



РЕДУКЦИЯ СЛОЖНОСТИ МОДЕЛЕЙ БИОЛОГИЧЕСКИХ СИСТЕМ

гл.н.с., д.ф.-м.н., Барцев С.И.

Институт биофизики СО РАН, ФИЦ КНЦ СО РАН

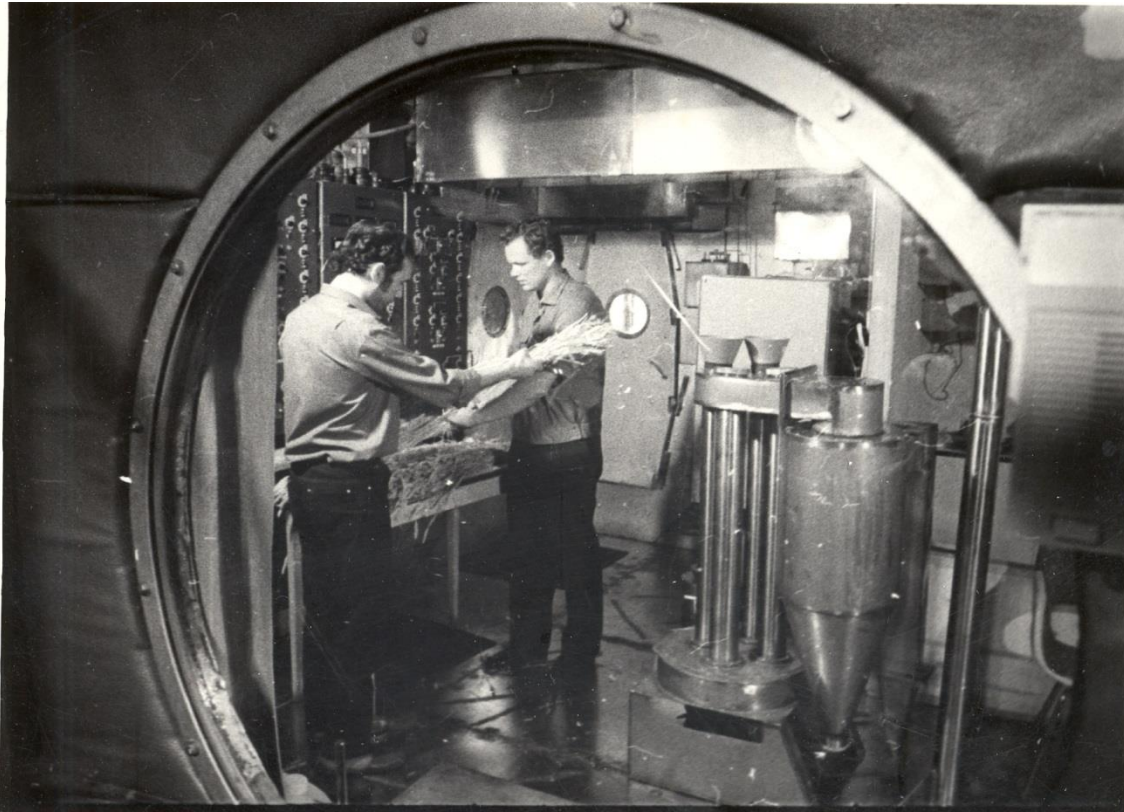
ЗАЧЕМ МОДЕЛИ И РЕДУКЦИЯ ИХ СТРУКТУРЫ (К вопросу об актуальности)

Модель – это единственное средство получения прогноза поведения (реакции, отклика) данной системы в **НОВЫХ**, ранее не исследованных, условиях. В чем, собственно и состоит предназначение науки.

Особенно остро задача прогнозирования стоит в экологии. Просто потому, что каждая экосистема **уникальна**. Можно, например, оценить пределы эластичности данной экосистемы экспериментально, но ценой существования этой экосистемы.

Замкнутые экологические системы жизнеобеспечения (ЗЭСЖО) являются очень простыми экспериментальными моделями биосферы. Умение массово их конструировать и прогнозировать их свойства, означало бы большой шаг в понимании функционирования биосферы.

ЗАМКНУТАЯ ЭКОЛОГИЧЕСКАЯ СИСТЕМА ЖИЗНЕОБЕСПЕЧЕНИЯ (ЗЭСЖО) ЧЕЛОВЕКА – БИОС-3



Вид через иллюминатор БИОС-3 во время эксперимента

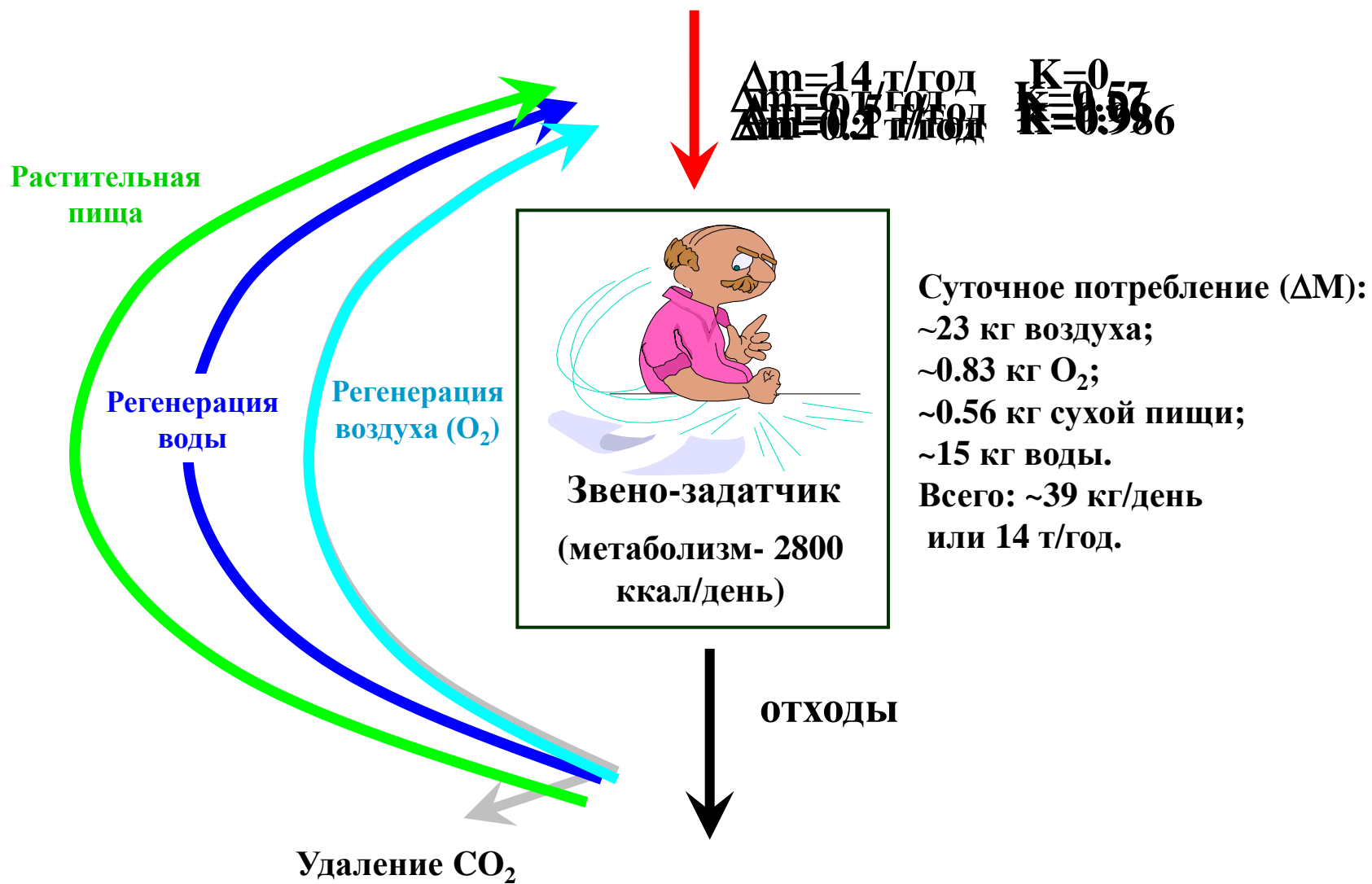
Биорегенеративная система БИОС-3 создана в 1972 году

Из всех ЗЭСЖО, созданных в мире до настоящего времени, только БИОС-3 позволила обеспечить жизнь в автономном режиме экипажа (2-3 человека) в течение 6 месяцев за счет замыкания цикла по воде и газу почти на 100%, пище - более 50%.

Практически важным при проектировании ЗЭСЖО является редукция числа возможных вариантов ее структуры. В рамках оптимизационного подхода к понижению сложности описания ЗЭС необходимо разработать теоретический инструментарий, поскольку эмпирический материал нужно еще получить.

УРОВНИ ЗАМКНУТОСТИ И ЗАПАСЫ

Коэффициент замкнутости: $K = 1 - \frac{\Delta m_{in}}{\Delta M}$

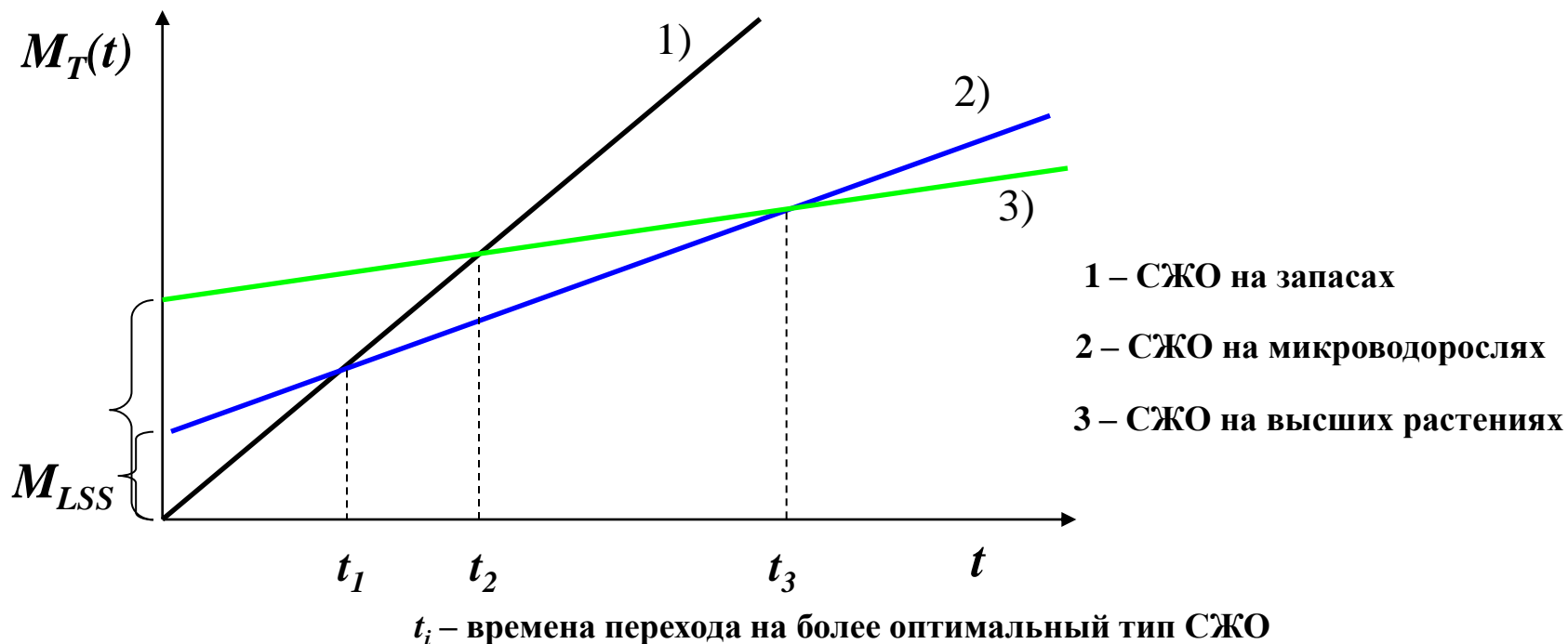


РАЗРАБОТКА ТЕОРЕТИЧЕСКОГО ИНСТРУМЕНТАРИЯ ДЛЯ КОНСТРУИРОВАНИЯ ОПТИМАЛЬНЫХ ЗЭСЖО

Впервые предложен и использован критерий интегральной массы ЗЭСЖО

$$M_T(t) = M_{LSS} + \Delta m \times t$$

где M_{LSS} – масса постоянной (нерасходуемой) части СЖО; Δm – масса, поступающая в систему из запасов в единицу времени; t – время работы СЖО.



1. Bartsev S.I., Gitelson J.I., Mezhevikin V.V., Okhonin V.A., Doll S.C., Rao N.S. (1996) First Level of Life Support System (LSS) Closure: Optimization of LSS Structure for Different Functioning Times. *J.Aerospace*, 105(1):900-905.
2. Bartsev S.I., Gitelson J.I., Lisovsky G.M., Mezhevikin V.V., Okhonin V.A. (1997) Perspectives of different type BLSS usage in space missions, *Acta Astronautica*, 39(8):617-622.

MOD LSS Optimizer

Component Type: R T

Mode of Operation:

Component name	Component name	Sedge-Nut	LLLP
Sedge-Nut	Energy consumption	0,08	0,080
Wheat (NH2)	(Cult.+Med.)/(dry mass)	9,24	9,240
M-Algae(NH4)	Part of Cult.Mobil units	0,006	0,006
M-Algae(NH2)	(Equip.Volum)/(dry mass)	0,02	0,020
M-Algae(NO3)	PowSupSys/Energy(best)	65	65,000
Bacteria(NH4)	PowSupSys/Energy(solar)	125	125,000
Bacteria(NH2)	PowSupSys/Energy(nucl.)	25	25,000

Разработана минимальная форма представления компонентов ЗЭСЖО, создана база данных этих компонент и программа для проектирования оптимальных ЗЭСЖО

Optimization window

Time interval (years): <Number of the Interval

LSS STRUCTURE		HUMAN METABOLISM (g/day)		INCOME (g/day):	
Parameters	Values	Proteins	Fats	Proteins	Fats
Mass of Sedge-Nut	5,8548	87,0	42,0	0,00	0,00
Mass of Wheat	60,6611	C.Hydrates	501,7	C.hydrates	0,00
Dis.Ed.Mass of Sedge-Nut	0,0000	O2 Consum.	857,64	Min. salts	0,00
Dis.Ed.Mass of Wheat	0,0000	CO2 Product.	1047,5	Water	0,00
Dis.In.Mass of Sedge-Nut	0,0000	RQ	0,89	Oxygen income	0,00

Total LSS mass (kg) Oxygen disposed
Income (kg/year) CO2 disposed
Total closure (%): Water disposed
Urea disposed

=====

TOTAL INCOME:

Options

CONSTRAINTS ON HUMAN DIET

Metabolic level (kcal/day) =

< Proteins (g/day) <

< Fats (g/day) <

< C.hydrates (g/day) <

Animal Proteins (g/day) =

Animal Fats (g/day) =

MOD PARAMETERS

Maximum time (year) MTBF (hours)

Part of mobile units in Pow.Sup.System

Expandable part of Pow.Sup.System

Coefficients of substances replacement (kg/kg)

CO2 removal coef. Urine removal coef.

O2 removal coef. O2 supply coef.

Параметры СЖО для различных источников энергии

Тип СЖО >>>	Ф/Х СЖО		Гибридная СЖО			БиоСЖО		
Источник энергии >>>	СБ	ЯР	ПС	СБ	ЯР	ПС	СБ	ЯР
Реактор Сабатье (кг)	52	52	25	25	20	-	-	-
Реактор Боша (кг)	54	54	30	30	25	-	-	-
Чуфа (кг)	-	-	5.9	5.9	5.9	5.9	5.9	5.9
Салат (кг)	-	-	4.2	4.2	4.2	4.2	4.2	4.2
Пшеница (кг)	-	-	0	0	13	14.4	14.4	16.8
Общая масса СЖО (кг)	368	349	539	582	754	798	919	775
Поставки (кг/год)	239	239	162	163	110	139	143	127
Потребление энергии (кВт))	0.95	0.95	1.2	1.2	2.3	2.0	2.0	2.2
Интегральная масса СЖО (кг) для 3 летней экспедиции.	1802	1783	1511	1560	1414	1632	1777	1537

СБ обозначает энергосистему на солнечных батареях; ЯР – на ядерном реакторе;
 ПС – прямое заведение солнечного света.

