ПРОБЛЕМА СОВМЕСТНОГО ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ПРИ МОДЕЛИРОВАНИИ ЭКОСИСТЕМ ПОПУЛЯЦИОННОГО И МАСС ЭНЕРГЕТИЧЕСКОГО ПОДХОДОВ

Белотелов Н.В., Коноваленко И.А.

ЭкоМатМод – 2017 ,Пущино

Содержание доклада

- Цели моделирования
- Два способа описания экологических объектов
- Принцип дополнительности
- Моделирование углеродного цикла
- Размерный спектр
- Модель с нелинейной диффузией
- Агентная модель «ресурс –потребитель»

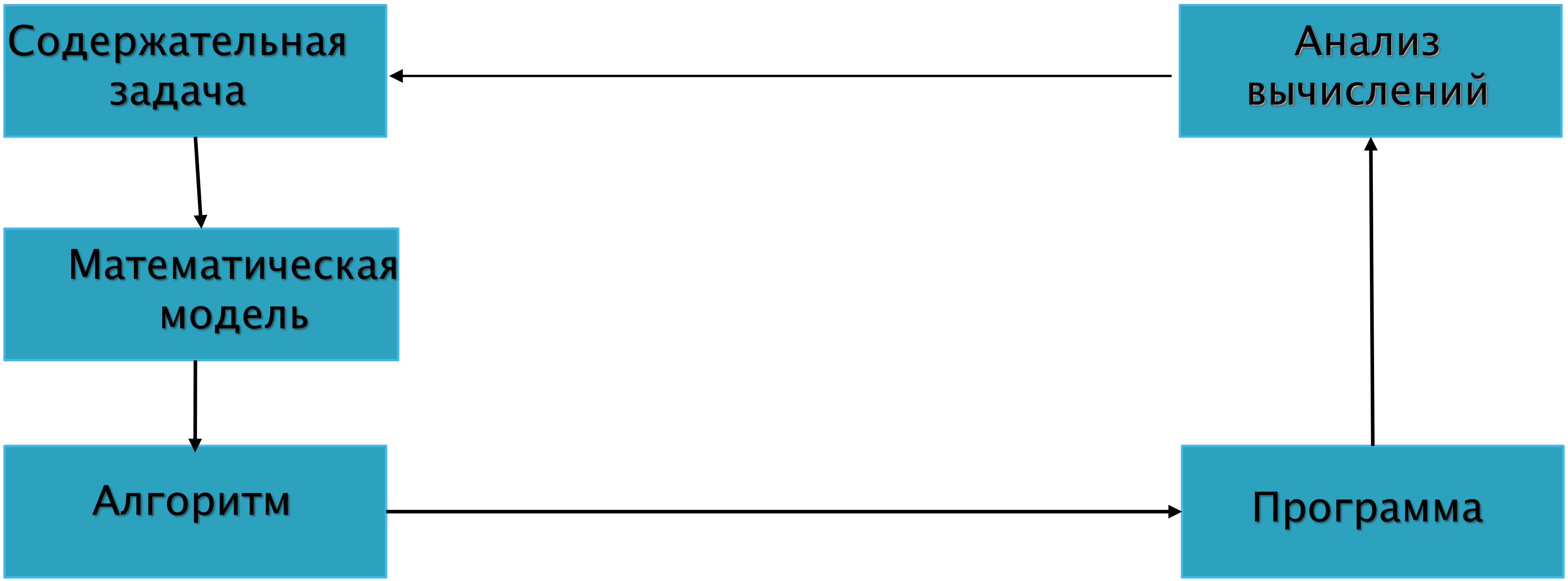
- *«Мы слишком много знаем, но слишком мало понимаем» (А.Эйнштейн).*
- *«Задачей науки является увеличение и упорядочивание нашего опыта» (Н.Бор).*

- ***Модель*** – формальное представление, понимаемых взаимосвязей между измеримыми понятиями.

Цели моделирования

- Объяснение наблюдаемых эффектов (колебания, популяционные волны и т.п.)
- Прогноз
- Формализация, имеющихся представлений (инструмент междисциплинарных исследований)

Этапы моделирования



«Основная черта классического способа описания явлений состоит в допущении полной независимости физических процессов от условий наблюдения. В классической физике предполагается, что всегда можно «подсмотреть» явление, не вмешиваясь в него и не влияя на него.

В квантовой механике сама возможность наблюдения предполагает наличие определенных физических условий, которые могут оказаться связанными с сущностью явления» (В.А.Фок)

- Под системой понятий, мы имеем в виду просто – напросто однозначное логическое отображение соотношений между опытными данными.

- Математика, так решительно содействовавшая развитию логического мышления, играет особую роль; своими четко определенными абстракциями она оказывает неоценимую помощь при выражении стройных логических зависимостей. …мы будем считать ее ***усовершенствованием общего языка***, оснащающим его удобными средствами для отображения таких зависимостей, для которых обычное словесное выражение оказалось бы неточным или слишком сложным.

