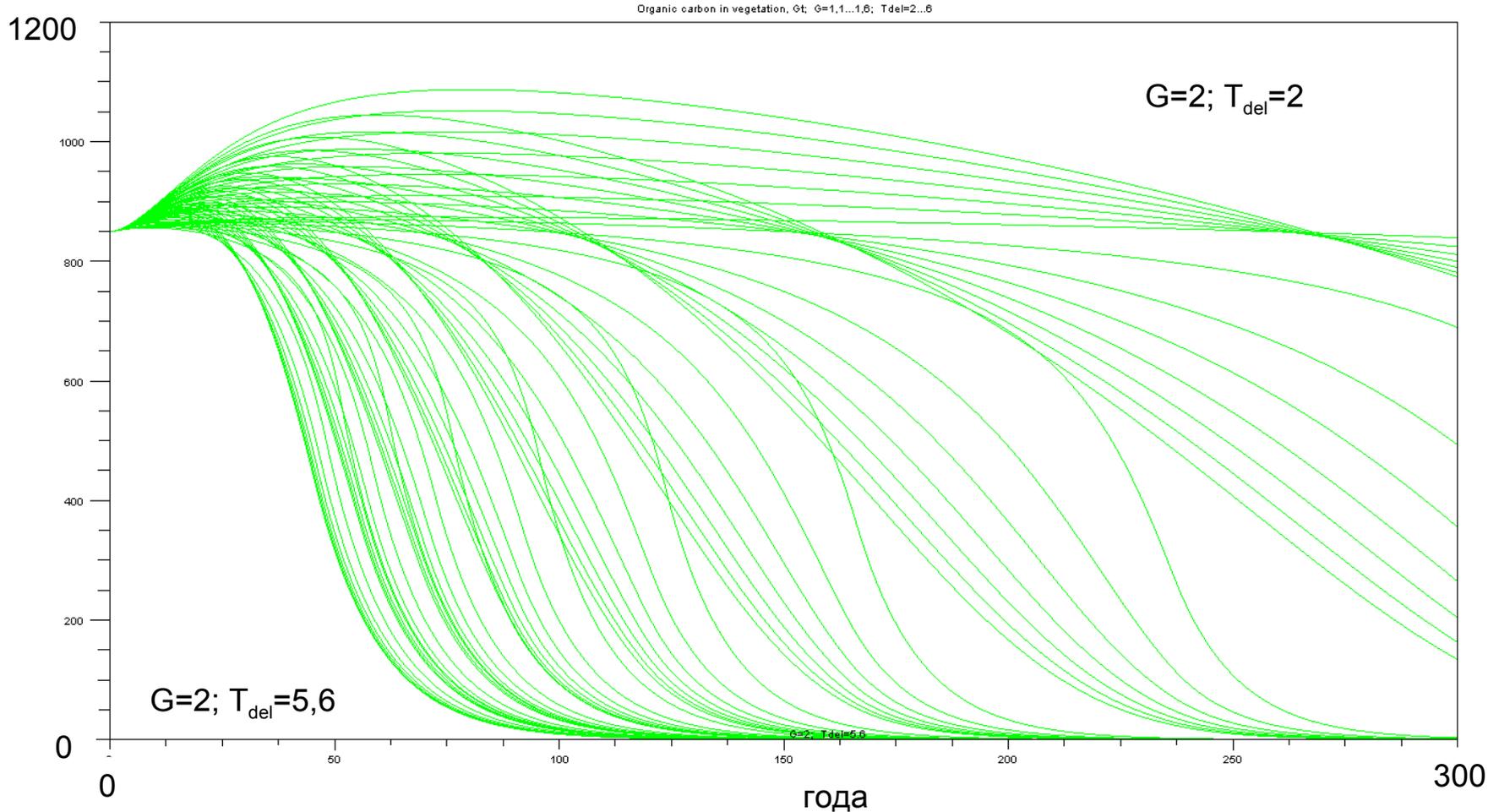
Прогноз **температуры** в объединенной модели на **300 лет**.  
Изменение чувствительности климата 2-6 совместно с изменением  
коэффициента  $G$  в пределах 1,1-2,0

Temperature, Celsius;



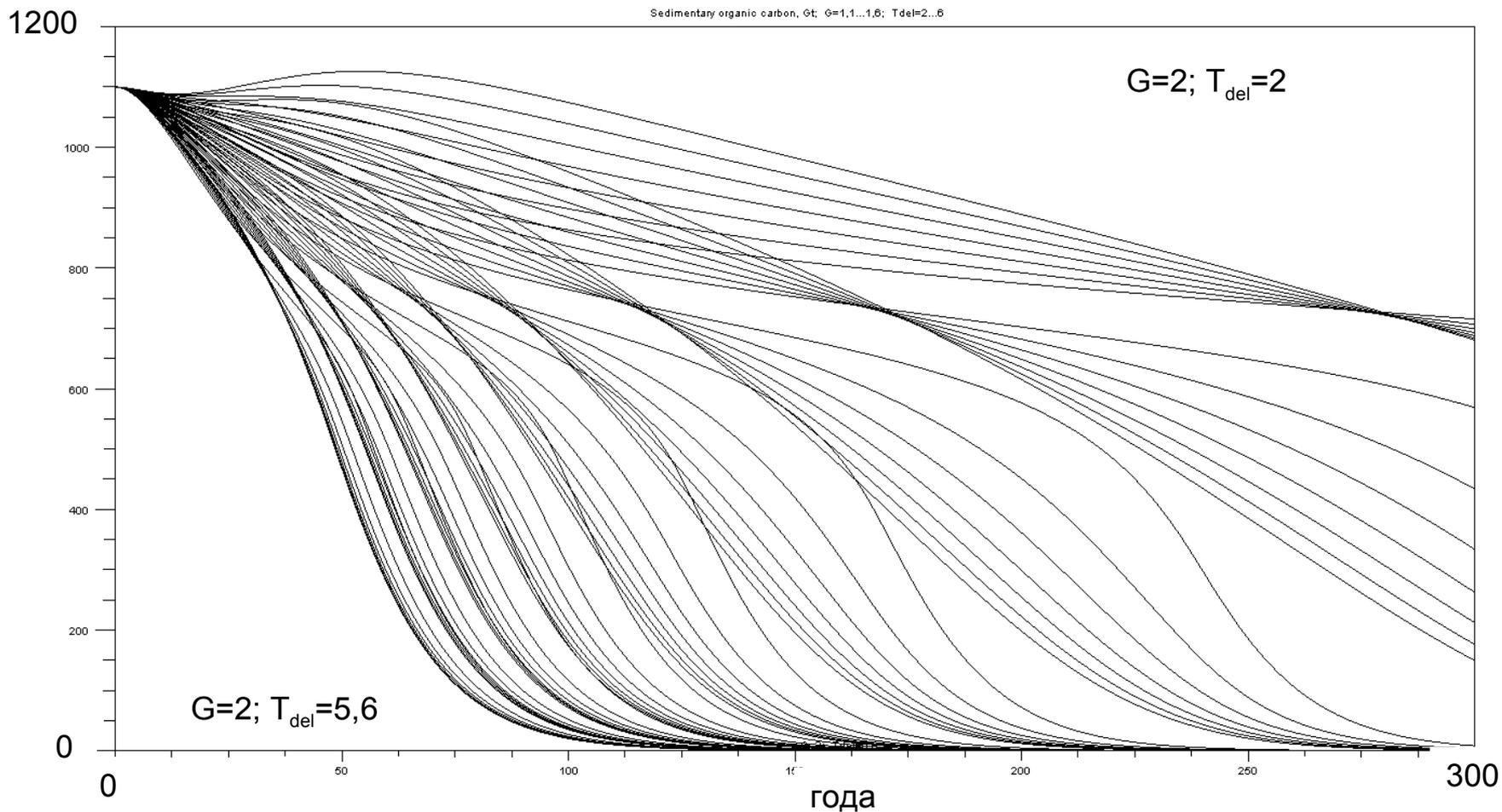
# Прогноз количества углерода в биомассе в объединенной модели на 300 лет.