Поскольку по критерию минимальной массы ни один из типов СЖО не имеет существенных преимуществ, то логично перейти к критерию минимального риска экспедиции.

Впервые предложен критерий максимальной надежности

Показано, что максимизировать надежность ЗЭСЖО самой по себе бессмысленно и нужно вводить **критерий надежности всей миссии в целом.**

Общий вид критерия максимальной надежности

$$P_{LSS}(m) + P_{QL}(T) + P_{GMS}(m) \rightarrow \min,$$

где m - масса СЖО, включая массу запасных частей и устройств, обеспечивающих надежность;

$P_{LSS}(m)$ - вероятность катастрофы из-за отказа СЖО, которая, в общем, уменьшается с увеличением массы СЖО;

$P_{QL}(T)$ - вероятность фатальной ошибки экипажа, которая зависит **от качества жизни и времени T пребывания в СЖО;**

$P_{GMS}(m)$ - вероятность катастрофы из-за отказа систем космического корабля, которая, в общем, увеличивается с массой СЖО.

Bartsev S.I., Gitelson J.I., Mezhevikin V.V., Okhonin V.A., Doll S.C., Rao N.S. (1996) Life Support System (LSS) Designing: Principle of Optimal Reliability. *SAE Paper 961365*, 26th ICES, 7 p.

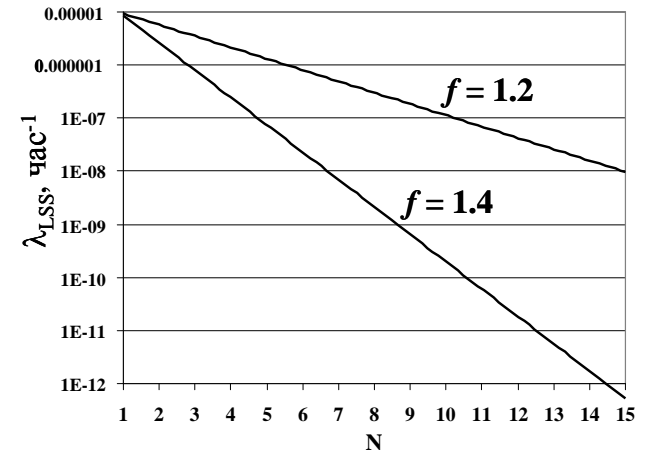
Bartsev S.I., Gitelson J.I., Lisovsky G.M., Mezhevikin V.V., Okhonin V.A. (1997) Perspectives of different type BLSS usage in space missions, *Acta Astronautica*, 39(8):617-622.

Предложена концепция латентного форсажа и соответствующая компоновка регенерационного звена ЗЭСЖО, повышающая ее надежность на несколько порядков

Регенерационный компонент разделяется на несколько идентичных и самодостаточных секций, работающих одновременно в оптимальном режиме. Когда секция выходит из строя, тогда другие форсируются и поддерживают жизнь экипажа, пока неполадка не будет устранена.

В случае секционирования оценка интенсивности катастрофических отказов СЖО равна:

$$\lambda_{LSS} = \frac{N!}{(N_0 - 1)!(N - N_0)!} \frac{\lambda_s^{N-N_0+1} \lambda_r^{N_0}}{(\lambda_s + \lambda_r)^N} e^{-t_{CR} \lambda_r (N - N_0 + 1)}$$



где N - количество автономных секций регенерирующего компонента; $N_0 = N/f$; f - допустимый форсаж (во сколько раз продуктивность компонента может быть увеличена); $\lambda_r = 1/t_r$, t_r - время, требуемое для восстановления компонента; t_{CR} - время существования экипажа в условиях, когда все компоненты СЖО повреждены; λ_s - интенсивность отказов одной секции регенерационного компонента.

ПАРАМЕТРЫ СЦЕНАРИЯ ЛУННОЙ БАЗЫ

Тип СЖО →	H ₂ B	МА	HP ⁿ	HP ^I 0.5	HP ^I 1.0	HP ^v	HP ^v
Общая вероятность катастрофы (1/год)	0.494	0.0513	0.0297	0.0295	0.0294	0.0295	0.0291
Количество единиц СЖО	1	5	14	14	14	14	15
Частота смены экипажа (1/год)	0.66	0.63	0.36	0.36	0.36	0.36	0.36
Масса СЖО (кг)	851	332	890	1937	1992	984	2747
Замкнутость СЖО (%)	98.01	98.21	98.8	99.2	99.4	99.1	99.98
Запчасти (кг/год)	30	11.3	5.4	12.3	12.6	6.1	18
Потребление энергии (кВт)	0.65	2.3	1.8	4.5	4.4	2.0	6.4
Поступление пищи (кг/год)	201	201	159	83	81	120	0
Поступление минеральных солей	55	43	10	21	0	11	0
Композиция диеты:							
Белки (г/день)	160	160	100	100	101	50	87
Жиры (г/день)	100	100	50	59	59	81	42
Углеводы (г/день)	292	292	470	449	448	494	502
RQ экипажа	0.86	0.86	0.87	0.86	0.86	0.87	0.89

H₂B – водородокисляющие бактерии; МА – микроводоросли; HP – высшие растения; HP^I – высшие растения + кат.печь. Индексы: n – нормальная диета; v – вегетарианская диета; 0.5, 1.0 – доли возвращаемых солей; RQ – дыхательный коэффициент.

УНИВЕРСАЛЬНЫЙ КОЭФФИЦИЕНТ ЗАМКНУТОСТИ ЭКОСИСТЕМЫ

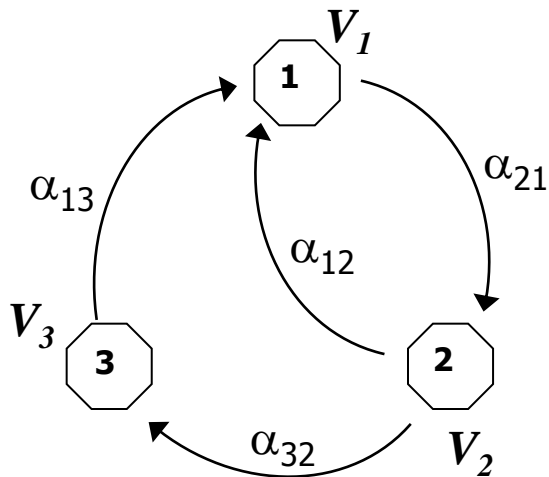


Схема стационарных потоков углерода в простейшей полнозамкнутой ЗЭС, состоящей из звена продуцента (1), консумента (2) и редуцента (3).

Универсальный коэффициент замкнутости в простых случаях равен сумме величин циклов.

$$\mathbf{A} = \begin{pmatrix} 0 & \alpha_{12} & \alpha_{13} \\ \alpha_{21} & 0 & 0 \\ 0 & \alpha_{32} & 0 \end{pmatrix}$$

$$УКЗ = \alpha_{12}\alpha_{21} + \alpha_{13}\alpha_{32}\alpha_{21}$$

Универсальный коэффициент замкнутости (УКЗ) (общий вид)

$$УКЗ = 1 - |\mathbf{A} - \mathbf{E}| \cdot (-1)^N$$

МЕТОДОМ МАКСИМАЛЬНОГО ПРАВДОПОДОБИЯ ВЫВЕДЕНА ФОРМУЛА ДЛЯ КОРРЕКТНОЙ ОЦЕНКИ СТАЦИОНАРНОГО СОСТОЯНИЯ ЗЭС

Использование обычных статистических оценок при обработке данных по ЗЭС чревато получением абсурдных результатов - нарушением закона Ломоносова-Лавуазье.

Оценка математического
ожидания переменных ЗЭС:

$$\hat{\mu}_i = \bar{x}_i + \frac{\sigma_{\bar{x}_i}^2}{\sum_j \sigma_{\bar{x}_j}^2} (A_0 - \sum_j \bar{x}_j)$$

\bar{x}_i - среднеарифметические значения; $\sigma_{\bar{x}_i}^2$ - дисперсии средних;
 A_0 - суммарная масса всех компонентов системы.

Получена формула расчета оптимальной мощности системы регенерации ЗЭСЖО

Значение I при котором достигается минимум общей массы СЖО (M_{RPH} , включая массу источника энергии и системы теплорассеяния) находится аналитически:

$$f(I) = \frac{V_{MAX} \times I}{I_{0.5} + I} \quad \Rightarrow \quad I_{OPT} = \sqrt{\frac{I_{0.5}}{H+P}} = \sqrt{I_{0.5} \times I_{EQ}}$$
$$f(I) = \frac{V_{MAX} \times (I - I_0)}{I_{0.5} + (I - I_0)} \quad \Rightarrow \quad I_{OPT} = I_0 + \sqrt{I_{0.5} \times (I_0 + I_{EQ})}$$

где $I_{EQ} = I / (H + P)$ - такая мощность, когда суммарная масса источника энергии и системы теплорассеяния равна массе блока регенерации - ($H \times I_{EQ} + P \times I_{EQ} = 1$).

Показано, что **оптимальная мощность**, обеспечивающая минимум полной массы СЖО, включая массу источника энергопитания, систем теплорассеяния и массы запасов **не зависит от уровня замкнутости СЖО и продолжительности космического полета для $t > t_c$.**

$$t_c(I) = \frac{1 + (H + P) \times I}{f(I)}$$

Тем самым сложность модели оптимизации ЗЭСЖО резко уменьшилась, т.к. оценка оптимальной мощности не зависит от внутренней конфигурации ЗЭСЖО.

СТЕХИОМЕТРИЧЕСКИЕ ОГРАНИЧЕНИЯ В МОДЕЛЯХ ЗЭС

Впервые показано, что традиционные модели экологических систем, построенные по аналогии с уравнениями химической кинетики не могут описывать ЗЭС.

$$\left\{ \begin{array}{l} \dot{X}_i = \alpha_{ii}^+ V_i - \sum_{j=1}^N \alpha_{ij}^- V_j \equiv 0 \\ \dot{S}_k = \sum_{l=1}^N \alpha_{kl}^+ V_l - \sum_{r=1}^N \alpha_{kr}^- V_r \equiv 0 \end{array} \right. \quad \text{где} \quad \alpha_{ki}^+ = \frac{v_{ik}^+ \mu_k}{\sum_m v_{im}^+ \mu_m}$$
$$V_i = f_i(\vec{X}^*, \vec{S}^*) X_i$$
$$\mathbf{A} \vec{V} = 0$$

Однородная система линейных уравнений имеет ненулевое решение, когда ее ранг меньше числа переменных.

В моделях ЗЭС, построенных на предположении «жесткого» метаболизма, либо заведомо нарушаются стехиометрические соотношения, либо используется неполный набор переменных системы.

Bartsev S.I. (2004) Stoichiometric constraints and complete closure of long-term life support systems. *Adv.Space Res.*, 34:1509-1516.

Предложена концепция адаптивного метаболизма, которая:

- 1. Позволяет создавать адекватные модели ЗЭС;**
- 2. Разрешает противоречие между противоположными трендами устойчивости реальных экосистем и их математических моделей с ростом числа видов;**
- 3. Предлагает еще один способ разрешения парадокса планктона (сосуществование широкого спектра видов на ограниченном наборе ресурсов) ;**
- 4. Предлагает способ разрешения парадокса Вернадского-Дарвина (замкнутость биосферы в целом не является приспособительным признаком особи).**

1. Bartsev S.I. (2004) Stoichiometric constraints and complete closure of long-term life support systems. *Adv.Space Res.*, 34:1509-1516.

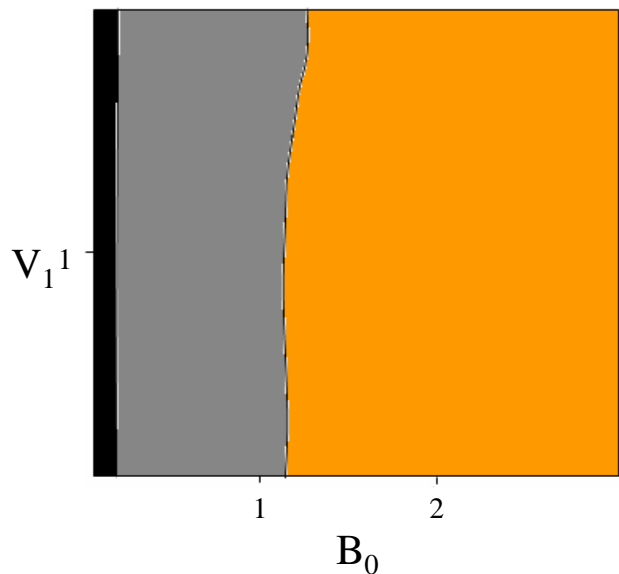
2 Салтыков М.Ю., Барцев С.И., Ланкин Ю.П. (2011) Зависимость устойчивости моделей замкнутых экосистем от числа видов», *Журнал СФУ (серия «Биология»)*, 4:197-208.

3. Saltykov M.Yu., Bartsev S.I., Lankin Yu.P. (2012) Stability of Closed Ecology Life Support Systems (CELSS) models as dependent upon the properties of metabolism of the described species. *Adv.Space Res.*, 49: 223-229.

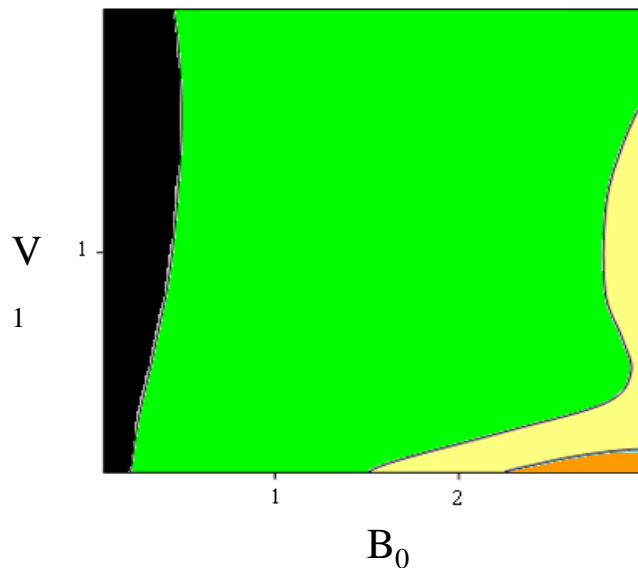
4. Bartsev S.I., Degermendzhi A.G., Sarangova A.B. (2019) Closure of Earth's Biosphere: Evolution and Current State. *J.of Siberian Federal University. Biology*, 12(3):337-347.