- *Необходимая для объективного описания однозначность определений достигается при употреблении математических символов, именно потому, что таким способом избегают ссылки на сознательный субъект, которыми пронизан повседневный язык.*

- .(Единство знаний 1955)

- В общефилософском аспекте знаменательно то, что в отношении анализа и синтеза в других областях знания мы встречаемся с ситуацями, напоминающими ситуацию в квантовой физике. **Так, цельность живых организмов и характеристики людей, обладающих сознанием, а также и человеческих культур представляют черты целостности, отображение которых требует типично дополнительного способа описания.** Передача опытных фактов в этих обширных областях знания требует богатого словаря, а из-за того, что словам иногда придается разный смысл и прежде всего из-за различия в принятых в философской литературе толкования понятия причинности, цель такого сопоставления часто понимается превратно.Но постепенно развитие терминологии, пригодной для описания более простой ситуации в области физики, показывает, что мы имеем здесь дело не с более или менее туманными аналогиями. А с отчетливыми примерами логических связей, которые в разных контекстах встречаются в более широких областях знания.
- (Квантовая физика и философия 1955)

- *Понятие дополнительности* ни в коем случае не предполагает отказа от нашего положения независимого наблюдателя природы; это понятие необходимо рассматривать как логическое выражение нашей ситуации по отношению к объективному описанию в этой области опытного знания.
- *. (Единство знаний 1955 Бор Н.)*

- Геккель (1869) «Экология – наука, изучающая взаимодействие организмов с окружающей средой»

- Н.В.Тимофеев-Ресовский : «Происходит огромный, вечный, постоянно работающий биологический круговорот в биосфере, целый ряд веществ. Целый ряд форм энергии постоянно циркулируют в этом большом круговороте биосферы»

1. ***Массовоэнергетическое описание экосистем*** – круговорот биогенных элементов.

- Кребс (1972) «Экология – научное познание взаимодействий, определяющих распространение и численность организмов»

<u>***2. Популяционное описание***</u> – численности видов

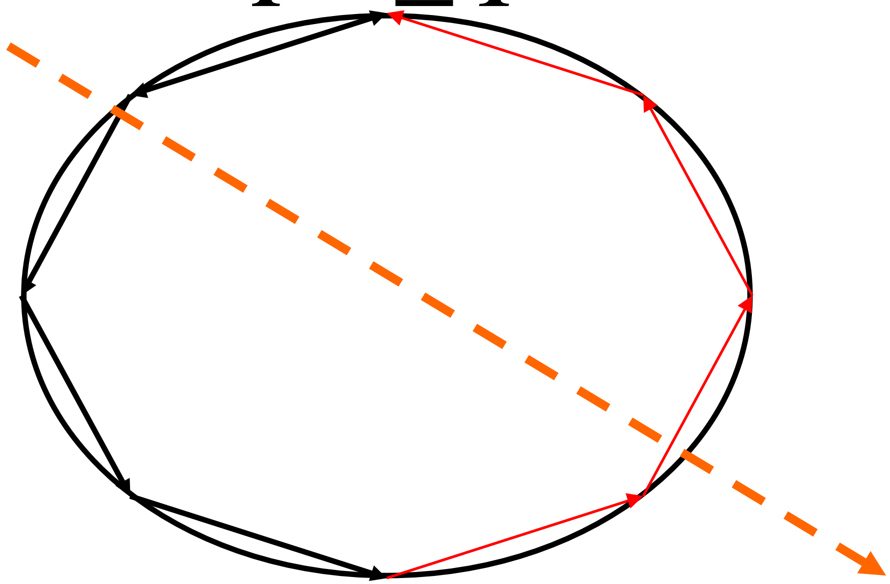
$$\frac{\partial \overrightarrow{N}}{\partial t} = \overrightarrow{M}(\overrightarrow{N}, \overrightarrow{\alpha}, t) - \overrightarrow{D}(\overrightarrow{N}, \overrightarrow{\beta}, t) + \overrightarrow{F}(\frac{\partial^2 \overrightarrow{N}}{\partial r^2}, \frac{\partial N}{\partial r}, t, \gamma)$$

Основные типы популяционных моделей

- Модели с возрастной структурой
- Модели сообществ
- Модели с запаздыванием
- Модели с дискретным временем

Массовоэнергетическое описание экосистем

Продукция $P^{+} \cong P^{-}$ *Деструкция*



КРУГОВОРОТ БИОГЕННЫХ ЭЛЕМЕНТОВ

Солнечная энергия

Таблица. Потоки энергии у земной поверхности Горшков В.).

Виды мощности	Мощность	
	Твт (10^{12} Вт)	Доля, %
Мощность, солнечной радиации и ее распределение:	$1,7*10^5$	100
Поглощение атмосферой и земной поверхностью	10^5	69
Поглощение земной поверхностью	$8*10^4$	46
Расход на испарение	$4*10^4$	24
Поглощение сушей	$2*10^4$	24
Мощность испарения сушей (эватранспираций)	$5*10^3$	3
Мощность испарения растениями (транспирация)	$3*10^3$	2
Ветровая мощность	$2*10^3$	1
Мощность океанских волн	10^3	0,6
Мощность фотосинтеза	10^2	0,06
Вулканов и гейзеров	0,3	$2*10^{-4}$
Современное мировое потребление человечества	10	$6*10^{-3}$

Модель круговорота углерода и кислорода

(Костицын В.А.1935)