Изменение чувствительности климата 2-6 совместно с изменением коэффициента  $G$  в пределах 1,1-2,0

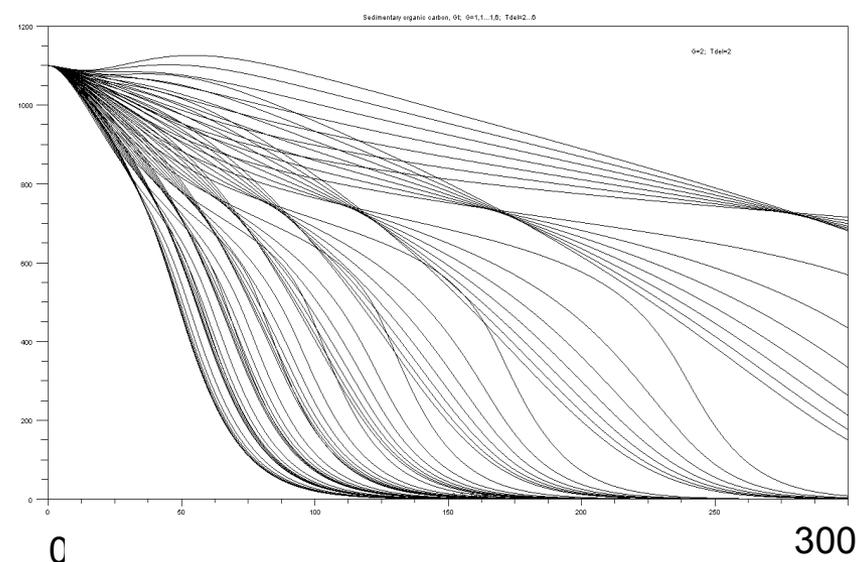
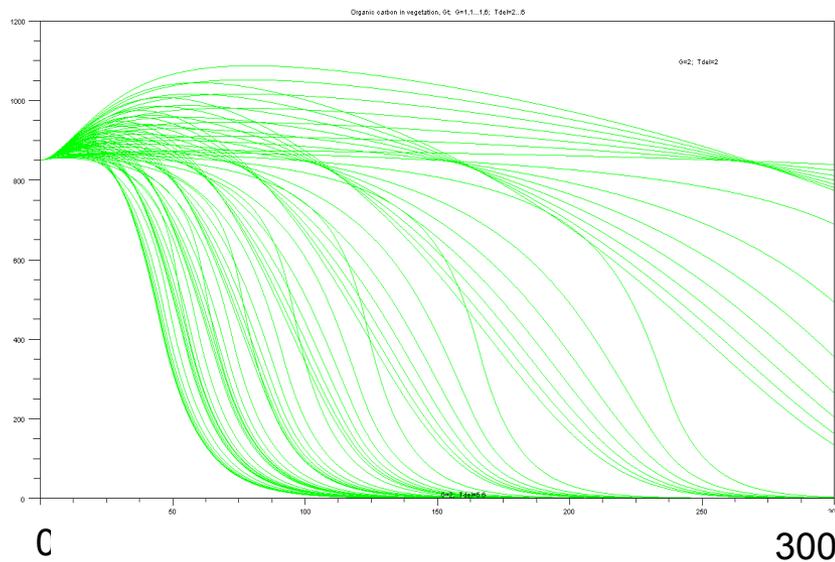
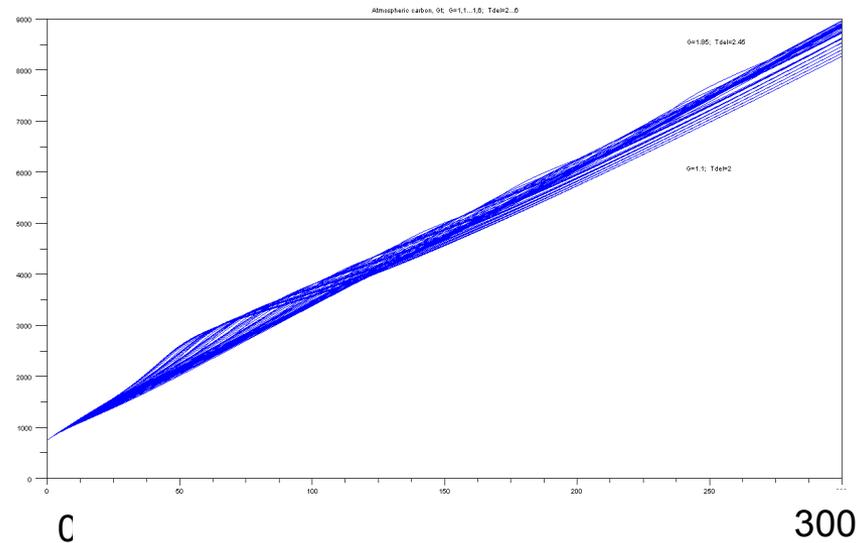
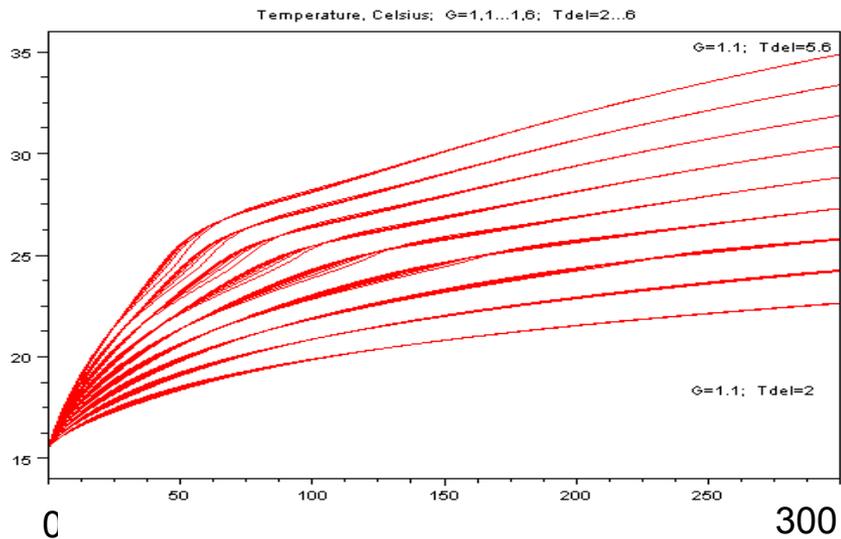


# Прогноз количества углерода в почве в объединенной модели на 300 лет.

Изменение чувствительности климата 2-6 совместно с изменением коэффициента  $G$  в пределах 1,1-2,0