Параметрические портреты моделей с жестким и адаптивным, типа «жадный хищник», метаболизмом

жесткий



адаптивный



$$\begin{cases} \frac{dx_1}{dt} = V_1 B x_1 - \frac{\mu_0 x_1}{K + x_1 + x_2} y \\ \frac{dx_2}{dt} = V_2 B x_2 - \frac{\mu_0 x_2}{K + x_1 + x_2} y \\ \frac{dy}{dt} = \frac{\mu_0 x_1}{K + x_1 + x_2} y + \frac{\mu_0 x_2}{K + x_1 + x_2} y - k_d y \\ B = B_0 - x_1 - x_2 - y \end{cases}$$

$$\begin{cases} \frac{dx_1}{dt} = V_1 B x_1 - \frac{\mu_0 x_1}{K + x_1 + x_2} \left(\frac{x_1}{x_1 + x_2} \right) y \\ \frac{dx_2}{dt} = V_2 B_0 x_2 - \frac{\mu_0 x_2}{K + x_1 + x_2} \left(\frac{x_2}{x_1 + x_2} \right) y \\ \frac{dy}{dt} = \frac{\mu_0 x_1}{K + x_1 + x_2} \left(\frac{x_1}{x_1 + x_2} \right) y + \frac{\mu_0 x_2}{K + x_1 + x_2} \left(\frac{x_2}{x_1 + x_2} \right) y - k_d y \\ B = B_0 - x_1 - x_2 - y \end{cases}$$

■ стац. состояние

■ полное вымирание

■ частичное отмирание с колебаниями

■ колебания

■ частичное отмирание

Биосфера, как СЖО космического корабля по имени Земля (О возможности катастрофического развития событий)

В нелинейной многомерной системе возможны пороговые переключения. Биосфера – нелинейная многомерная система и в ней возможны пороговые переключения различной амплитуды, которые для нас могут оказаться катастрофическими.

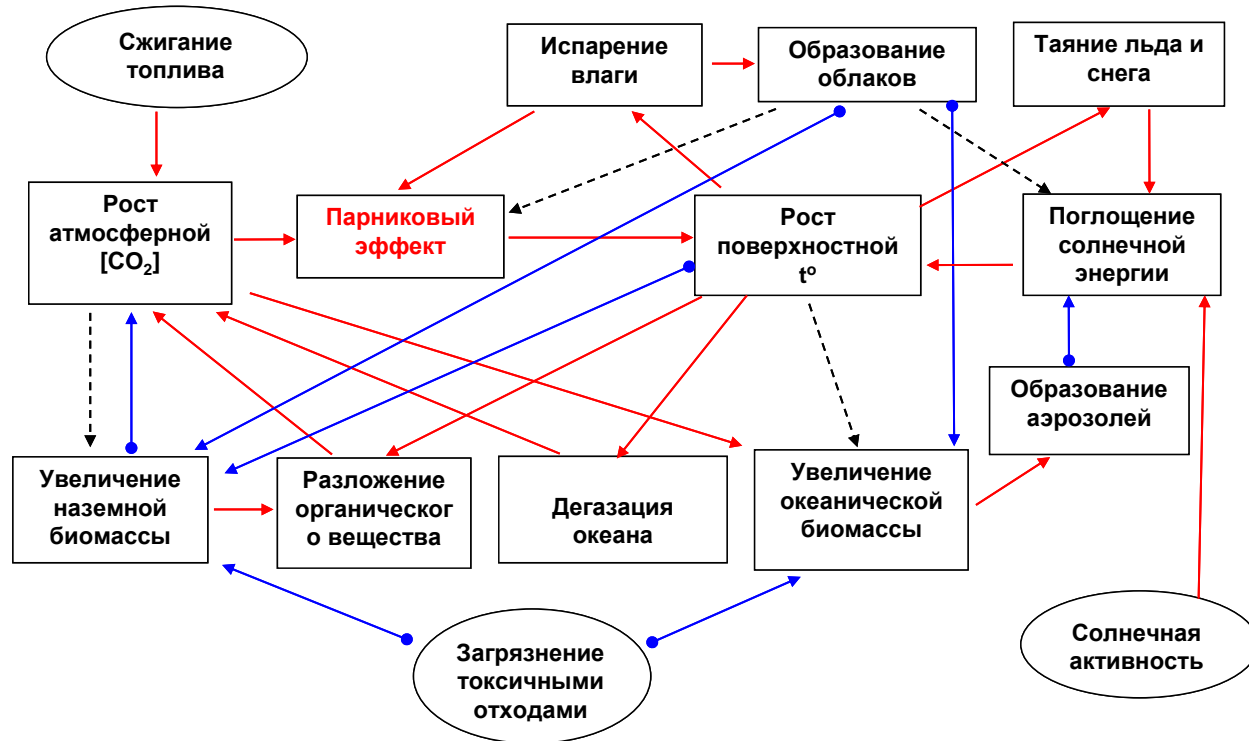


Схема наиболее очевидных взаимодействий между процессами в биосфере.
← - положительный эффект; ← - отрицательный эффект;
← - неопределённый эффект.

ПРЕДЛОЖЕН ПРИНЦИП НАИХОДУШЕГО СЦЕНАРИЯ, КАК СПОСОБ РЕДУКЦИИ СЛОЖНОСТИ МОДЕЛЕЙ ЧЕРЕХ ПЕРЕФОРМУЛИРОВКУ ЦЕЛЕЙ

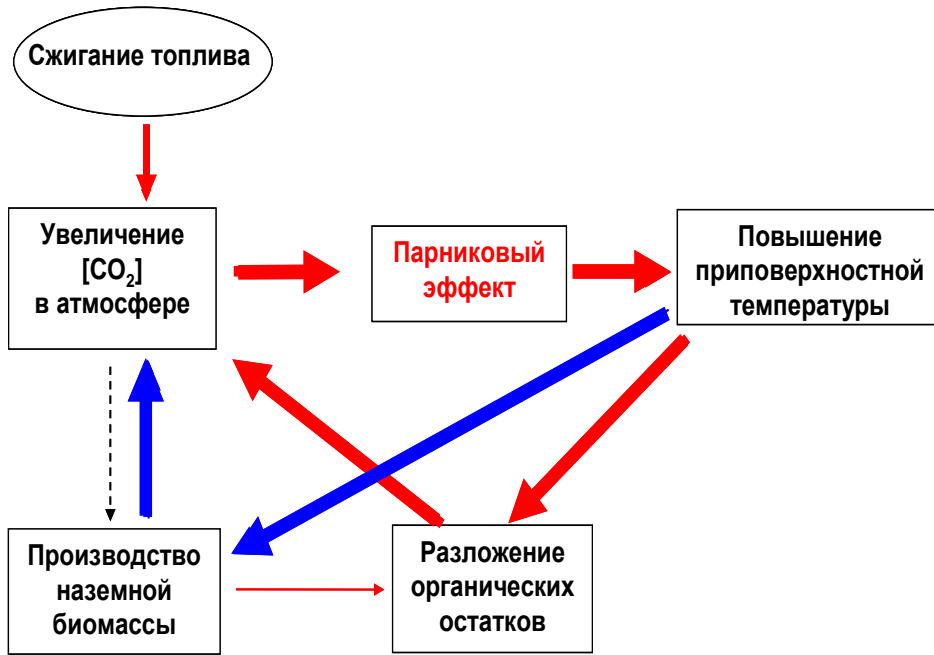
Согласно «принципу наихудшего сценария**» мы должны в первую очередь рассматривать вариант с самыми тяжелыми последствиями, то есть выбирать значения параметров из неблагоприятных концов доверительных интервалов, а недоказанные компенсирующие механизмы игнорировать.**

«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»

(15 принцип Декларации ООН по окружающей среде и развитию. Рио-де-Жанейро, 1992).

Bartsev S.I., Degermendzhi A.G. and Erokhin D.V. (2008) Principle of the worst scenario in the modelling past and future of biosphere dynamics. *Ecological Modelling*, 216(2): 160-171.

Самые опасные положительные обратные связи

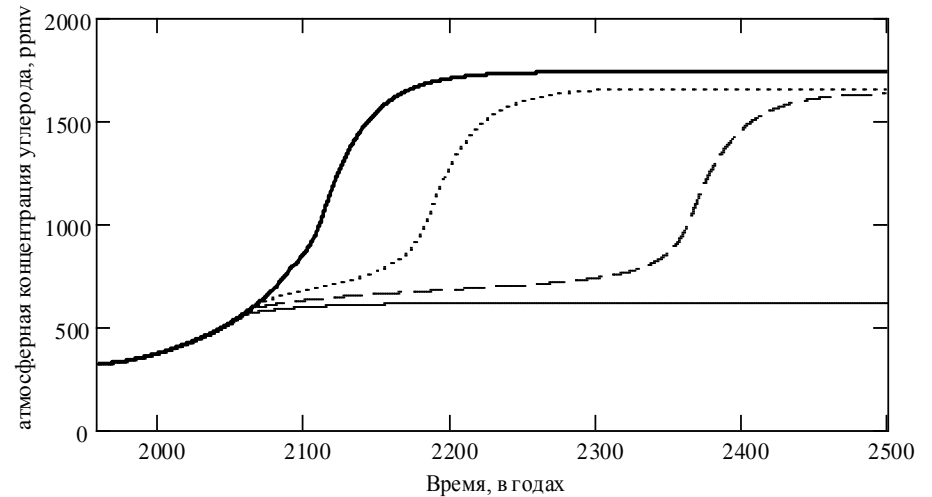
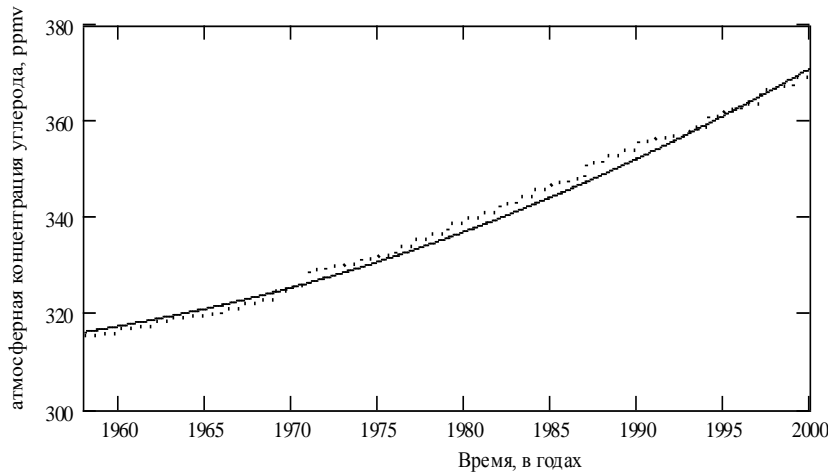


$$\begin{cases} \frac{dC}{dt} = fuel(t) \\ \frac{dx}{dt} = P(x, A, T(A)) - D(x) \\ \frac{dy}{dt} = D(x) - S(y, T(A)) \\ C = A + x + y \end{cases}$$

$$f_P(T) = T^d (T_P - T) \quad T(A) = T_o + T_{del} \cdot \log_2 \left(\frac{A}{A_0} \right)$$

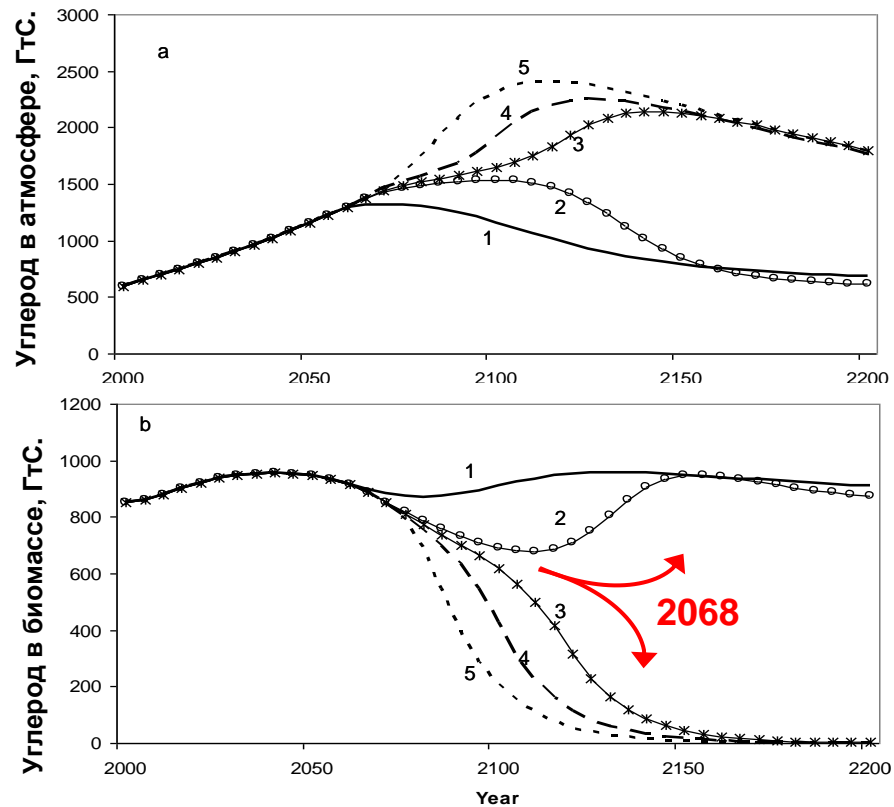
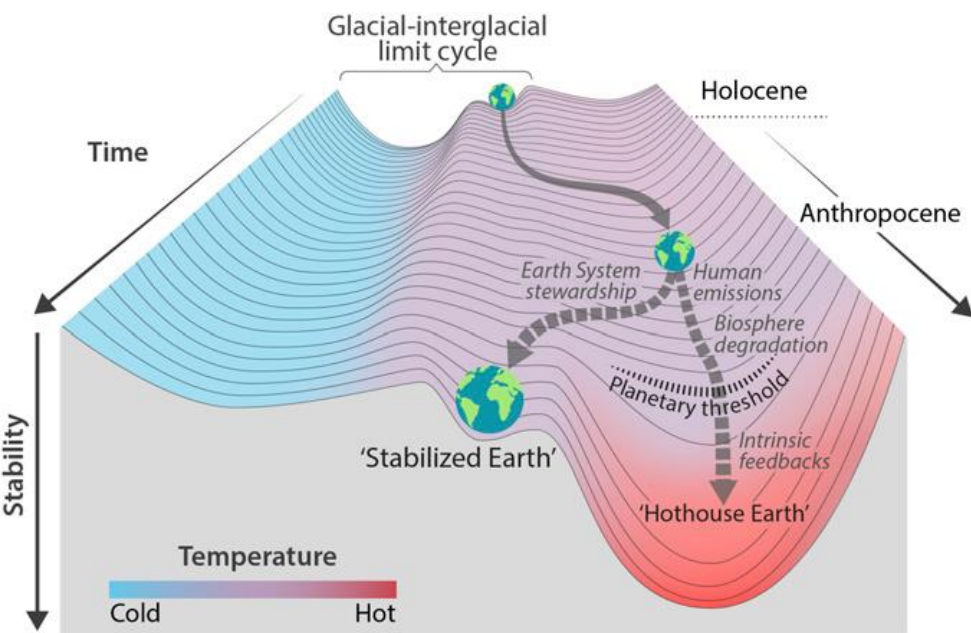
$$P(x, A) = V_x \cdot x \cdot (x_{max} - x) \cdot V(A) \cdot f_P(T(A))$$

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



«Современные» представления о возможных необратимых последствиях антропогенных выбросов парниковых газов

Tipping point – переломный момент.



Дата необратимости – 2068г.

Steffen W. et al. (2018) Trajectories of the Earth System in the Anthropocene. *PNAS*, 115(33) 8252-8259.