$$x' = -\alpha_{13}u - \alpha_{14}v + \alpha_{41}v$$

$$y' = \alpha_{32}u - \alpha_{24}v + \alpha_{42}v$$

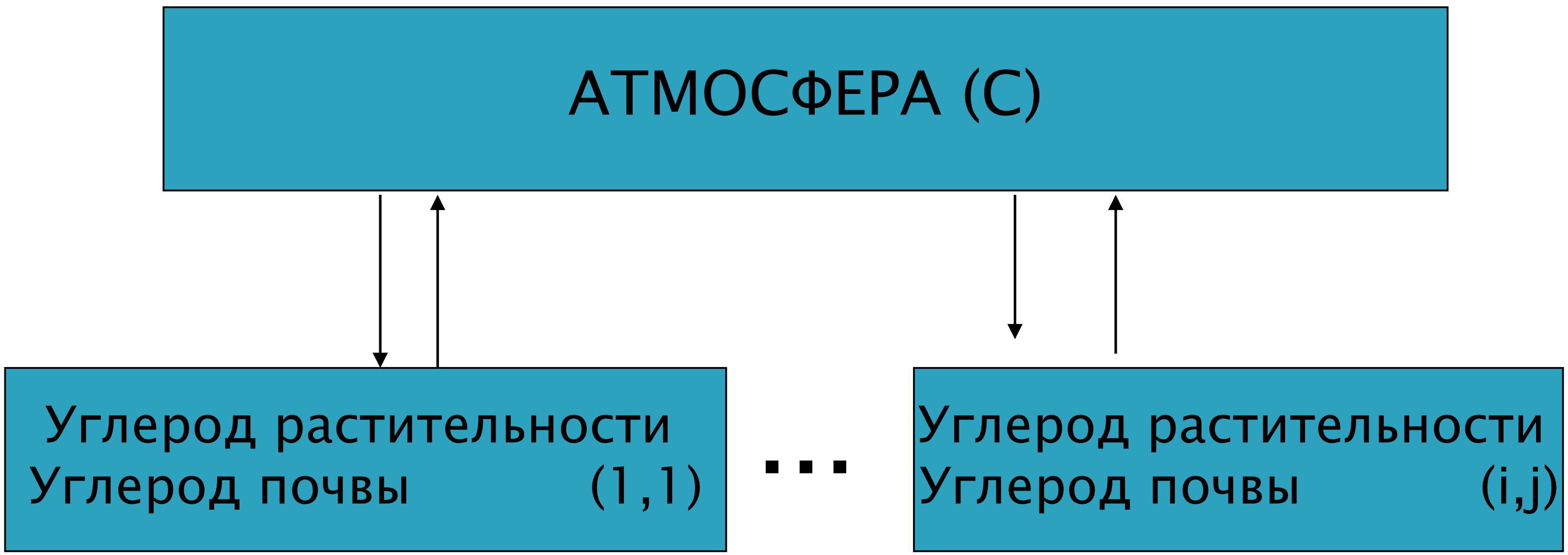
$$u' = \alpha_{13}u - \alpha_{32}u - \alpha_{35}u + \beta uv$$

$$v' = \alpha_{14}v - \alpha_{41}v + \alpha_{24}v - \alpha_{42}v - \alpha_{45}v - \beta uv$$

$$s' = \alpha_{35}u + \alpha_{45}v$$

- x – масса атмосферного кислорода
- y – масса углекислоты в атмосфере и в океане
- v – масса кислорода и углерода в растениях
- u – масса кислорода и углерода в животных
- s – масса кислорода и углерода в остатках, рассеянных в земной коре

Модель круговорота углерода на суше



$$\frac{dC}{dt} = \sum_{i,j} (resp_{ij}(B_{ij}, T_{ij}, W_{ij}) + resp_{ij}(S_{ij}, T_{ij}, W_{ij})) -$$

$$-phot_{ij}(B_{ij}, T_{ij}, W_{ij});$$

$$\frac{dB_{ij}}{dt} = phot_{ij}(B_{ij}, T_{ij}, W_{ij}) - resp_{ij}(B_{ij}, T_{ij}, W_{ij}) - fall_{ij}(B_{ij}, T_{ij}, W_{ij});$$

$$\frac{dS_{ij}}{dt} = fall_{ij}(B_{ij}, T_{ij}, W_{ij}) - resp_{ij}(S_{ij}, T_{ij}, W_{ij});$$

MODELLING OF TIME-DEPENDENT BIOME SHIFTS UNDER GLOBAL CLIMATE CHANGES

Belotelov N.V., Bogatyrev B.G., Kirilenko A.P., Venevsky S.V.

Ecological Modelling. 1996. Т. 87. № 1-3. С. 29-40.

- В работах (Belotelov et al, 1993,1996) был предложен биоклиматический динамический подход, в котором для описания связи между климатом и растительностью используют "биоклиматический индекс" или "биоклиматическая схема". Под биоклиматическим индексом понимается комбинация климатических параметров (например, таких как радиация, температура, осадки), с которыми сопоставляется та или иная характеристика растительности. Формальным образом биоклиматический индекс может быть представлен отображением множества климатических параметров на множество параметров растительного покрова