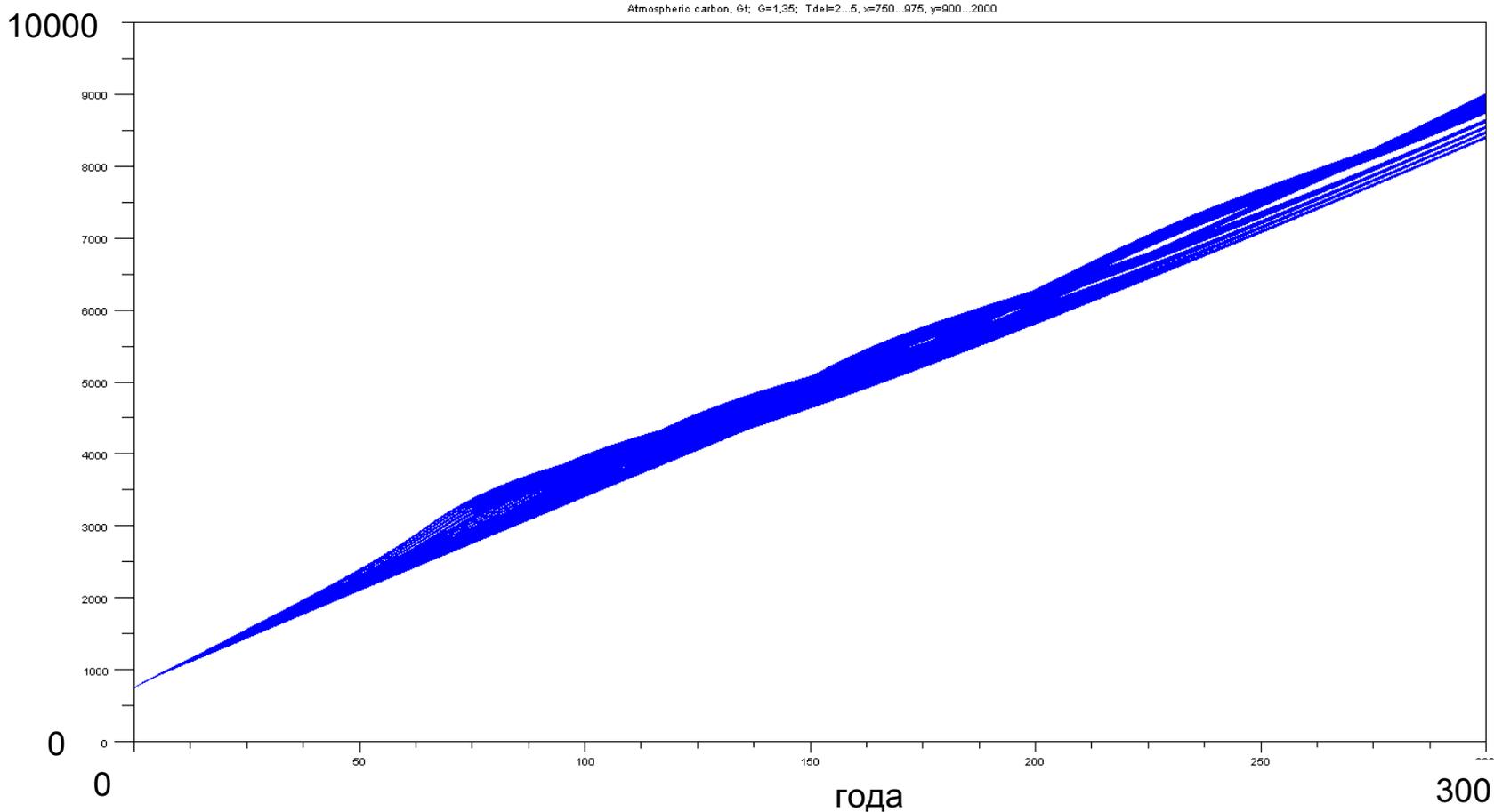
# Сравнительное сопоставление 300 летних сценариев изменения важных переменных в объединенной модели. Изменение чувствительности климата 2-4,7 совместно с изменением коэффициента $G$ в пределах 1,1-2,0



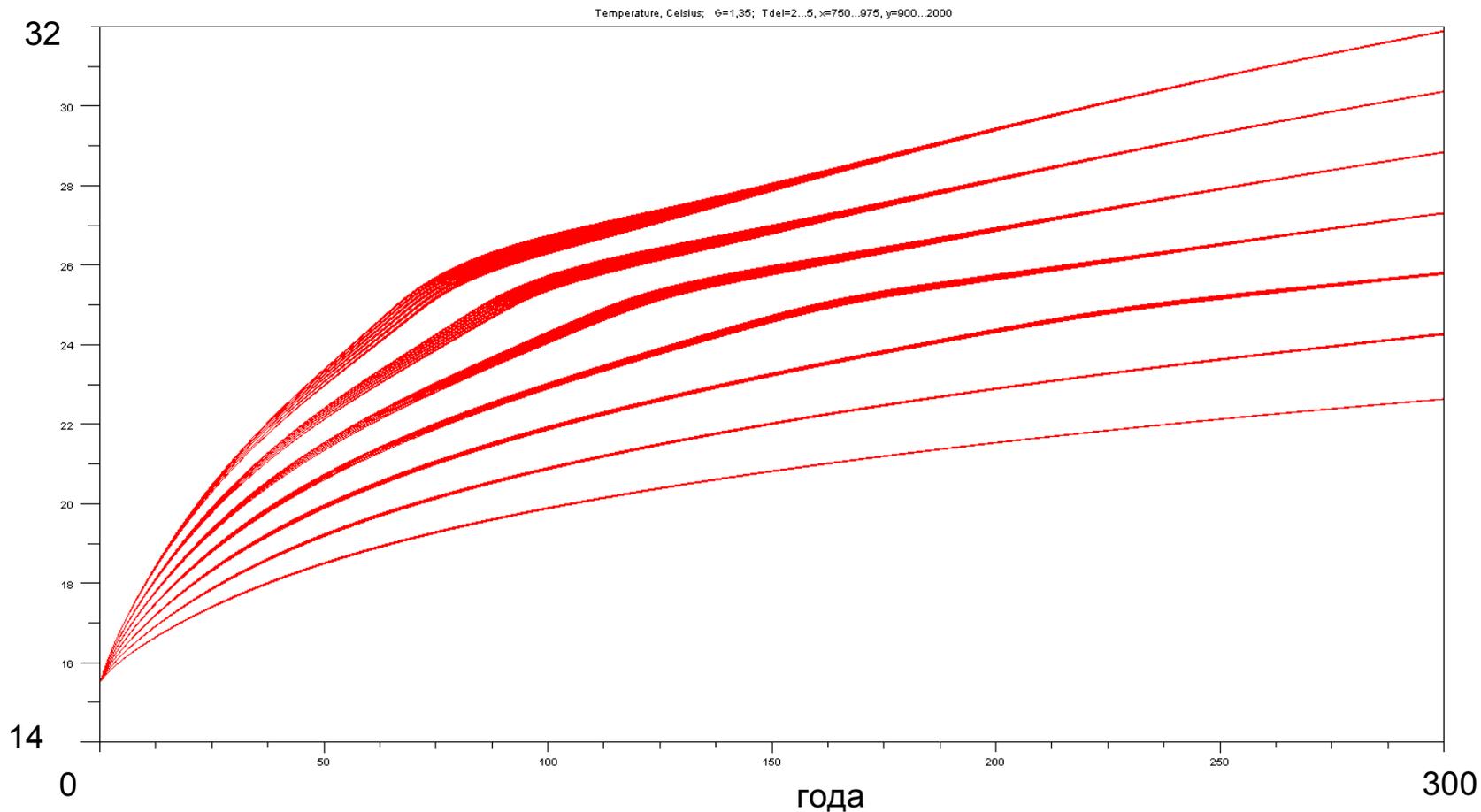
# Прогноз количества углерода в атмосфере в «объединенной» модели на 300 лет