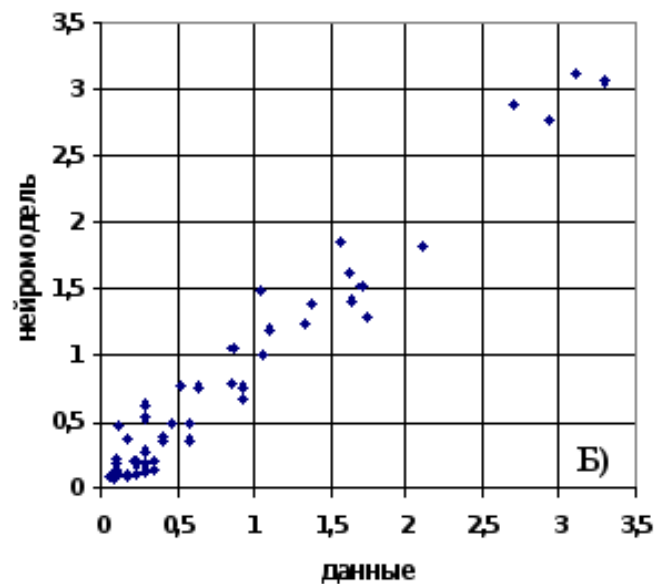
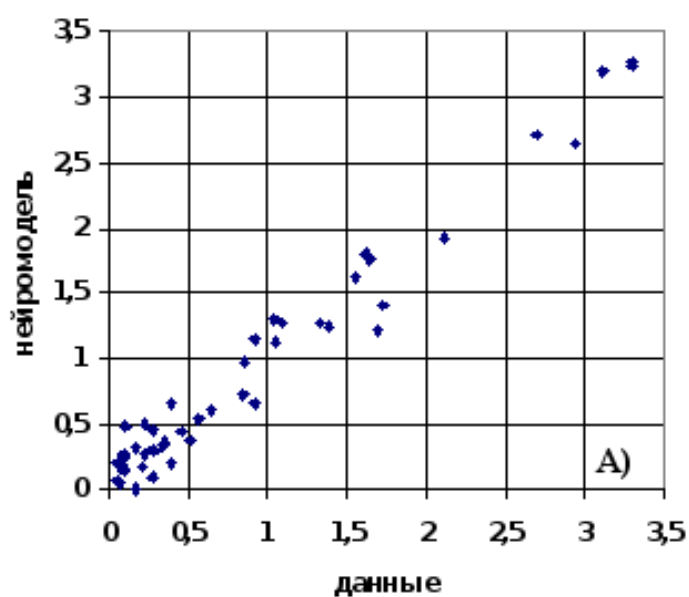
Барцев С.И., Дегерменджи А.Г., Ерохин Д.В. (2005) Глобальная минимальная модель многолетней динамики углерода в биосфере. *ДАН*, 401(2): 233-237.

Bartsev S.I., Degermendzhi A.G. and Erokhin D.V. (2008) Principle of the worst scenario in the modelling past and future of biosphere dynamics. *Ecological Modelling*, 216(2): 160-171.

ПРОСТЕЙШАЯ ФЕНОМЕНОЛОГИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ ФОРМИРОВАНИЯ ПОЧВЫ

Почва является важнейшим компонентом биосферы. Прогноз ее отклика на изменение климата является важным условием построения адекватной модели биосферы.

Применение нейронной сети к базе данных почвенных параметров с последующей **редукцией ее сложности** показало, что для оценки органического углерода достаточно 3 параметра из 12 без существенной потери точности.



Сравнение качества ПТФ для (Сорг, %), реализованных нейронной сетью: А – для 12 показателей (см. табл. 2); Б – для 3 показателей (глубина, Са⁺⁺, текстура).

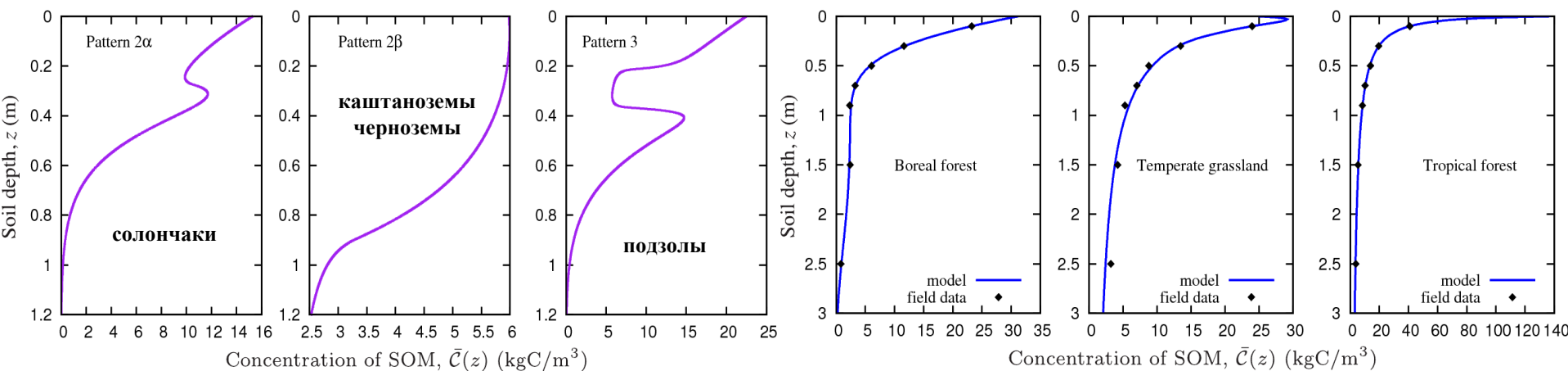
Результаты нейросетевого анализа продемонстрировали возможность представления выявленных зависимостей в виде относительно простых математических формул. Оценка сложности системы послужила эвристическим толчком к построению математической модели почвообразования.

Предложена и разработана простейшая модель, удовлетворяющая основным теориям почвообразования (Докучаев, von Lützow, Berg and McClaughrety).

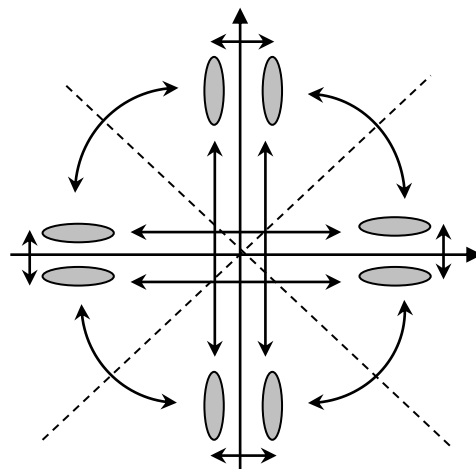
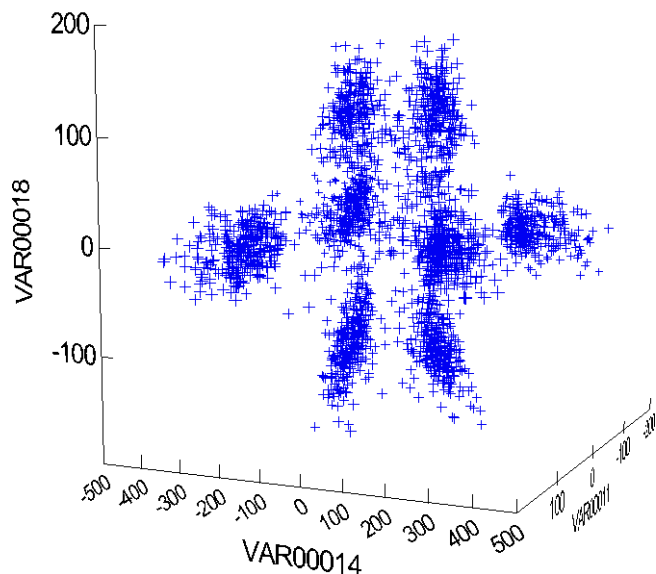
$$\frac{\partial c(h, t)}{\partial t} - \frac{\partial}{\partial h} (h^2 c(h, t)) = -bh^p c(h, t) + D(h, t) - \beta(h)c(h, t) + \alpha(h)s(h, t);$$

$$\frac{\partial s(h, t)}{\partial t} = \beta(h)c(h, t) - \alpha(h)s(h, t).$$

Модель демонстрирует хорошее качественное и количественное соответствие данным полевых наблюдений



На основе эвристического нейросетевого моделирования обнаружено свойство функциональной симметрии и сформулированы функционально-инвариантные преобразования структуры, применимые к построению подобных моделей экосистем.



Преобразования

$$x_{ij}^* = x_{ij} + s_{ij}\lambda$$

$$x_{ij}^* = x_{ij} (-1)^{\delta_{Ri} + \delta_{Rj}}$$

$$x_{it} \leftrightarrow x_{im} \quad x_{tj} \leftrightarrow x_{mj}$$

Трёхмерная проекция 36-и мерного пространства синапсов НМО 6А3

1. Барцев С.И., Барцева О.Д. (2001) Изучение свойств структурно-функционального соответствия эволюционирующих систем с помощью нейросетевых модельных объектов. *ДАН*, 376(4):534-537.
2. Барцев С.И., Барцева О.Д. (2002) Симметрии структуры и эквивиальность эволюционных исходов в простых нейросетевых моделях. *ДАН*, 386(1):114-117.
3. Барцев С.И., Барцева О.Д. (2006) Функционально-инвариантный подход к проблеме уникальности биологических систем: простая нейросетевая модель. *ДАН*, 406(3):С.394-397.
4. Барцев С.И., Барцева О.Д. (2010) Эвристические нейросетевые модели в биофизике: приложение к проблеме структурно-функционального соответствия. Красноярск: Сибирский федеральный ун-т, – 115 с.
5. Bartsev S.I. (2012) Similarity and reduction of complexity of ecosystem models. *Proc. Env. Sci.* 13:316 – 323.

РЕДУКЦИЯ НЕЛИНЕЙНОСТИ В МОДЕЛИ ЗАМКНУТОЙ ЭКОСИСТЕМЫ

$$\begin{cases} \dot{X}_1 = a(A_0 - X_1 - X_2)X_1 - \frac{\mu X_1 X_2}{K + X_1} \\ \dot{X}_2 = \frac{\mu X_1 X_2}{K + X_1} - dX_2 \end{cases}$$

$$\bar{X}_1 = 0.5, \bar{X}_2 = 0.1, a = 0.5, A_0 = 1, \\ \mu = 2, K = 0.5, d = 1$$

$$\lambda_{1,2} = -0.0750 \pm 0.34551i$$



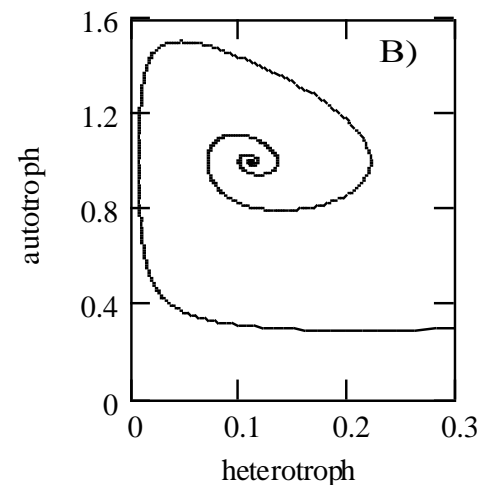
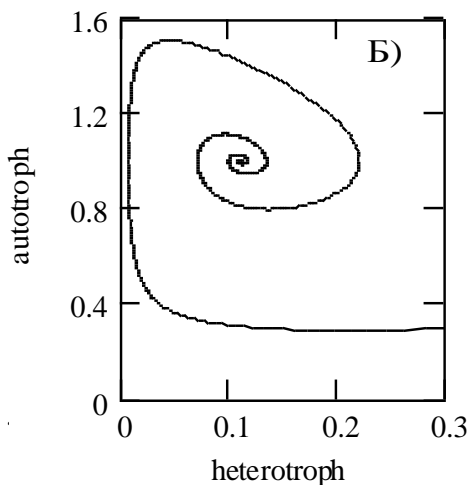
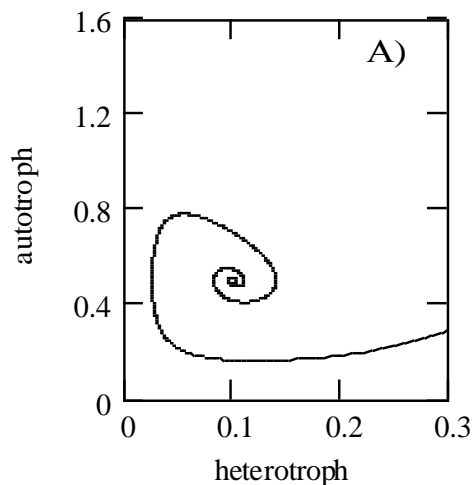
Функционально-инвариантное преобразование

$$G = \lambda_i \frac{\partial}{\partial g_i}$$

$$\begin{cases} \dot{X}_1 = a(A_0 - X_1 - X_2)X_1 - X_1 X_2 \\ \dot{X}_2 = X_1 X_2 - bX_2 \end{cases}$$

$$\bar{X}_1 = 1.0, \bar{X}_2 = 0.11, a = 0.15, A_0 = 1.84, \\ \mu = 300, K = 300, d = 1$$

$$\lambda_{1,2} = -0.0748 \pm 0.34549i$$



А) $\mu = 2$ и $K = 0.5$; Б) $\mu = 300$ и $K = 300$; В) дробно-рациональное выражение \rightarrow билинейное

ФИО кандидата: **БАРЦЕВ СЕРГЕЙ ИГОРЕВИЧ**
Дата рождения: **27 января 1955г.**
Учёная степень, звание: **доктор физико-математических наук**
Место работы: **Институт биофизики СО РАН – обособленное подразделение ФГБНУ «Федеральный исследовательский центр «Красноярский научный центр Сибирского отделения Российской академии наук» (ФИЦ КНЦ СО РАН) (г.Красноярск);**
заведующий лабораторией теоретической биофизики.

Научные достижения:

Автор 132 научных работ, из них 1 монографии, 2 учебных пособий, 2 авторских свидетельств и 4 свидетельств госрегистрации программ для ЭВМ. Индекс Хирша по базе Web of Science – Core Collection равен 6. Индекс цитирования там же – 145.

Направлением научной деятельности Барцева С.И. – специалиста в области теоретической биофизики - является разработка общих подходов к редукции сложности математических моделей биологических систем различных уровней биологической иерархии и, построение концептуальных (эвристических) моделей, выделяющих ключевые свойства этих систем.

Спасибо за внимание!

КОНЦЕПЦИЯ КОСМИЧЕСКОГО СТРАННИКА, КАК РАЗВИТИЕ КРИТЕРИЯ МАКСИМАЛЬНОЙ НАДЕЖНОСТИ НА СЦЕНАРИЙ МИССИИ В ЦЕЛОМ

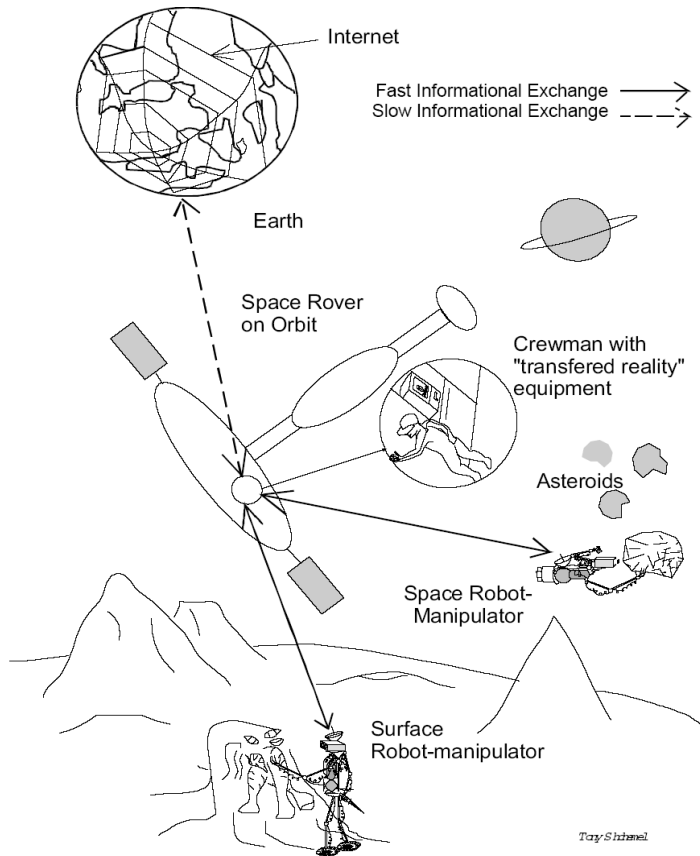
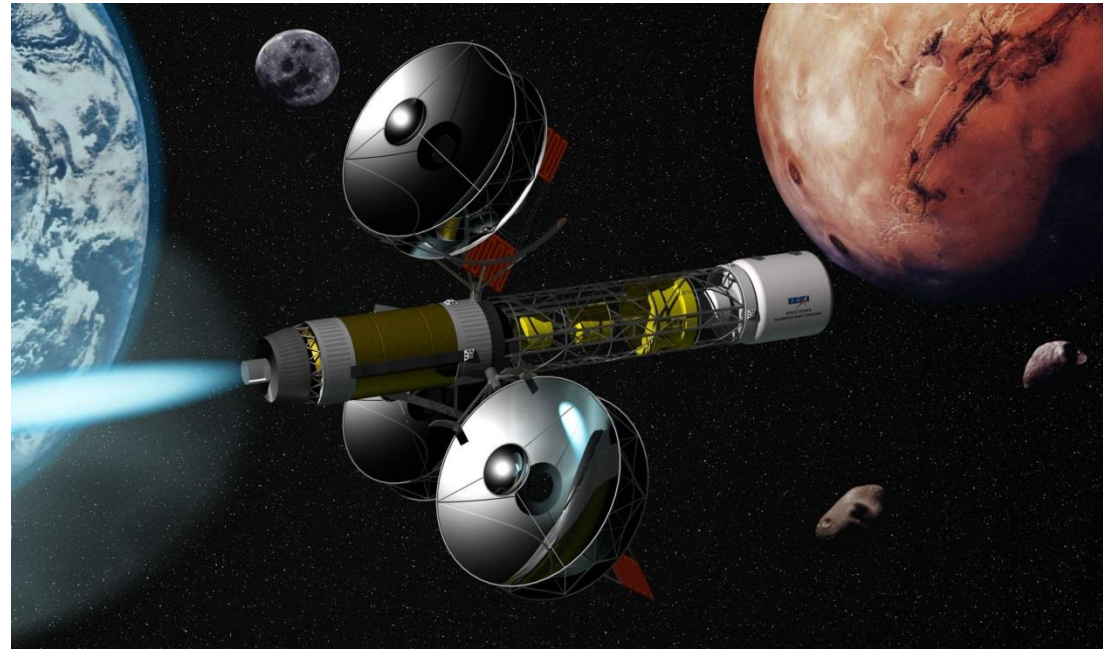


Fig.1. Conventional scheme of information flows during Space Rover activity on site.