$$G:\{K \to B\}$$

БИОКЛИМАТИЧЕСКАЯ СХЕМА ХОЛДРИДЖА

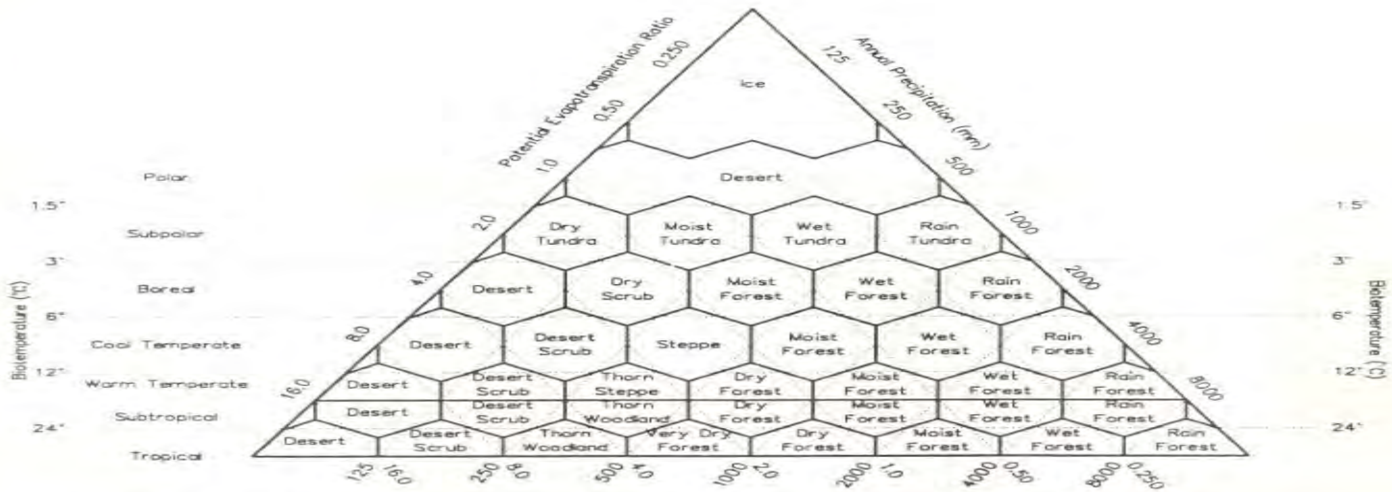


Fig. 1a. Holdridge climate-vegetation classification scheme (from Holdridge 1967).

```
-------------------------------------------------------
Sense of bioclimatic scheme is mapping:
               Ci ---------> Bj

Ci is  set of climatic parameters values
Bi is "i" biome name (steppe, tundra, etc.)
```

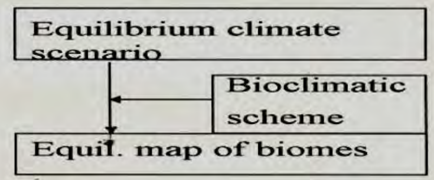
БИОКЛИМАТИЧЕСКАЯ СХЕМА С ЗАПАЗДЫВАНИЕМ

s4

C - climate

$\{B^i\}$ - types of vegetation (biomes)

Bioclimatic scheme: v: $v(C)=B\in\{B^i\}$

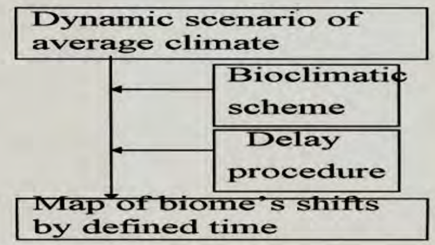


<u>Equilibrium Approach</u>

Scenario: $C_0(1xCO_2) \longrightarrow C\alpha(2xCO_2)$

Bioclimatic scheme $\downarrow$ $\downarrow$

Prognosis: $B^k=v(C_0) \longrightarrow B^j=v(C\alpha)$



<u>Dynamic Approach</u>

Scenario: $C_0(1xCO_2), C_1, \ldots, C_n(2xCO_2)$

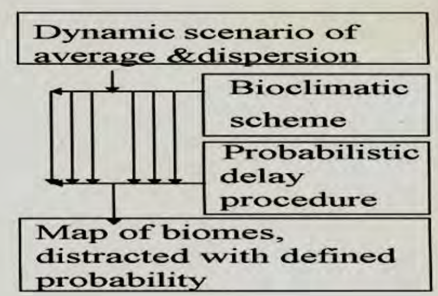
Bioclimatic scheme $\downarrow$ $\downarrow$ $\downarrow$

$B_0^*=v(C_0), B_1^*, \ldots, B_n^*=v(C_n)$

Delays $\downarrow(Q_{kj})$

Prognosis: $B^k \longrightarrow B^j$ at the time $t=q$

if $B^*_{q-Q_{kj}} = B^k$; $B^*_{q-Q_{KJ}+i}=B^j$, $i=1,\ldots,Q_{kj}$



<u>Advanced Dynamic Approach</u>

Scenario: $\sigma_0(1xCO_2), \sigma_1, \ldots, \sigma_n(2xCO_2)$

$C_0(1xCO_2), C_1, \ldots, C_n(2xCO_2)$

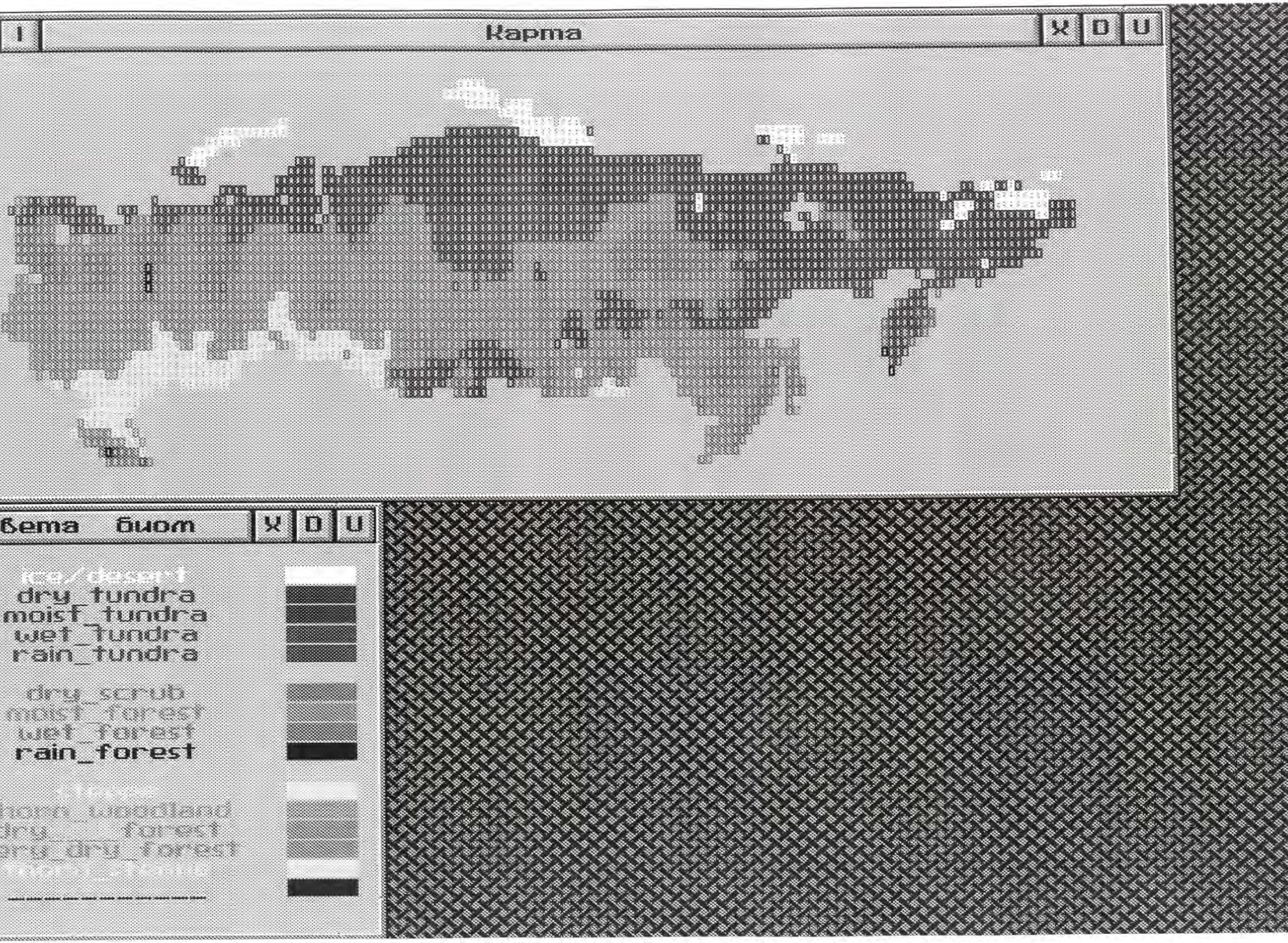
Bioclimatic scheme $\downarrow$ $\downarrow$ $\downarrow$