Чувствительность климата 2,0-4,7

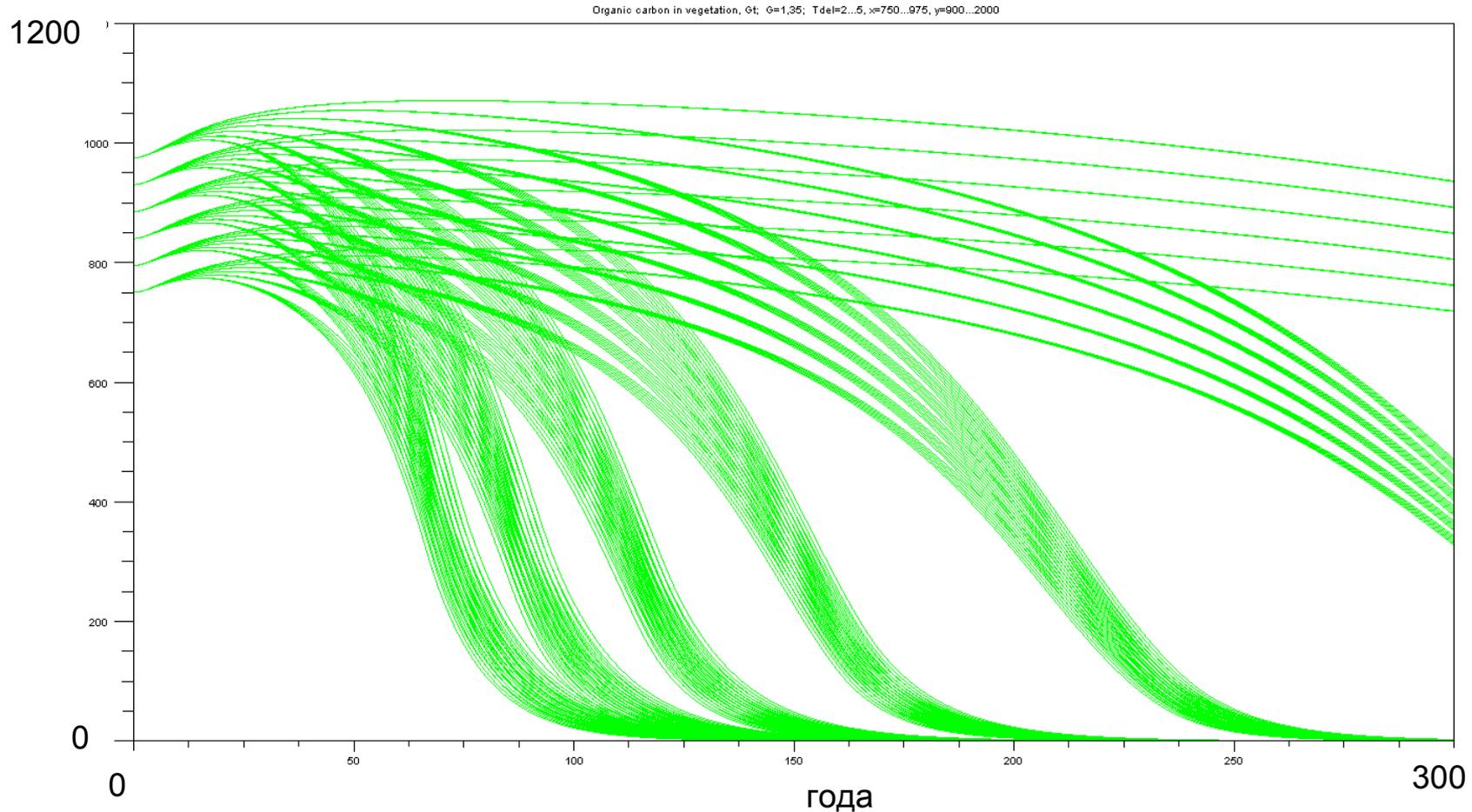
G= 1,35, изменение углерода в наземной биомассе 750-975 ,  
изменение углерода в почве 900-2000



Прогноз **температуры** в «объединенной» модели на **300 лет**  
Чувствительность климата 2,0-4,7  
G= 1,35, изменение углерода в наземной биомассе 750-975 ,  
изменение углерода в почве 900-2000



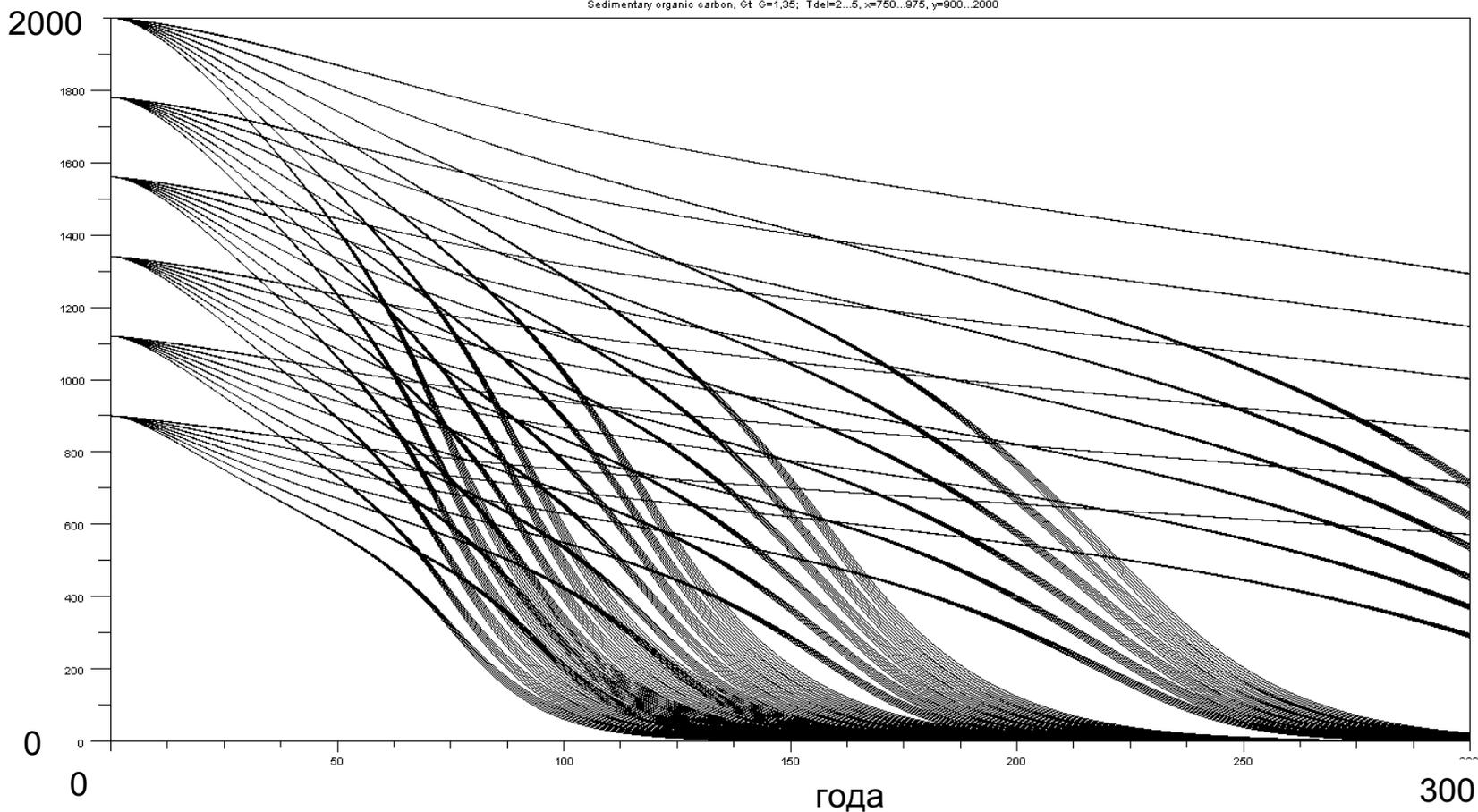
Прогноз количества углерода в наземной биомассе в  
«объединенной» модели на 300 лет  
Чувствительность климата 2,0-4,7,  
G= 1,35, изменение углерода в наземной биомассе 750-975,  
изменение углерода в почве 900-2000