Космический странник с ЭРД на Т-слое

Барцев С.И., Гительзон И.И., Межевикин В.В., Охонин В.А. (2000) Дальний космос: люди или автоматы? *Вестник РАН*, 70(7):611-620.

Bartsev S.I., Gitelson J.I., Mezhevikin V.V., Okhonin V.A. (2003) An alternative approach to solar system exploration providing safety of human mission to Mars. *Adv.Space Res.*, 31(1):17-24.

Существуют угрозы глобальных катастрофических событий

Падение астероида

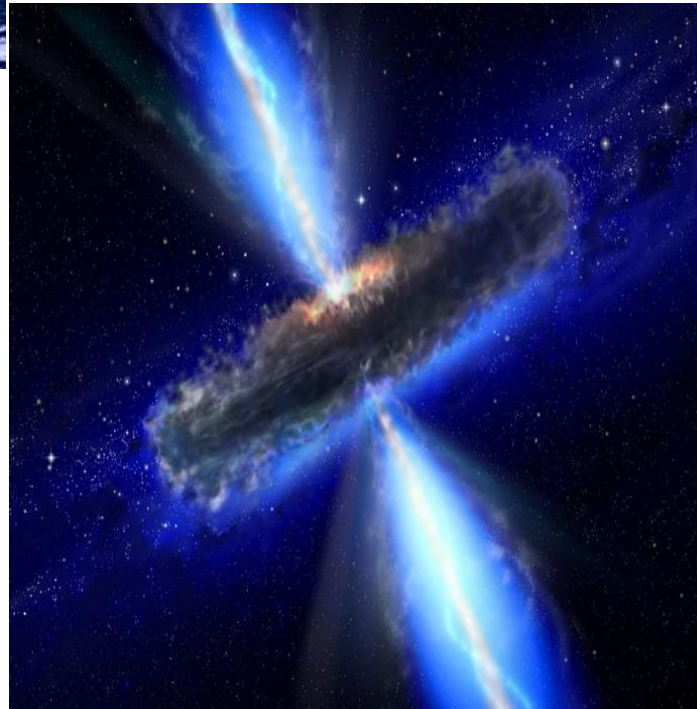
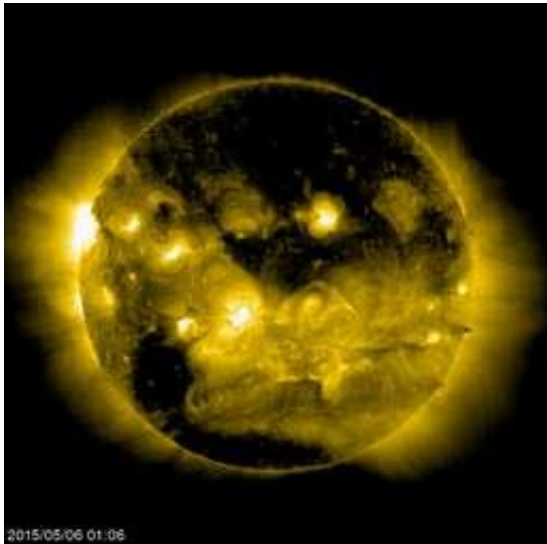


Излияние
вулканического
траппа
(напр. Йелостоун)

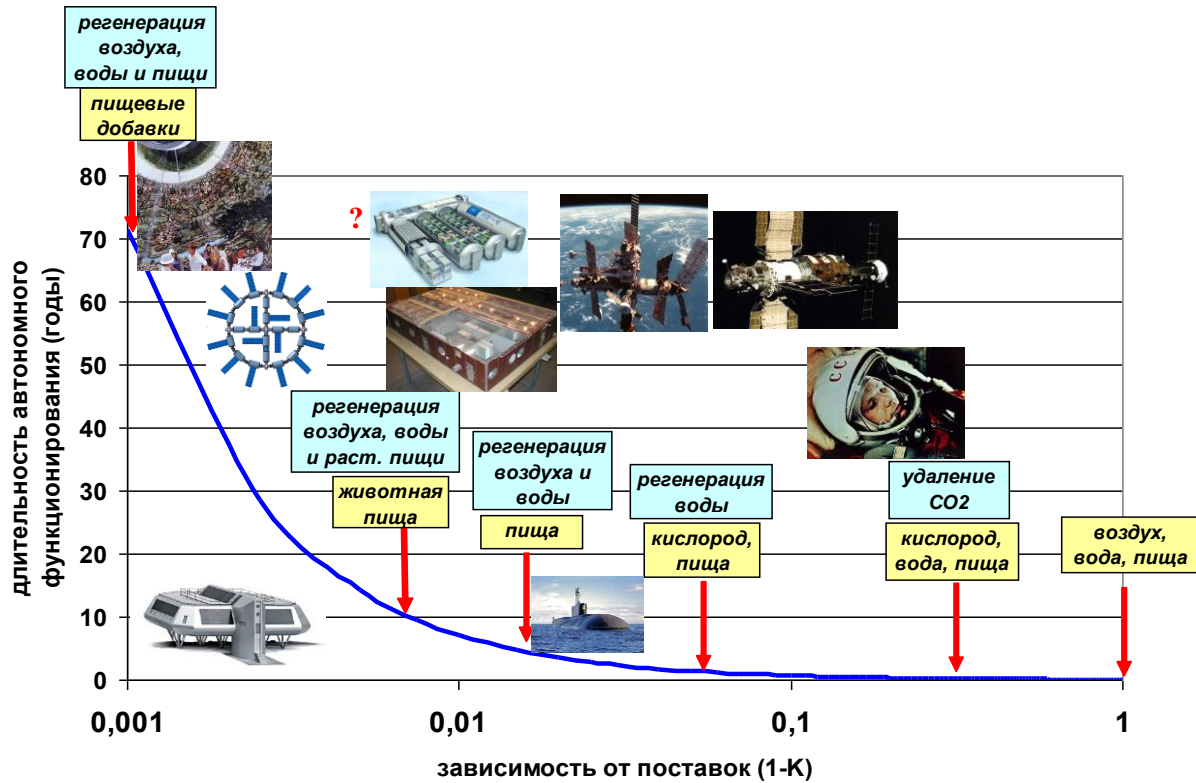
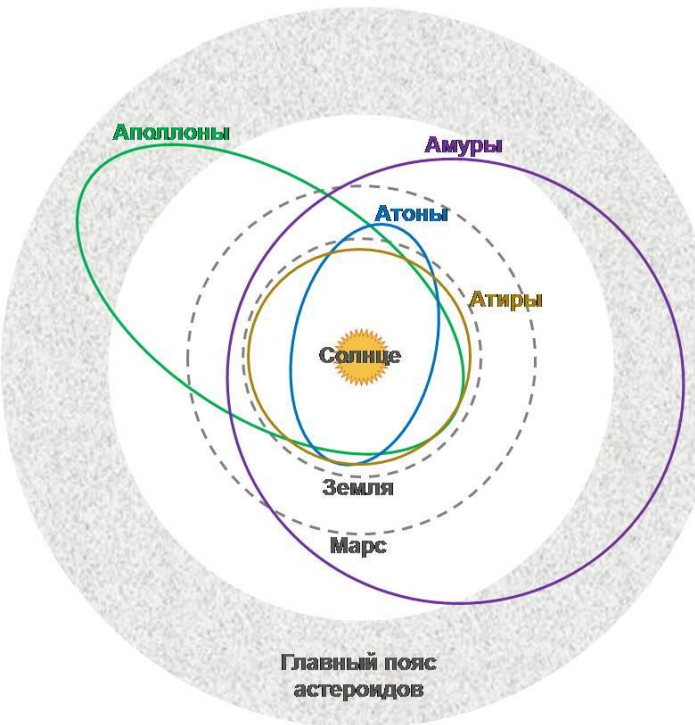


Гамма-всплеск

Супер-вспышка на Солнце



С чего начать освоение космического пространства?



Барцев С.И., Гительзон И.И., Межевикин В.В., Охонин В.А. (2000) Дальний космос: люди или автоматы? *Вестник РАН*, 70(7):611-620.

Антоненко С.В., Барцев С.И., Дегерменджи А.Г. (2015) Искусственная среда обитания для освоения солнечной системы. *Вестник РАН*, 85(10): 885–895.

ЗАЧЕМ МОДЕЛИ И РЕДУКЦИЯ ИХ СТРУКТУРЫ (К вопросу об актуальности)

Модель – это единственное средство получения прогноза поведения (реакции, отклика) данной системы в НОВЫХ, ранее не исследованных, условиях. В чем, собственно и состоит предназначение науки.

Особенно остро задача прогнозирования стоит в экологии. Просто потому, что каждая экосистема **уникальна. Можно, например, оценить пределы эластичности данной экосистемы экспериментально, но ценой существования этой экосистемы. 😊**

Биологические системы характеризуются экстремально высокой сложностью, делающей построение подробных моделей этих систем методологически бесполезным и практически неосуществимым делом.

РЕДУКЦИЯ МОДЕЛЕЙ И БИОФИЗИКА

Редукция моделей заключается в выделении ключевых переменных и механизмов, задающих существенные закономерности и свойства исследуемой системы.

Физик занимается детальным математическим исследованием таких **нереальных вещей**, как «материальные точки», «абсолютно твердые тела», «идеальные жидкости» и т.п.

В природе подобных вещей не существует!

Однако же физик не только изучает их, но и применяет свои выводы к **реальным вещам**. Такое применение, в известных пределах, ведет к практическим результатам. Все дело в том, что в этих пределах реальные вещи имеют свойства, общие с **воображаемыми идеальными объектами!**

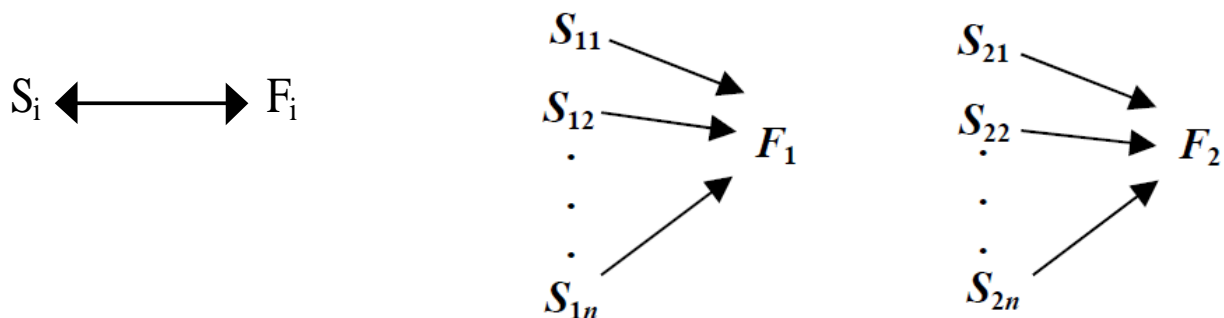
Н.Рашевский

*Биофизика – это наука, которая занимается построением и исследованием **идеализированных систем**, моделирующих свойства живого на разных уровнях его организации.*

ЧТО НУЖНО ЗНАТЬ ДЛЯ РЕДУКЦИИ СЛОЖНОСТИ МОДЕЛИ

Практически любое исследование живых объектов представляет собой сначала выявление функциональных закономерностей типа: «стимул–реакция» или «воздействие–отклик», а затем определение «механизмов», обеспечивающих реализацию данной функции.

Механизм функционирования системы считается раскрытым, если показана явная связь между **структурой** системы и ее **функцией** или **свойством**.

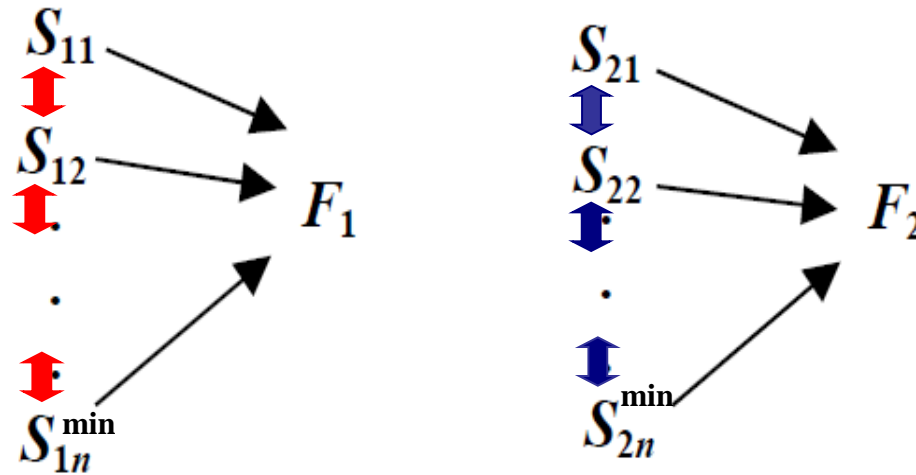


Отображения структуры в функцию вида «один-в-один» и «много–в–один»

Чтобы построить сущностную (механизменную) модель, необходимо найти соответствие между структурой и функцией.

Получается, что каждый исследователь решает проблему структурно-функционального соответствия в частном порядке и получает при этом частное решение.

А МОЖНО ЛИ ПОСТРОИТЬ ФОРМАЛЬНУЮ ПРОЦЕДУРУ НАХОДЯЩУЮ ОБЩЕЕ МЕЖДУ РАЗНЫМИ СТРУКТУРАМИ?



Теоремы Гёделя и теорема Райса фактически отрицают возможность создания универсальной процедуры редукции сложности.

Но всегда открыта возможность разработки частных процедур и подходов к редукции сложности биологических систем.