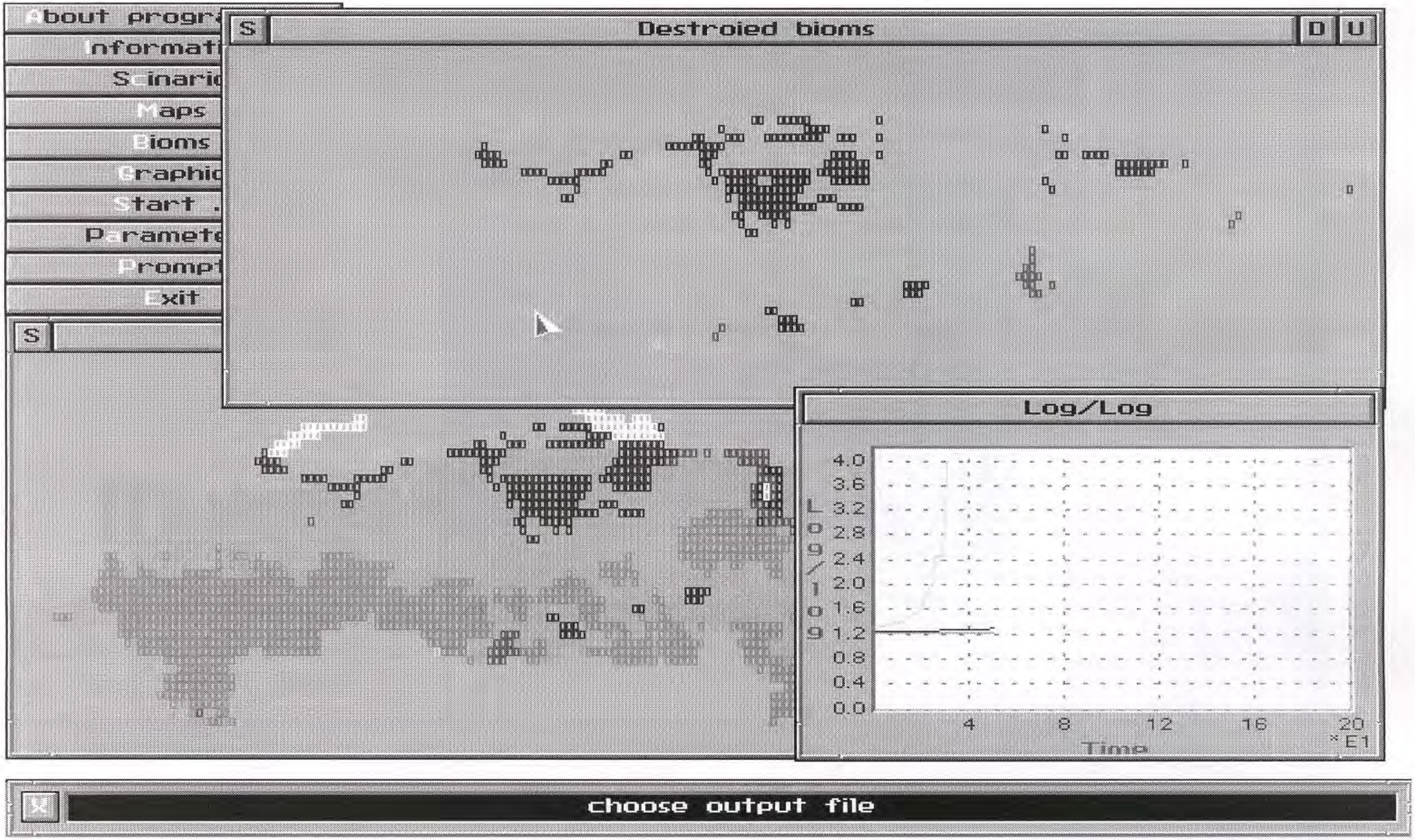
$B_0^*=v(C_0), B_1^*, \ldots, B_n^*=v(C_n)$