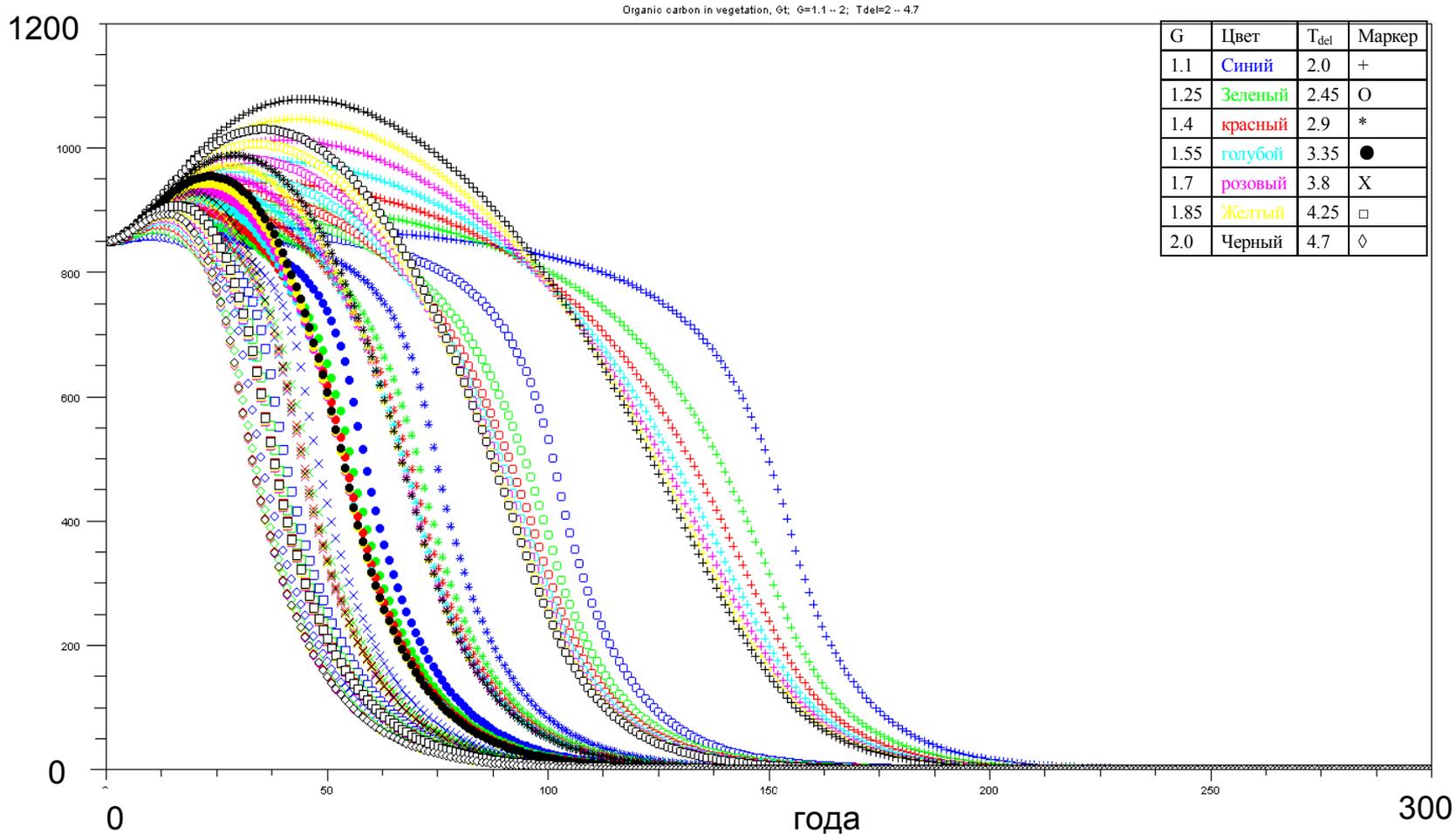
# Прогноз количества углерода в почве в «объединенной» модели на 300 лет

Чувствительность климата 2,0-4,7

G= 1,35, изменение углерода в наземной биомассе 750-975,  
изменение углерода в почве 900-2000,