Содержательная формулировка вопроса к проблеме **структурно-функционального соответствия**: есть ли что-то общее (инвариант) в структурах, выполняющих одну и ту же функцию, и что отличает их от структур, которые реализуют другую функцию?

Для решения проблемы структурно-функционального соответствия требуется высокий уровень обобщения, которого трудно достичь при изучении реальных биологических систем, поскольку исследованию общих свойств биологических систем препятствуют два фактора.

Во-первых, это чрезвычайная сложность реальных биологических объектов, которая приводит к невозможности учесть то огромное количество взаимодействий, которое определяет функцию этого объекта.

Во-вторых, это малочисленность (единственность) эволюционных исходов, которая не позволяет проводить сравнительный анализ биологических структур.

ОБ ЭВРИСТИЧЕСКОМ МЕТОДЕ И МОДЕЛЯХ

Необходимость перехода к искусственным модельным объектам обосновал фон Нейман: «Поскольку у нас нет достаточно ясного представления о том, как функционируют живые организмы, то обращение к органике большой пользы нам не принесет. Мы займемся поэтому автоматами, которые мы в совершенстве знаем, ибо мы их сделали.»

Основанный на построении абстрактных моделей подход был назван Дж. фон Нейманом *эвристическим методом*, сущность которого заключалась в том, что поиск решения на компьютере ведется для того, чтобы выявить удобные понятия, широко приложимые принципы и построить общую теорию.

Абстрактный модельный объект «прозрачен», про его структуру известно все, и это позволяет сконцентрировать усилия непосредственно на выявлении общих закономерностей, а не на поиске кажущихся важными, дополнительных деталей структуры.

ВЫБОР ЭВРИСТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ БИОЛОГИЧЕСКОЙ СИСТЕМЫ

По мнению Дж. Бернала, «биология методологически отличается от других естественных наук тем, что в фокусе внимания находятся, прежде всего, *функционирование* и эволюция систем. Структура здесь имеет значение только в связи с функцией и происхождением. ... Происхождение, структура и функция теперь уже не могут быть разделены».

Эвристическая модель должна иметь просто описываемую **структуру** (множество элементов с отношениями между ними), которая реализует некоторую **функцию** (отображение одной величины в другую), возникшую в ходе **эволюционного процесса** (поиск условного экстремума функции приспособленности)

$$W = H(\alpha_j) + \sum_i \mu_i \Phi_i(\alpha_j, A_k, \beta_m)$$

ПОЧЕМУ НЕЙРОННЫЕ СЕТИ?

Для нейронных сетей легко определить **функцию**,

выделить **структуру** и

запустить процесс обучения, формальное описание которого по ключевым признакам не отличается от **эволюционного процесса** в биологии.

Небольшой парадокс

Несмотря на то, что нейронная сеть является в высшей степени **абстрактной** моделью биологической системы, она позволяет достигнуть **конкретности** в описании столь трудно формализуемых свойств, как «структура», «функция» и «сложность», что очень трудно сделать в отношении живых систем.

СХЕМА ПОЛНОСВЯЗНОЙ НЕЙРОСЕТИ И ПРЕДСТАВЛЕНИЕ ЕЕ СТРУКТУРЫ

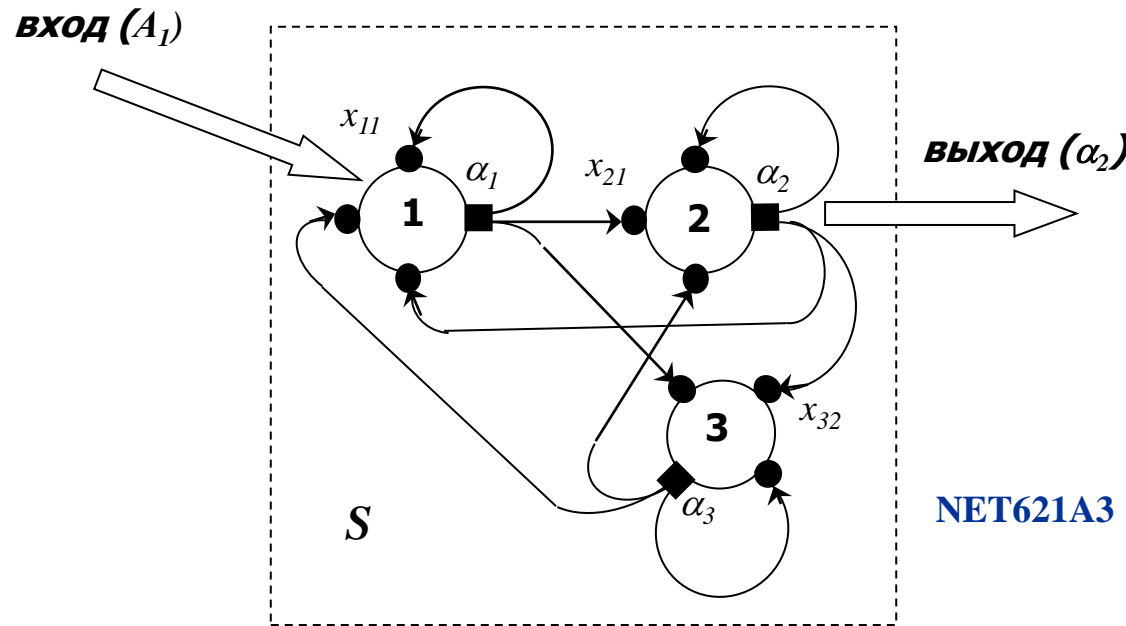
Описание формального нейрона:

$$\alpha_i^{n+1} = \frac{\rho_i^n}{a + |\rho_i^n|} \quad \rho_i^n = \sum_j x_{ij} \alpha_j^n + A_i^n$$

Одна из «родительских» матриц

INIT62 =

-0,005	-0,011	0,008	-0,013	-0,003	0,017
-0,016	0,006	0,008	-0,002	-0,022	-0,015
-0,020	-0,012	-0,015	-0,014	-0,007	-0,013
-0,004	-0,017	0,024	-0,015	0,001	-0,008
-0,008	-0,002	0,007	-0,023	-0,001	0,000
0,023	0,014	0,002	-0,011	0,001	-0,025



Процесс
обучения

NET621A3 =

-0,028	0,050	-0,038	-0,015	-0,057	-0,055
-0,006	0,033	-0,035	-0,023	0,030	-0,078
0,000	-0,003	-0,019	0,004	0,127	-0,116
0,000	-0,004	-0,009	-0,004	0,128	-0,117
0,209	-0,001	-0,031	-0,018	0,109	0,094
0,287	-0,204	0,079	0,092	0,288	-0,034

Обучение может идти по методу случайных вариаций весовых коэффициентов и отбора лучших – аналог естественного отбора.

ФУНКЦИОНИРОВАНИЕ ФОРМАЛЬНОЙ НЕЙРОСЕТЕВОЙ МОДЕЛИ

Использование нейросетей в данном исследовании опирается на аналогию процессов формирования нейросетей и процессов эволюционного развития реальных биологических систем:

- 1) эволюция организмов и формирование нейросетей происходят в соответствии с критерием оптимальности;
- 2) эволюция живых систем и формирование нейросетей происходит через малые изменения (мутации) элементов структуры;
- 3) биологические структуры подвергаются отбору, находясь в потоке событий, имеющем, как регулярную, так и стохастическую компоненту, что воспроизведено в ходе формирования нейросетей.

Абстрактные функции, которым учились нейросети

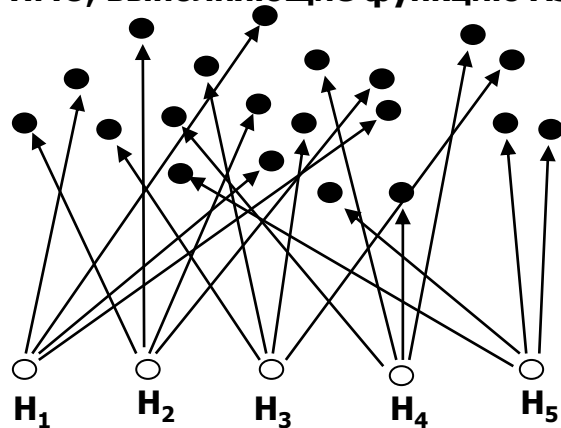
 **Направление потока событий**

Выход $\frac{\quad + \quad}{\quad}$
Вход $\frac{\quad \text{AAA} \quad \text{BBB} \quad \text{BBB} \quad \text{CCC} \quad \text{AAA} \quad \text{AAA} \quad \text{BBB} \quad \text{AAA} \quad \text{CCC} \quad \text{BBB} \quad \quad}{\quad}$

Выход $\frac{\quad + \quad}{\quad}$
Вход $\frac{\quad \text{CCCC} \quad \text{BBBB} \quad \text{AAAA} \quad \text{CCCC} \quad \text{AAAA} \quad \text{BBBB} \quad \text{CCCC} \quad \text{CCCC} \quad \quad}{\quad}$

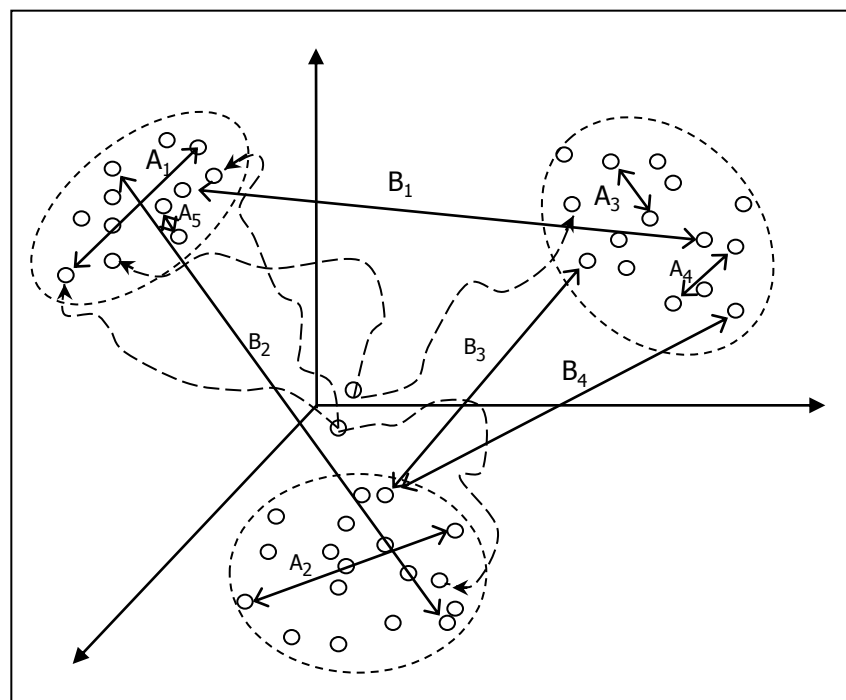
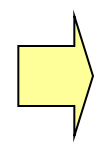
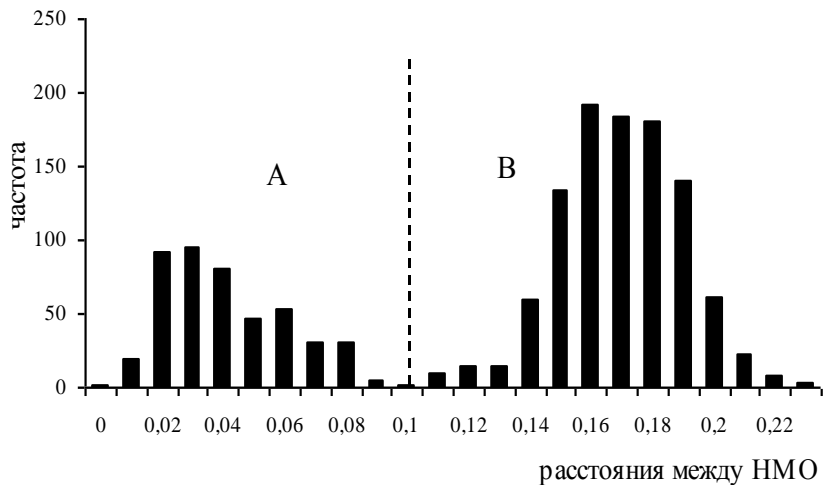
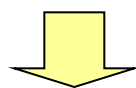
Результаты вычислительных экспериментов с Нейросетевыми Модельными Объектами

НМО, выполняющие функцию АЗ



NET621A3 =

-0,028	0,050	-0,038	-0,015	-0,057	-0,055
-0,006	0,033	-0,035	-0,023	0,030	-0,078
0,000	-0,003	-0,019	0,004	0,127	-0,116
0,000	-0,004	-0,009	-0,004	0,128	-0,117
0,209	-0,001	-0,031	-0,018	0,109	0,094
0,287	-0,204	0,079	0,092	0,288	-0,034



Функциональные инварианты структуры НМО

Преобразование

Инвариант

Локальное: $x_{ij}^* = x_{ij} + s_{ij}\lambda$

$$J_m = s_{kl}x_{ij} + s_{ij}x_{kl}$$

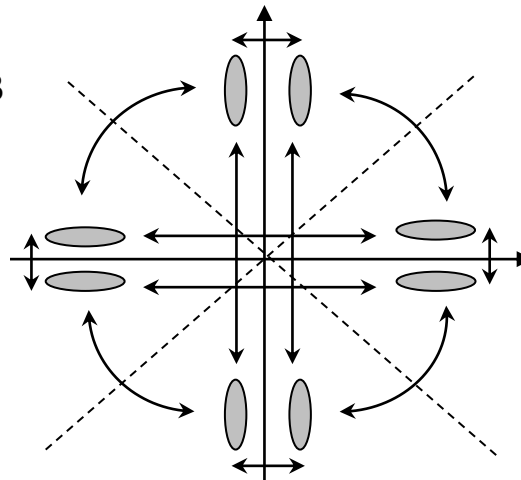
Смена знака: $x_{ij}^* = x_{ij}(-1)^{\delta_{Ri} + \delta_{Rj}}$

$$J_i = x_{ki} f\left(\sum_j x_{ij} \alpha_j\right)$$

Перестановка: $x_{it} \leftrightarrow x_{im} \quad x_{tj} \leftrightarrow x_{mj}$

$$J_{tm} = \left[x_{it} f\left(\sum_j x_{tj} \alpha_j\right), x_{im} f\left(\sum_j x_{mj} \alpha_j\right) \right]$$