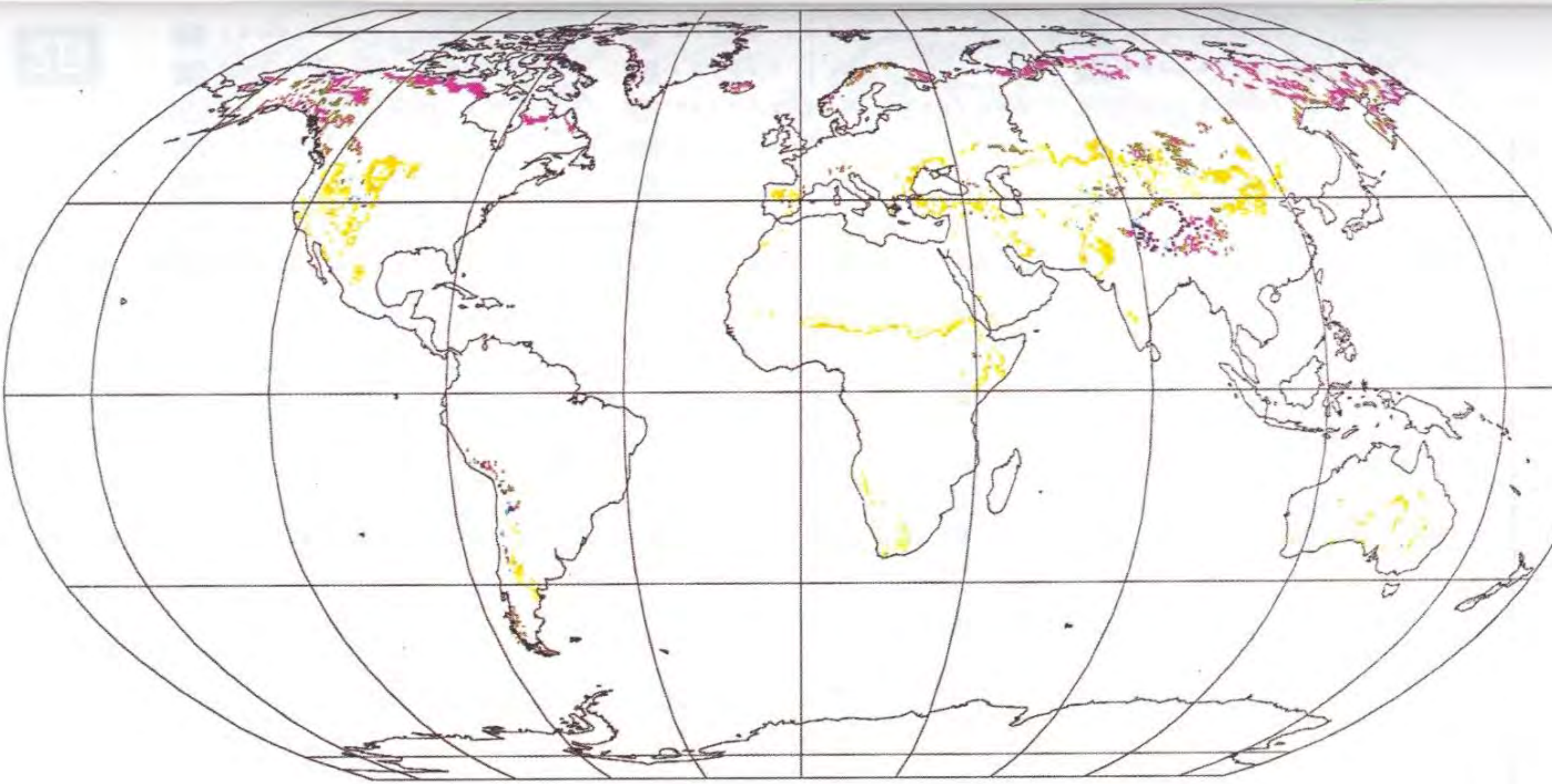
Delays $\downarrow(Q_k)$

Prognosis: $B^k \longrightarrow B^j$ at the time $t=q$

if $B^*_{q-Qk+i} \neq B^k$, $i=1,\ldots,Q_k$


Карта
биом
ice/desert
dry_tundra
moist_tundra
wet_tundra
rain_tundra
dry_scrub
moist_forest
wet_forest
rain_forest