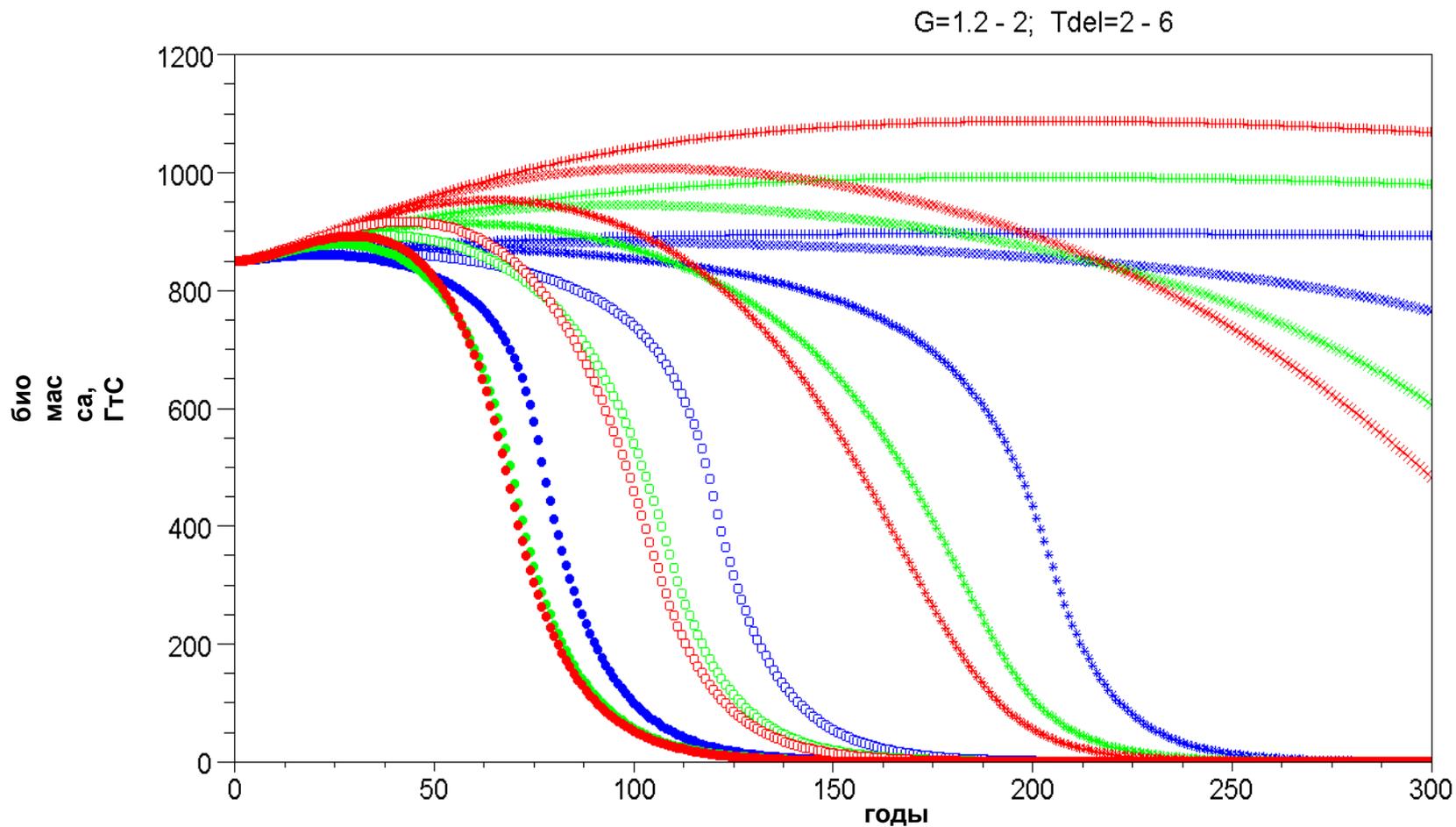


# Прогноз количества углерода в наземной биомассе в базовой модели на 300 лет. Изменение чувствительности климата 2,0-4,7 совместно с $G = 1,1-2,0$



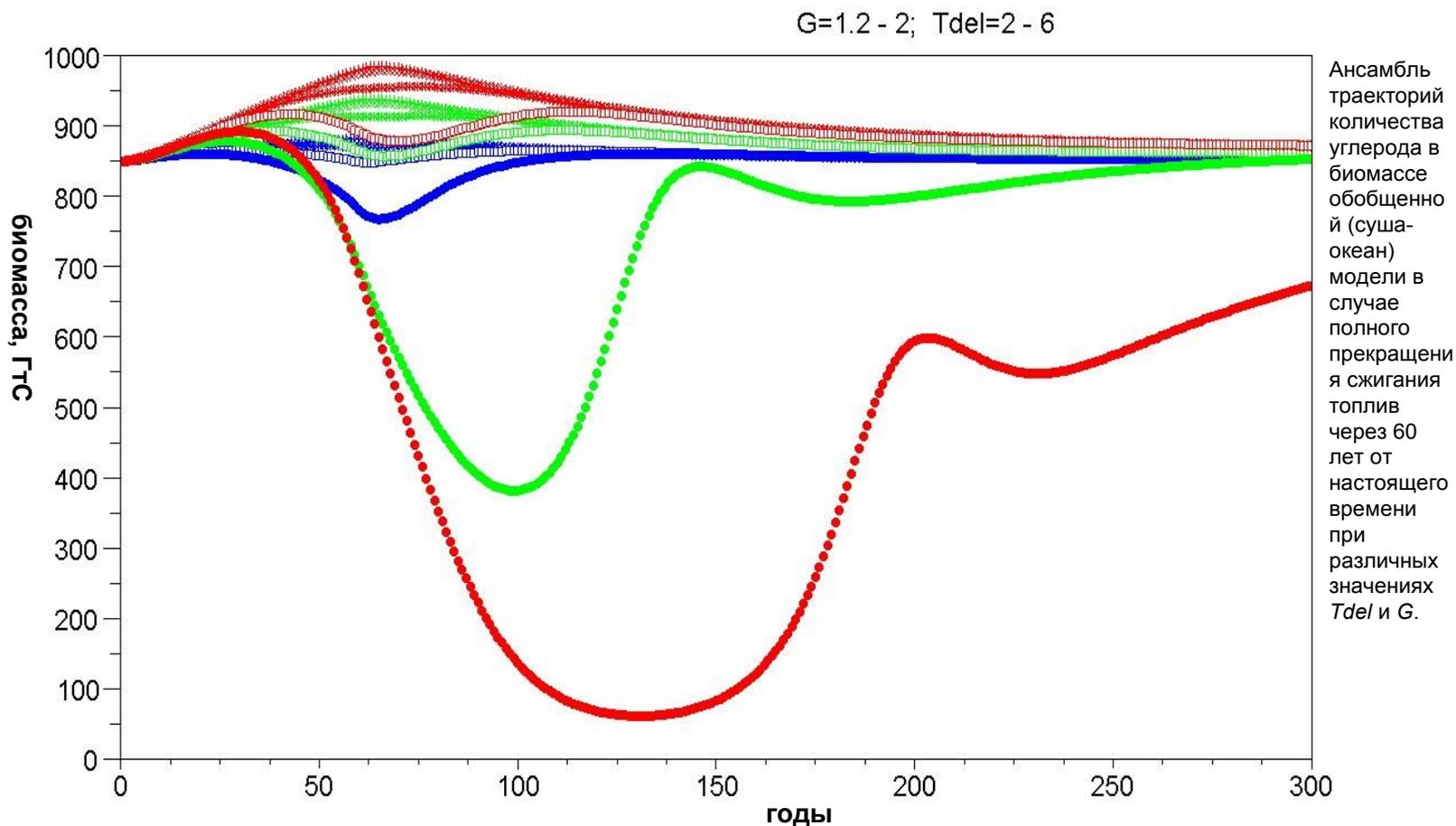
# Прогноз количества углерода в наземной биомассе в «объединенной» модели на 300 лет.