Схема образования кластеров для 6-ти нейронных НМО

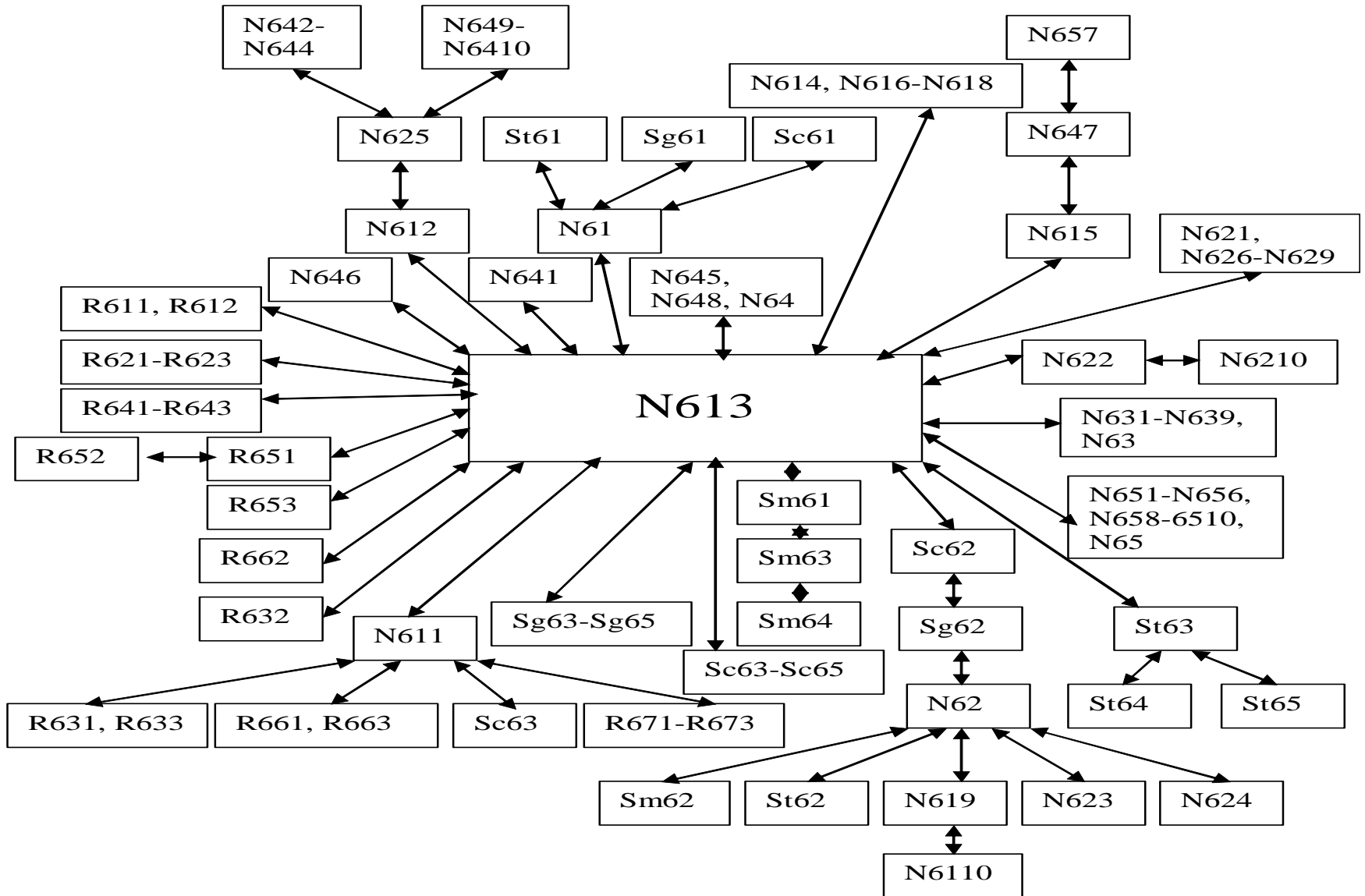


Количество кластеров для НМО с K внутренними нейронами:

$$N = 2^K K!$$

Для 10 нейронных НМО – **46080** кластеров

Схема переходов структур НМО с функцией АЗ в структуру "базового" НМО

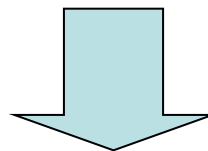


Предварительные вычислительные эксперименты по редукции сложности НМО

Потенциальная сложность структуры.

$$NET611 = \begin{pmatrix} -0,005 & 0,024 & 0,020 & -0,032 & 0,031 & 0,057 \\ 0,002 & 0,036 & -0,006 & -0,033 & -0,035 & 0,079 \\ -0,002 & -0,006 & 0,026 & -0,024 & -0,129 & 0,118 \\ -0,001 & -0,003 & 0,062 & -0,064 & -0,124 & 0,115 \\ -0,202 & -0,008 & 0,022 & -0,025 & 0,093 & 0,048 \\ -0,293 & 0,212 & -0,120 & -0,123 & 0,303 & -0,105 \end{pmatrix}$$

Процедура контрастирования



Сложность функциональной структуры.

$$NET611K = \begin{pmatrix} 0,000 & 0,206 & 0,000 & 0,000 & 0,000 & 0,000 \\ 0,000 & 0,000 & 0,000 & 0,000 & 0,000 & 0,213 \\ 0,000 & 0,000 & 0,000 & 0,000 & -0,077 & 0,061 \\ 0,000 & 0,000 & 0,000 & 0,000 & -0,077 & 0,061 \\ 0,000 & 0,000 & 0,000 & 0,000 & 0,412 & 0,035 \\ -0,710 & 0,589 & 0,000 & 0,000 & 0,775 & 0,000 \end{pmatrix}$$



Редукция сложных НМО к менее сложным

$$\text{NET612к} = \begin{pmatrix} 0,000 & 0,000 & 0,000 & 0,000 & 0,000 & 0,000 \\ 0,000 & 0,000 & 0,000 & 0,000 & 0,000 & 0,000 \\ 0,000 & 0,000 & 0,000 & 0,000 & -0,113 & 0,099 \\ 0,000 & 0,000 & 0,000 & 0,000 & -0,113 & 0,099 \\ -0,401 & 0,000 & 0,000 & 0,000 & 0,000 & 0,000 \\ -0,798 & 0,389 & -0,229 & -0,212 & 0,218 & -0,217 \end{pmatrix}$$

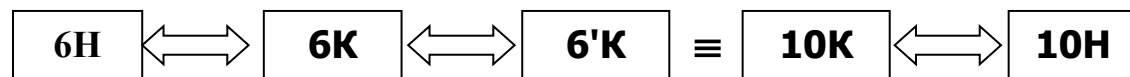
$$\text{NET611к} = \begin{pmatrix} 0,000 & 0,206 & 0,000 & 0,000 & 0,000 & 0,000 \\ 0,000 & 0,000 & 0,000 & 0,000 & 0,000 & 0,213 \\ 0,000 & 0,000 & 0,000 & 0,000 & -0,077 & 0,061 \\ 0,000 & 0,000 & 0,000 & 0,000 & -0,077 & 0,061 \\ -0,000 & 0,000 & 0,000 & 0,000 & 0,412 & 0,035 \\ -0,710 & 0,589 & -0,000 & -0,000 & 0,775 & -0,000 \end{pmatrix}$$

$$\text{NET1031A3к} = \begin{pmatrix} 0,000 & 0,246 & 0,000 & 0,000 & 0,000 & 0,000 & 0,000 & 0,000 & 0,000 & 0,000 \\ 0,000 & 0,000 & 0,000 & 0,000 & 0,000 & 0,000 & 0,000 & 0,000 & 0,000 & -0,386 \\ 0,000 & 0,000 & 0,000 & 0,000 & 0,000 & 0,062 & 0,000 & 0,000 & 0,000 & 0,077 \\ 0,000 & 0,000 & 0,000 & 0,000 & 0,000 & 0,062 & 0,000 & 0,000 & 0,000 & 0,077 \\ 0,000 & 0,000 & 0,000 & 0,000 & 0,000 & 0,000 & 0,000 & 0,000 & 0,000 & 0,000 \\ -0,623 & 0,563 & 0,000 & 0,000 & 0,000 & 0,000 & 0,000 & 0,000 & 0,000 & -0,742 \\ 0,000 & 0,000 & 0,000 & 0,000 & 0,000 & 0,000 & 0,000 & 0,000 & 0,000 & 0,000 \\ 0,000 & 0,000 & 0,000 & 0,000 & 0,000 & 0,000 & 0,000 & 0,000 & 0,000 & 0,000 \\ 0,000 & 0,000 & 0,000 & 0,000 & 0,000 & 0,000 & 0,000 & 0,000 & 0,000 & 0,000 \\ 0,000 & 0,000 & 0,000 & 0,000 & 0,000 & -0,042 & 0,000 & 0,000 & 0,000 & 0,450 \end{pmatrix}$$

Условная схема контрастирования и инвариантных преобразований структуры НМО

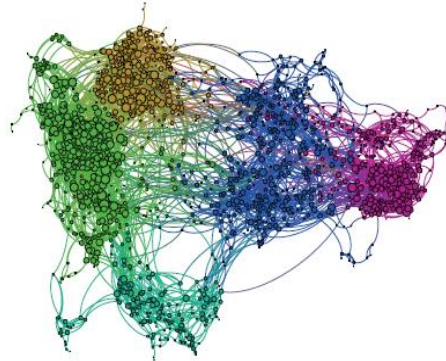
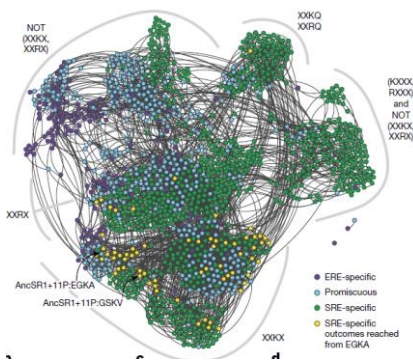


Обратимые переходы от нативных 6 нейронных структур к нативным 10 нейронным через редукцию структуры.



Полученные на НМО результаты не могут быть механически распространены на реальные системы. Однако эти результаты имеют эвристическое значение и позволяют сформулировать ряд или гипотез об общих свойствах биологических систем.

1. Для **эволюционирующей** системы оценка сложности по числу возможных взаимосвязей между элементами (потенциальная сложность) всегда больше функциональной сложности системы.
2. **Способность** биологических систем к **эволюционным изменениям** неразрывно связана с **неоднозначностью** структурно-функциональных отношений, **избыточностью** сложности структуры над сложностью функции и, как следствие, с **принципиальной множественностью** эволюционных исходов.



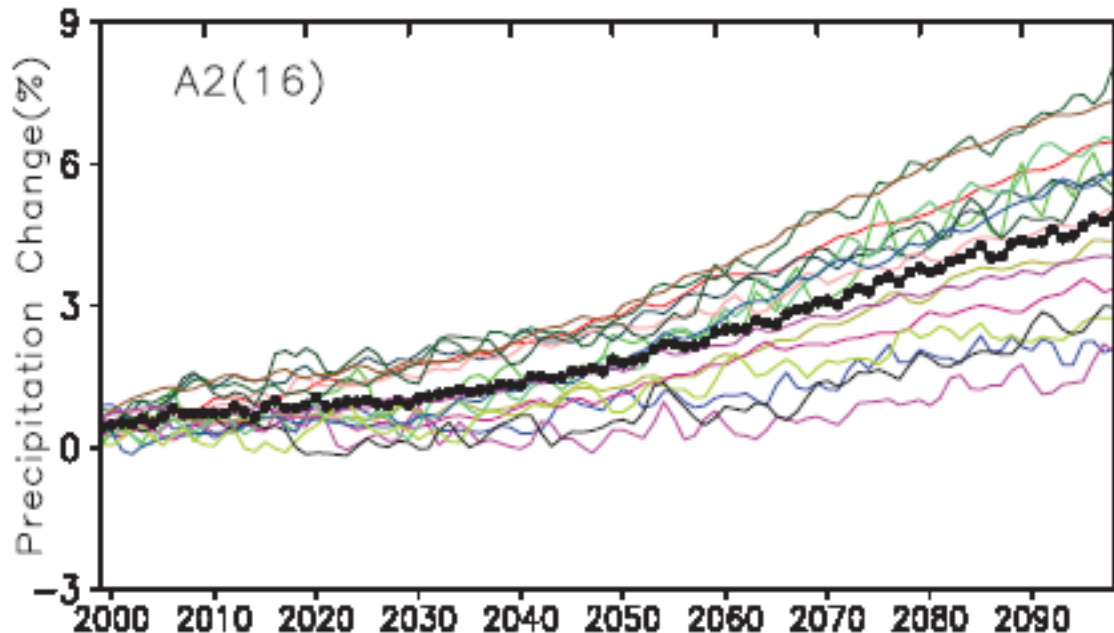
Starr T.N., Picton L.K., Thornton J.W. (2017) Alternative evolutionary histories in the sequence space of an ancient protein. *Nature*. 549,409–413.

Podgornaia A.I., Laub M.T. (2015) Pervasive degeneracy and epistasis in a protein-protein interface. *Science*. 347: 673–677.

3. Эволюционный процесс может происходить при неизменной потенциальной сложности, за счет изменения структурной избыточности биологической системы.

Редукция сложности модели через переформулировку ее целевого назначения

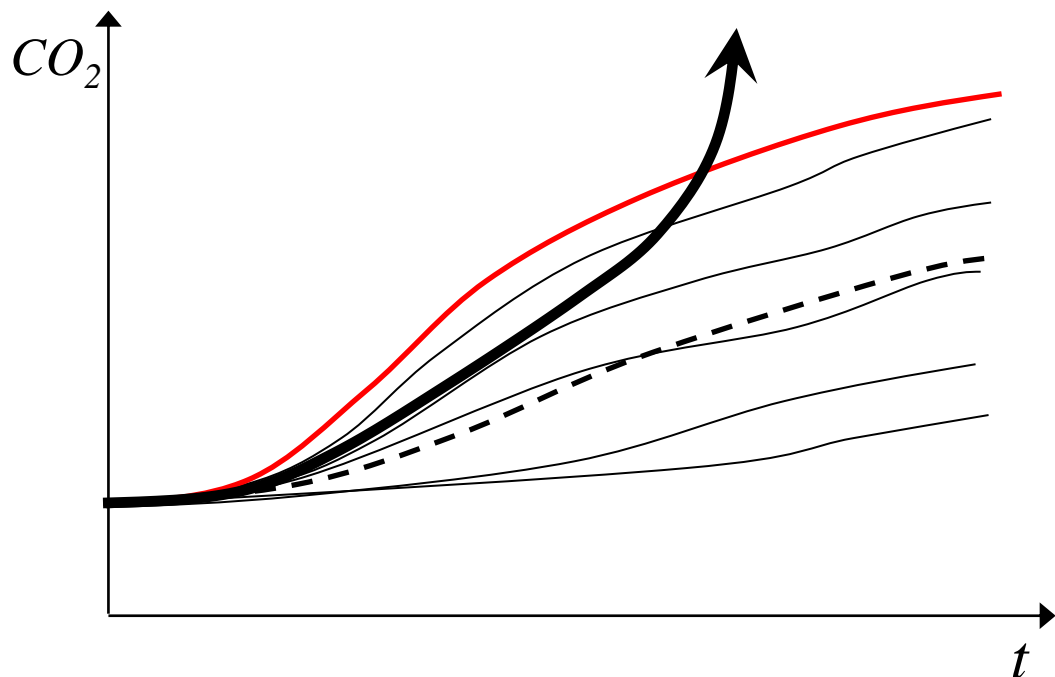
Для прогноза ожидаемой динамики системы «биосфера-климат» (СБК) специалисты стараются рассчитывать наиболее вероятные сценарии. При большом количестве параметров распределенной модели и отсутствии надежных данных о виде распределения этих сценариев затруднена оценка вероятности и типов экстремальных вариантов динамики.



Один из представленных в IPCC расчетов наиболее вероятного сценария при одном из вариантов развития антропогенного воздействия.

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

Какой же из сценариев динамики CO_2 является наихудшим?



--- гипотетический “наивероятный” сценарий

— гипотетический “наихудший” сценарий ?

Подобного рода самоускоряющиеся процессы возникают в системах с положительными обратными связями.

Согласно «принципу наихудшего сценария» мы должны в первую очередь рассматривать вариант с самыми тяжелыми последствиями, то есть выбирать значения параметров из неблагоприятных концов доверительных интервалов, а недоказанные компенсирующие механизмы игнорировать.

«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»

(15 принцип Декларации ООН по окружающей среде и развитию. Рио-де-Жанейро, 1992).