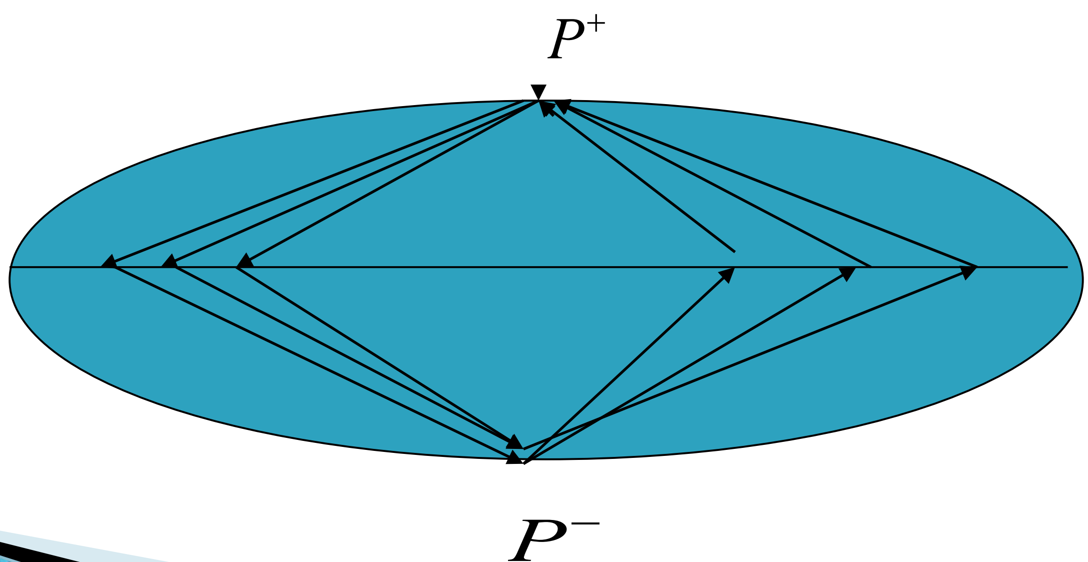

About progra
Informati
Scinario
Maps
Bioms
Graphic
Start .
Parameter
Prompt
Exit
S
Destroied bioms
D
U
Log/Log
4.0
3.6
3.2
2.8
2.4
2.0
1.6
1.2
0.8
0.4
0.0
Log/log
4
8
12
16
20
*E1
Time
choose output file


cold deciduous for.
cold mixed forest
northern taiga
taiga
cool conifer forest
cool mixed forest
temp. deciduous for.
evergreen mixed for.
tropical rain forest
tropical seas. for.
tropical dry forest
xerophytic woodland
tundra
woody tundra
cool grasslands
warm grasslands
ice & polar desert
semidesert
hot desert
agriculture
new biomes

2A

Размерный спектр (Горшков В.Г.)

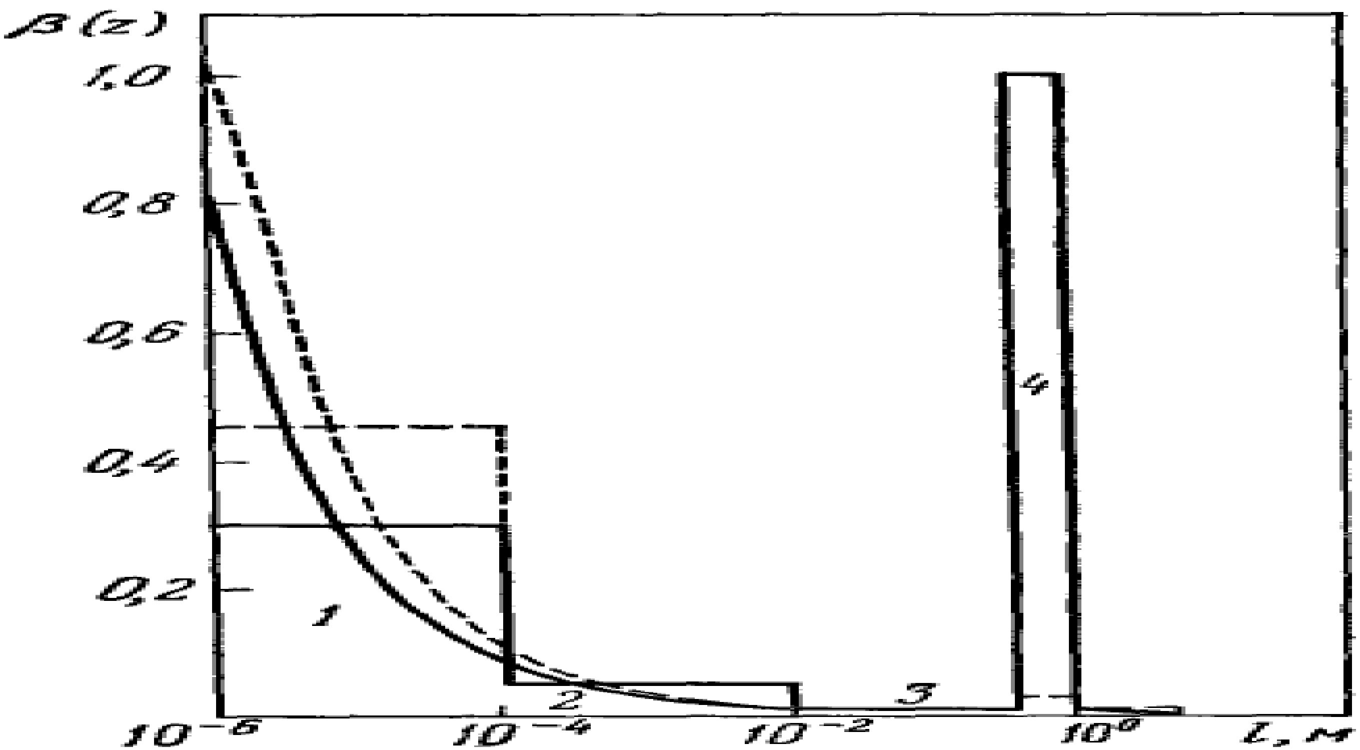
- Спектральная плотность $\beta = P_l^- / P^+$
- Спектральная плотность деструкции, P_l^-
- производимой организмами размера l
- Продукция растений суши P^+



- Разомкнутость круговорота биогенов $\chi = (P^{+} - P^{=}) / P^{+}$

- Флуктуация деструкции (потребления) не превышает
- разомкнутости

$$\beta \le (\sqrt{n} / l)\chi$$



- Устойчивость экологических сообществ может быть охарактеризована минимальностью флуктуаций доступных запасов органических и неорганических веществ. Эти флуктуации возникают вследствие рассогласования во времени процессов синтеза и деструкции, организуемые различными видами (организмами), имеющими различные характерные размеры особей. Возникающие дефициты (рассогласования) могут приводить к разрушению локальных экосистем. Естественно предположить, что в процессе эволюции происходила минимизация таких флуктуаций, и это положение может считаться важным принципом организации локальных экосистем. Исходя из этого положения в работе (Makarieva, 2004) показано, что численность вида, удовлетворяющая вышесказанному принципу, связана со средним размером особи вида и средним метаболизмом особи следующим выражением .