Изменение чувствительности климата 2,0-4,7 совместно с  $G = 1,1-2,0$

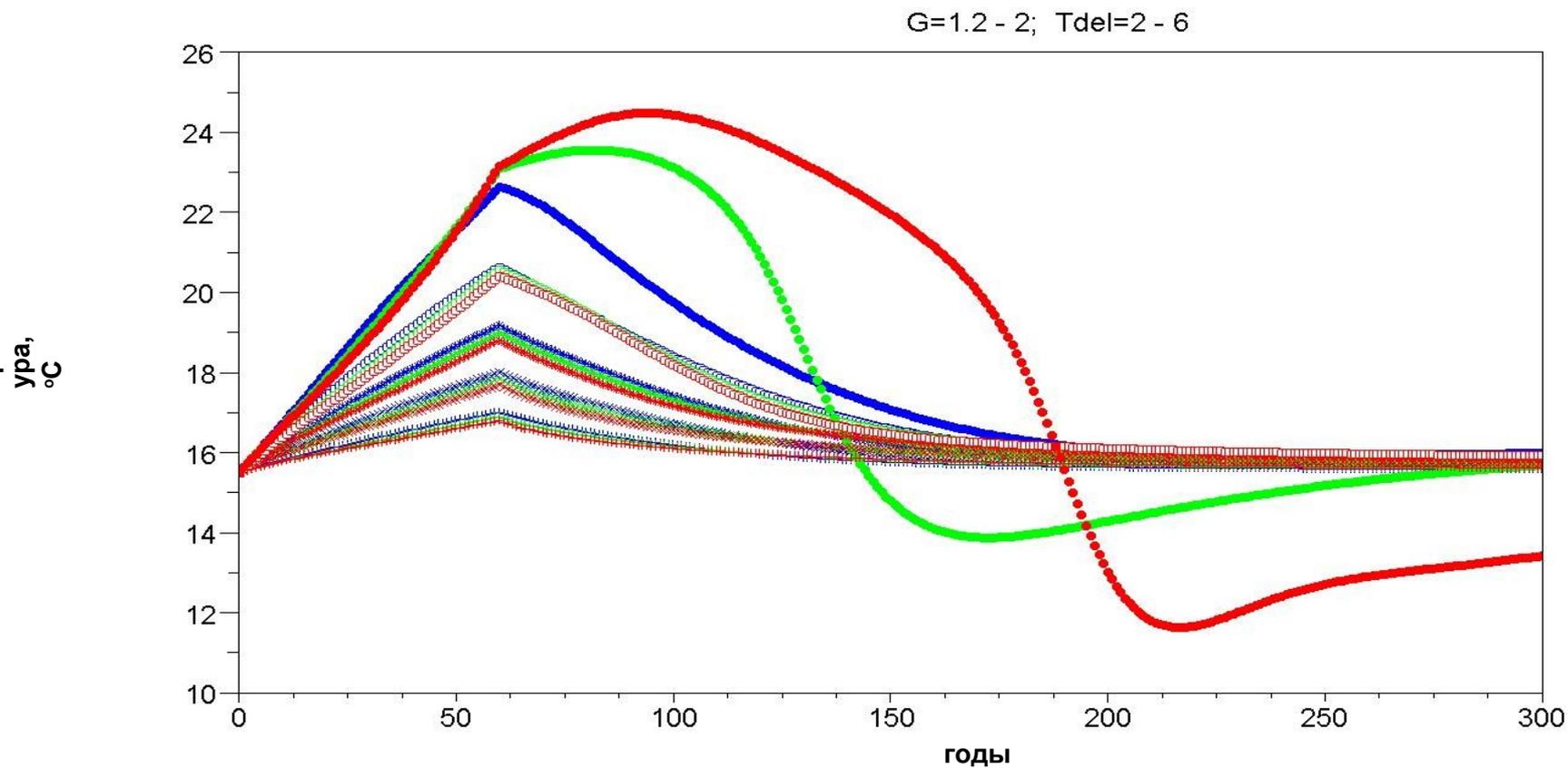


# Прогноз количества углерода в наземной биомассе в «объединенной» модели на 300 лет, при прекращении сжигания топлив через 60 лет.

Изменение чувствительности климата 2-6 совместно с  $G=1,2-2,0$



**Прогноз траекторий глобальной приповерхностной среднегодовой температуры в обобщенной (суша-океан) модели в случае полного прекращения сжигания топлив через 60 лет от настоящего времени при различных значениях  $T_{del}$  (2-6) и  $G$  (1,2-2,0)**



# Система феноменологических уравнений динамики

## гумуса

$$\begin{cases} \frac{dx}{dt} = NPP(w, \varphi, t) - Def(w, \varphi, t)x \\ \frac{dw}{dt} = Pr(\varphi) - k_e T^2(\varphi, t)w \\ \frac{dH}{dt} = Def(w, \varphi, t)x - k(w, \varphi, t)H \end{cases}$$

$x$  – углерод в биомассе;

$w$  – влажность почвы;

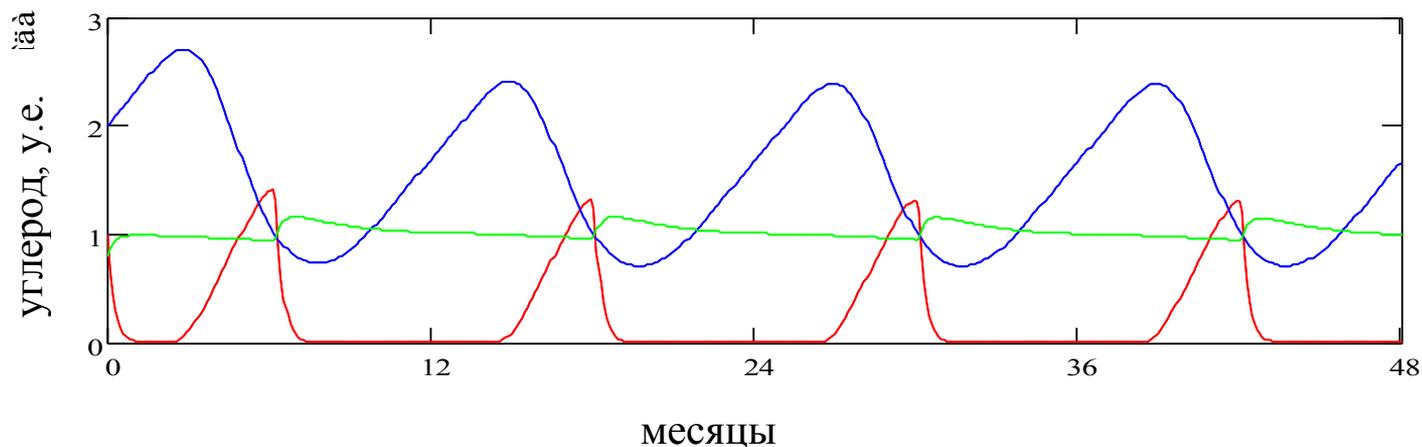
$H$  – углерод в гумусе;

$T$  – температура;

$\varphi$  – широта;

$k_l$  – функция разложения.

$$k(w, \varphi, t) = k_l(\varphi, t) \frac{w - b}{K_m + (w - b)} \theta(w - b)$$



— pytomass  
— moisture  
— soil

Динамика системы на широте 45°с.ш.

$$W(\varphi, t) = AmW(\varphi) \sin\left(\frac{\pi}{6}t - \frac{\pi}{2}\right) + AvW(\varphi)$$

среднемесячная влажность  
широтного круга

$$Veg(V_t, \varphi, t) = \theta [Ts(\varphi, t) - V_t]$$

функция вегетации, где  $\theta$  - ступенчатая функция;  
 $V_t$  - значение температуры начала и завершения  
вегетации.