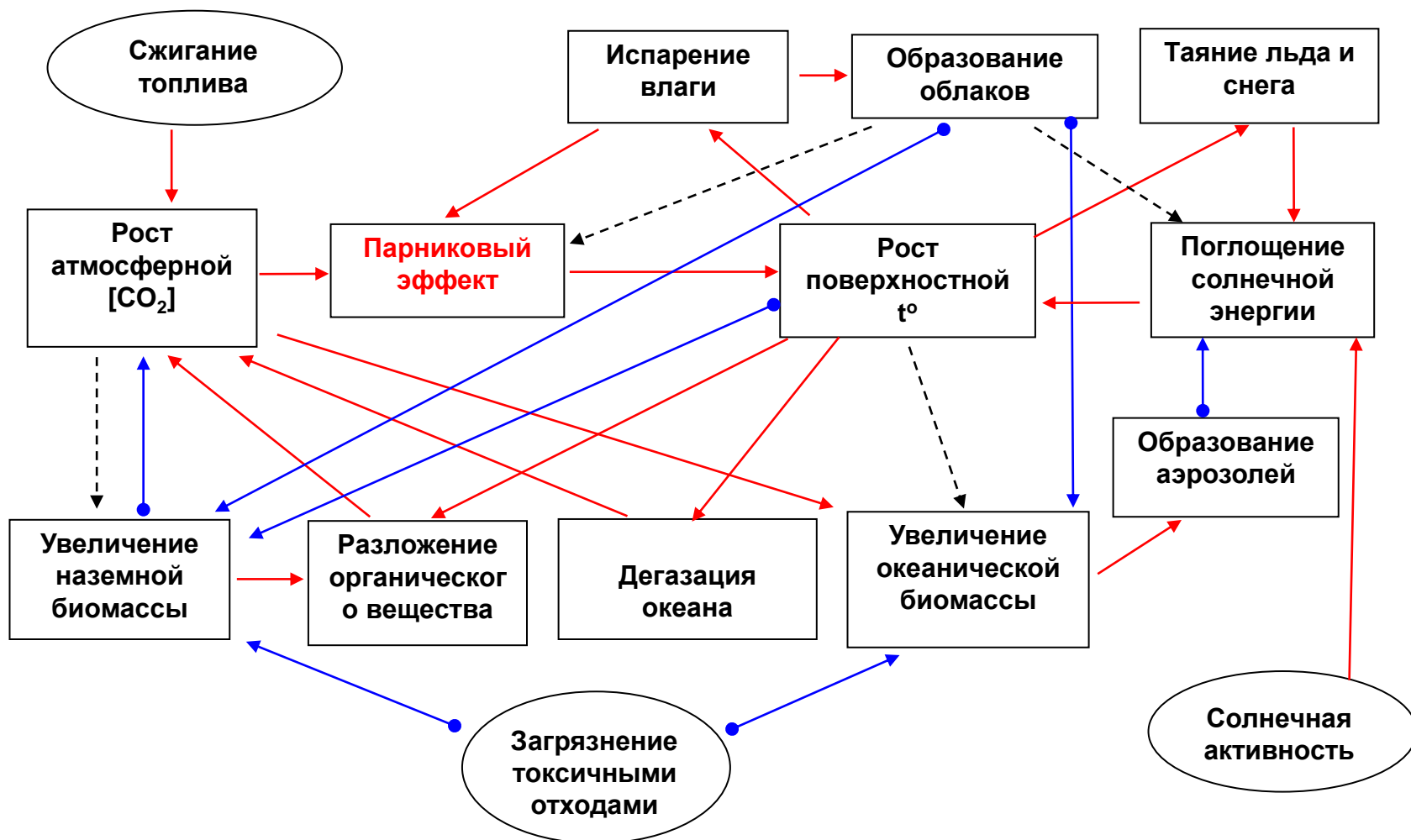


Схема наиболее очевидных взаимодействий между процессами в биосфере.

← - положительный эффект;

← - отрицательный эффект;

← - - - - - неопределённый эффект.

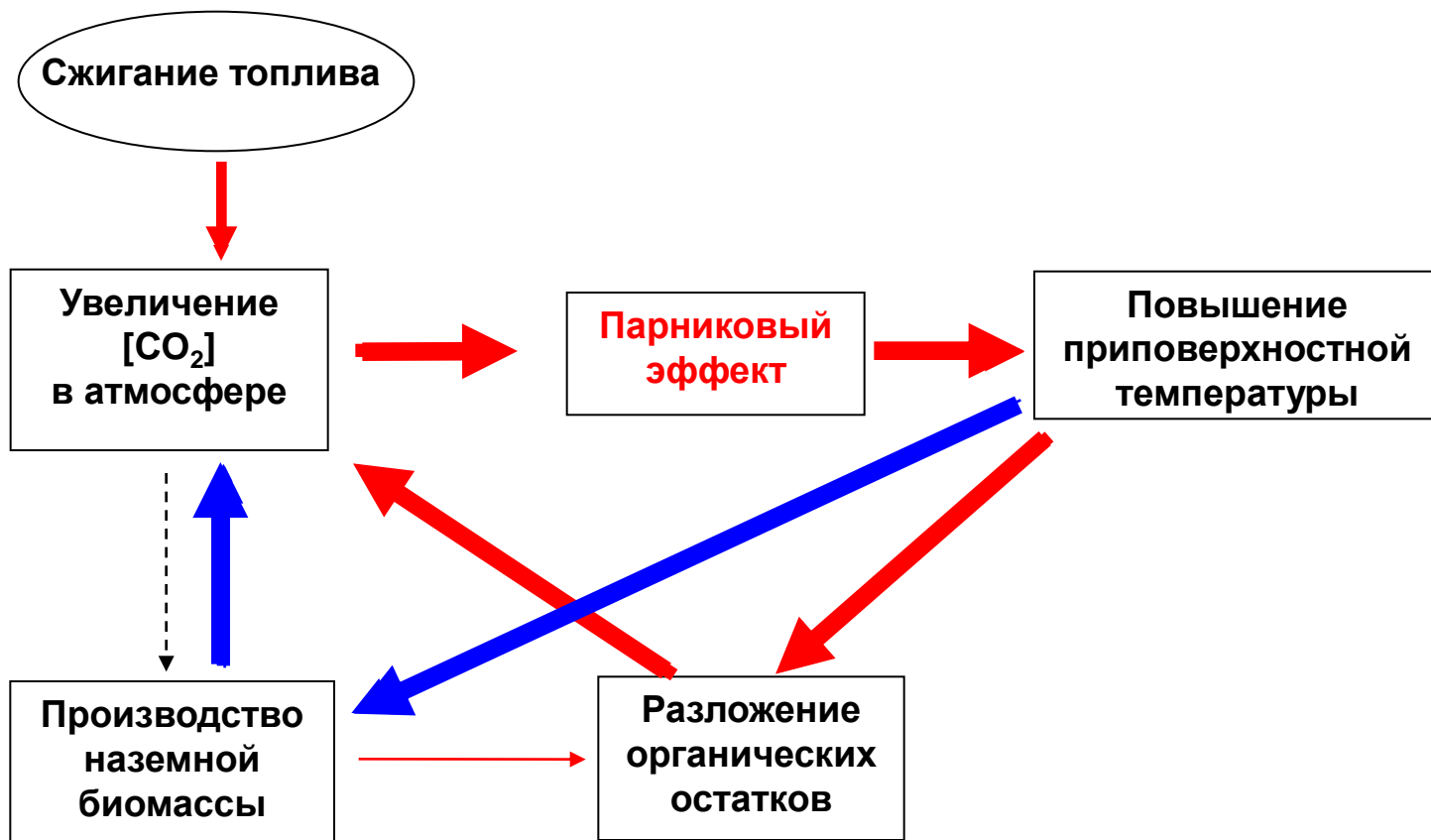
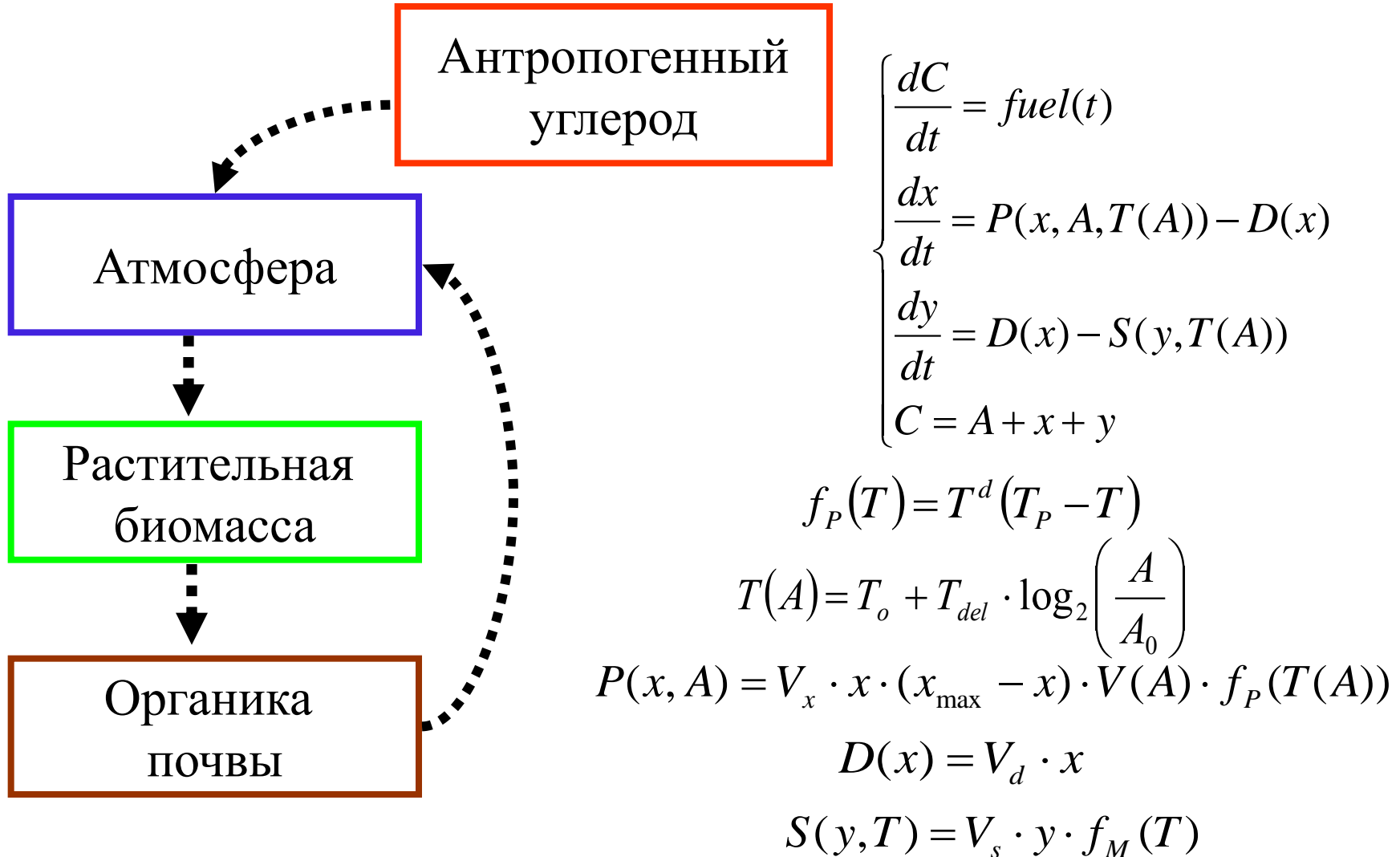


Схема взаимодействий между процессами, рассмотренными в модели

← - положительный эффект; ← - отрицательный эффект;

← - - - неопределенный эффект.

«БАЗОВАЯ» МИНИМАЛЬНАЯ МОДЕЛЬ ГЛОБАЛЬНОЙ ДИНАМИКИ УГЛЕКИСЛОГО ГАЗА



Начальная таблица для симплекс-метода, **скомпонованная программой** для системы, включающей пшеницу, чufу и каталитическую печь

	P↑	C↑	Δm^O_{out}	P ^R	I _W	m ₁	m ₂	Δm^1_1	Δm^1_2	$\sim m^D_1$	$\sim m^D_2$	
P↓	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	P _{max} -P _{min}
C↓	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	C _{max} -C _{min}
F↑	0.445	0.431	0	0	0	0	0	0	0	0	0	(Q-Q _{min})/9430
F↓	-	-	0	0	0	0	0	0	0	0	0	F _{max} -F _{min} - (Q-Q _{min})/9430
P _{SUP}	-1	0	0	0	0	$P^E_1 \rho^E_1 V^1_B$	$P^E_2 \rho^E_2 V^2_B$	0	0	-P ^E ₁	-P ^E ₂	P _{MIN} -minAnP
F _{SUP}	0.445	0.431	0	0	0	$F^E_1 \rho^E_1 V^1_B$	$F^E_2 \rho^E_2 V^2_B$	0	0	-F ^E ₁	-F ^E ₂	F _{MIN} +(Q-Q _{min})/9430-minAnF
I _C	0	-1	0	0	0	$C^E_1 \rho^E_1 V^1_B$	$C^E_2 \rho^E_2 V^2_B$	0	0	-C ^E ₁	-C ^E ₂	C _{MIN}
Δm^O_{in}	-A ^O _P	-A ^O _C	-1	0	0	V ¹ _O	V ² _O	-K ^O (OxPr) ¹	-K ^O (OxPr) ²	0	0	a ^O _F (Q-Q _{MIN})/9430+MinOxPr
Δm^C_{out}	-A ^C _P	-A ^C _C	0	0	0	V ¹ _C	V ² _C	-K ^C (CdOxPr) ¹	-K ^C (CdOxPr) ²	0	0	a ^C _F (Q-Q _{MIN})/9430+MinCdOx
P ^D	-1	0	0	-1	0	V ¹ _U /C	V ² _U /C	V ^M _U K ¹ _M /C	V ^M _U K ² _M /C	0	0	P _{MIN}
$\sim P$	0	0	0	1	0	-V ¹ _U /C	-V ² _U /C	-V ^M _U K ¹ _M /C	-V ^M _U K ² _M /C	0	0	0
I _S	0	0	0	-C	0	-V ¹ _S +V ¹ _U	-V ² _S +V ² _U	K ^S ₁ B ¹ +V ^M _U K ¹ _M	K ^S ₁ B ² +V ^M _U K ² _M	0	0	0
Δm^W_{out}	-A ^W _P	-A ^W _C	0	0	-1	V ¹ _W	V ² _W	-K ^W ₁ (H ₂ OxPr) ¹	-K ^W ₁ (H ₂ OxPr) ²	0	0	minH ₂ OxPr+a ^W _F (Q-Q _{MIN})/9430
Δm^D_1	0	0	0	0	0	-(1-ρ ^E ₁)V ¹ _B	0	1	0	0	0	0
Δm^D_2	0	0	0	0	0	0	-(1-ρ ^E ₂)V ² _B	0	1	0	0	0
m ₁ ↓	0	0	0	0	0	ρ ^E ₁ V ¹ _B	0	0	0	-1	0	U ¹ _{MAX}
m ₂ ↓	0	0	0	0	0	0	ρ ^E ₂ V ² _B	0	0	0	-1	U ² _{MAX}
$\sim m^U_1$	0	0	0	0	0	-ρ ^E ₁ V ¹ _B	0	0	0	1	0	0
$\sim m^U_2$	0	0	0	0	0	0	-ρ ^E ₂ V ² _B	0	0	0	1	0
P	A ^C _P D _C	A ^C _C D _C	D _O	0	0	1/(1-W ₁)-V ¹ _C D _C	1/(1-W ₂)-V ² _C D _C	D _C K ^K _C (CdOxPr) ¹	D _C K ^K _C (CdOxPr) ²	0	0	D _C a ^C _F (Q-Q _{MIN})/9430+MinCdOx
Q	C ^O _P	C ^O _C	1	C	1	-V ¹ _O - (P ^E ₁ +F ^E ₁ +C ^E ₁) ρ ^E ₁ V ¹ _B +V ¹ _S - V ¹ _U	-V ² _O - (P ^E ₂ +F ^E ₂ +C ^E ₂) ρ ^E ₂ V ² _B +V ² _S - V ² _U	K ^O (OxPr) ¹ - B ₁ K ^S -V ^M _U K ¹ _M	K ^O (OxPr) ² - B ₂ K ^S -V ^M _U K ² _M	P ^E ₁ +F ^E ₁ +C ^E ₁	P ^E ₂ +F ^E ₂ +C ^E ₂	P _{MIN} +C _{MIN} +F _{MIN} +(Q-Q _{MIN})(1+a ^O _F)/9430+minOxPr

Зависимость длительности автономного функционирования от уровня замыкания массопотока веществ