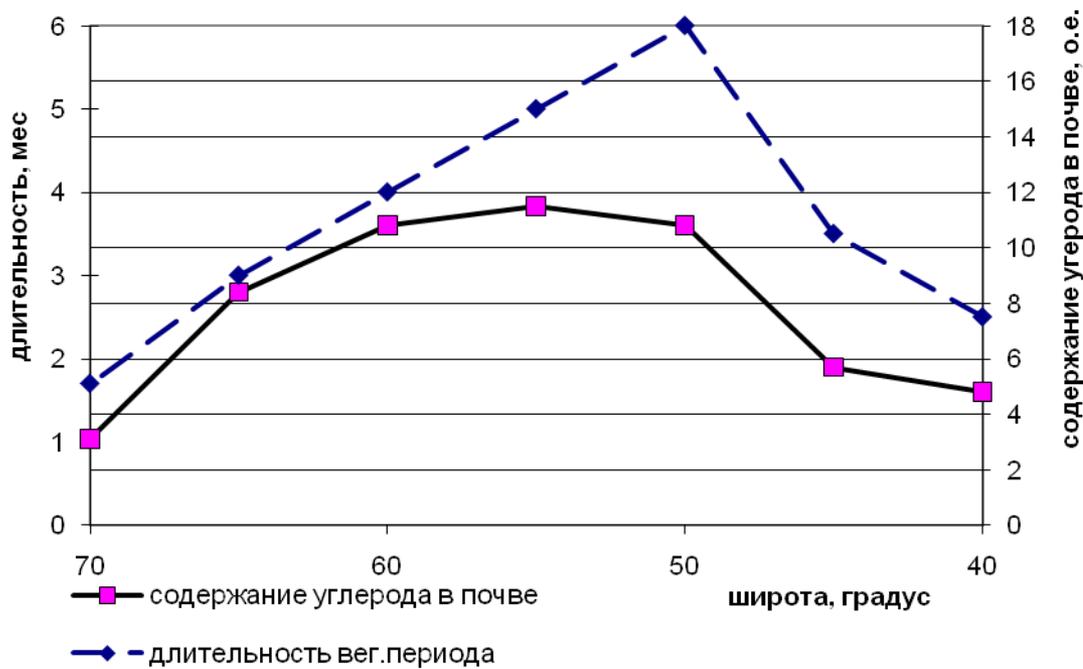
$$NPP(\varphi, t, V_t) = V_{\max} Veg(V_t, \varphi, t) \cdot U(T(\varphi, t)) \cdot U(W(\varphi, t))$$

ЧПП

$$U(x, x_{\min}, x_{\max}, x_{opt}, y_{opt}, \alpha) = \begin{cases} 0 & \text{при } x < x_{\min} \\ c \cdot (x - x_{\min})^\alpha (x_{\max} - (x - x_{\min}))^\beta & \text{при } x_{\min} \leq x \leq x_{\max} \\ 0 & \text{при } x > x_{\max} \end{cases}$$

$$c = \frac{y_{opt}}{\left(\frac{\alpha \cdot x_{\max}}{\alpha + \beta}\right)^\alpha \left(\frac{\beta x_{\max}}{\alpha + \beta}\right)^\beta} \quad \beta = \alpha (x_{\max} - x_{opt}) / (x_{opt} - x_{\min})$$

$$k_i = K_i \cdot U_{Ti}(T(\varphi, t - \tau_T), T_{\min}, T_{\max}, T_{opt_i}) \cdot U_{Wi}(W(\varphi, t - \tau_W), W_{\min}, W_{\max}, W_{opt_i})$$



Стационарные распределения длительности биологической активности и углерода в почве по широтным поясам в модели, учитывающей температуру и влажность почв и по данным наблюдений.

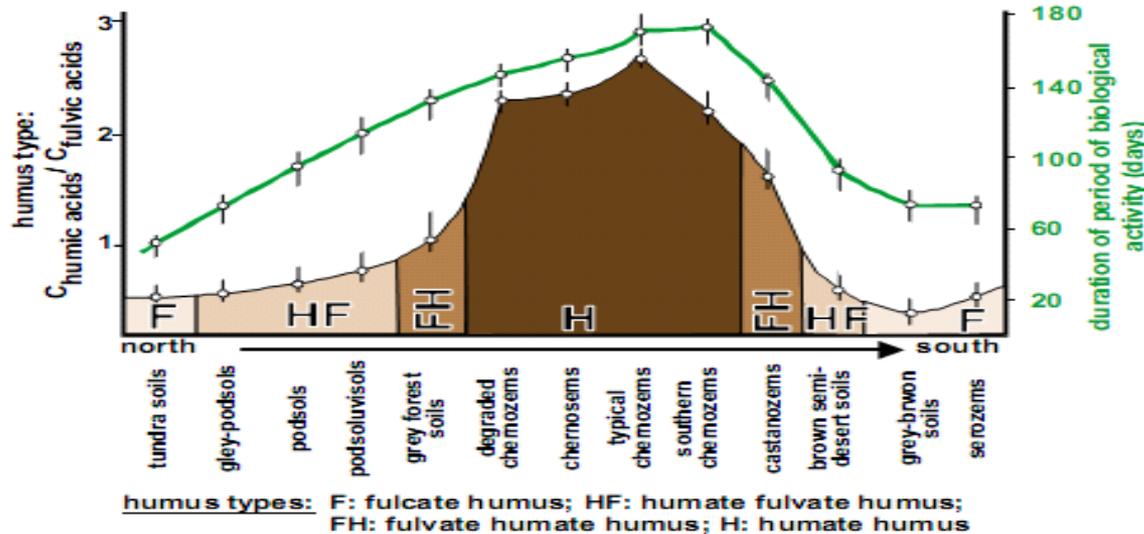


Fig. 2: Relationship between soil type, biological residence time, and humus composition; taken from Orlov (92)

Данные наблюдений о длительности биологической активности и типе гумуса земель России на разных широтах

## Обсуждение

Согласно результатам моделирования способность растений (преимущественно древесных) поглощать двуокись углерода и, как кажется, ослаблять остроту проблемы избыточного антропогенного производства CO<sub>2</sub> (Киотский протокол) с точки зрения развития катастрофических процессов не является столь однозначной. Так, при относительно малой длительности (дозе) антропогенных выбросов большая поглотительная способность растений действительно приводит к меньшему потеплению и играет компенсирующую роль. Однако если рост CO<sub>2</sub> в атмосфере продолжается, то углерод, накопленный в растениях и перешедший потом в мертвую органику начинает все с большей скоростью, по мере роста температуры выходить в атмосферу. Причем океан, уже не успевает компенсировать такой поток углерода, кроме того с ростом температуры поглотительная способность океана уменьшается.

Кроме того, вследствие наличия нелинейностей компонентов биосферной модели и инерционности океана (вернее системы "фотический слой – глубинные слои") после прекращения антропогенного воздействия возможно падение количества углерода в атмосфере, а значит, и температуры до значений меньших, чем это было перед началом катастрофического процесса. То есть глобальное потепление, вызванное антропогенными выбросами двуокиси углерода, может смениться глобальным похолоданием, если эмиссия углерода прекратиться слишком резко.

Далее. Вариации количества углерода в мертвой органике наиболее существенно проявляют себя при ограниченных длительностях эмиссии углерода в атмосферу. Временной порог запуска катастрофических процессов (дата необратимости) практически не зависит от количества углерода в мертвой органике, но тяжесть (максимальная температура, степень разрушения биоты) возрастают с ростом количества углерода. Вариация (ошибка оценки) количества углерода в биомассе приводит к несущественному изменению тяжести изменений, но оказывает влияние на длительность переходных процессов, которая уменьшается с уменьшением углерода в биомассе.

## ВЫВОДЫ

Высокий уровень предельной емкости биомассы лесов является коварным фактором риска, способствующим формированию наихудшего сценария.

Самый главный вывод: уже простая и обозримая модель биосферы демонстрирует эффекты, которые воспринимаются как контринтуитивные, что придает ей эвристическое значение.

**Спасибо за внимание!**