$$n \square \frac{1}{lq}$$

- Полученное соотношение носит статистический характер, причем при получении ее авторы не конкретизируют характерное время усреднения. Оно не связано с типами взаимодействия между популяциями и не может претендовать на объяснение таких явлений, как колебания численности или пространственные волны. Тем не менее, ясно, что, если мы хотим рассматривать динамические процессы, происходящие в природе, нам надо вводить в качестве модельной характеристики размерный спектр потребления первичной продукции различными популяциями, входящими в экосистему. Последнее предполагает введение в модель не только численности видов, но и ***доли потребляемой первичной продукции***.

- **ПОПУЛЯЦИОННЫЕ МОДЕЛИ С НЕЛИНЕЙНОЙ ДИФФУЗИЕЙ**
  Белотелов Н.В., Лобанов А.И.
  Математическое моделирование. 1997. Т. 9. № 12. С. 44.

- Рассмотрим энергетический баланс особи. Метаболическая мощность передвигающегося организма **q** связана с основным обменом q0 (мощностью метаболизма организма при фиксированной температуре в состоянии полного покоя) следующим образом:

$$q = \left(A(u) + 1 \right) \cdot q_0$$

- где **u** – средняя скорость передвижения,

- $$A(u) = u / u_0 + b$$

- – активность, u/u0 – чистая активность передвижения, u0 является универсальной характеристикой передвижения, не зависящей от размеров животного в рамках заданной таксономической группы (u0 ≈ 0.3 м/с). Величина A(0)=b называется готовностью к передвижению.
- Обозначим через R – радиус индивидуальной активности, то есть характерный линейный размер индивидуальной кормовой территории. Введем характерные времена τR - время восстановления ресурса - и τS - время обхода особью своей кормовой территории.

- Тогда легко получить, площадь индивидуальной кормовой территории $\sim R^2$. Длина пути, проходимого по данной территории , $\sim R^2/L$. (Мы предполагаем, что при кормовом перемещении особь съедает ресурс с полосы шириной L, эта длина совпадает с характерным размером особи). Тогда скорость перемещения $u = R^2/(L \cdot \tau_s)$
- .
- Известно, что мощность основного метаболизма $q_0 \sim M^{\frac{2}{3}} \sim L^2$, где М – масса животного. Тогда метаболитическую мощность можно записать в виде:

$$q = \alpha \cdot L^2 \cdot \left(\frac{R^2}{L \cdot \tau_s} + 1 + b \right)$$

- Мощность воспроизводства ресурса равна $w = \frac{\rho \cdot R^2}{\tau_R}$
- , где ρ - плотность ресурса. Из закона сохранения энергии получаем:
- $$\alpha \cdot L^2 \cdot \left(\frac{R^2}{L \cdot \tau_s} + 1 + b \right) = \frac{\rho \cdot R^2}{\tau_R}$$
- или, после преобразований:

$$R^2 = \frac{\alpha \cdot (b+1) \cdot L^2 \cdot \tau_s}{\rho \cdot \frac{\tau_s}{\tau_R} - \alpha \cdot L} = (b+1) \cdot \tau_S \frac{k \cdot L^2}{1 - k \cdot L}$$

- где. $k = \frac{\alpha}{\rho} \cdot \frac{\tau_R}{\tau_S}$
- Это равенство имеет смысл, если или если отношения плотности ресурса к удельной энергии перемещения больше, чем отношение характерного времени восстановления ресурса к характерному времени обхода кормовой площадки ($\frac{\rho}{\alpha L} > \frac{\tau_R}{\tau_S}$).

- Предположим, что в популяции характерный (средний) размер особей равен L, при этом в популяции существуют вариации размера δL. Будем считать, что δL/L <<1. Тогда из предыдущего соотношения непосредственно следует равенство

$$2 \cdot R_0 / \tau_S \cdot \delta R = k \cdot (b+1) \frac{2 - k \cdot L_0}{\left(1 - k \cdot L_0\right)^2} \cdot L_0 \cdot \delta L = 2 \delta U \delta R$$

- Здесь учитываются только члены первого порядка малости.
- Формула играет роль соотношения неопределенности для популяции. Физический смысл ее заключается в следующем. Разброс в размерах (массах) взрослых особей в пределах одного вида (более того, одной популяции) приводит либо к разбросу в радиусах индивидуальной активности, либо в средних скоростях перемещения по ареалу. Этот разброс тем больше, чем больше размерный класс животного L и вариации размера δL. Для конкретной особи радиус ее индивидуальной активности или среднюю скорость возможно определить не точнее, чем позволяет соотношение .

- Воспользуемся им для оценки размеров популяции, когда неопределенность не сказывается, то есть $X \cdot V_x \gg \Psi \cdot L\delta L$ где . $\Psi = k \cdot (b+1) \dfrac{2 - k \cdot L_0}{(1 - k \cdot L_0)^2}$
- Величина $\lambda = k \cdot (b+1) \cdot \left\lfloor \dfrac{2 - k \cdot L_0}{(1 - k \cdot L_0)^2} \right\rfloor L_0 \cdot \dfrac{\delta L}{V}$ имеет размерность длины.
- Введем также площадь ареала обитания популяции , $\Omega = X \cdot Y$
- тогда условием того, что неопределенностью можно пренебречь,
- будет.

$$\Omega \cdot V^2 \gg \Psi^2 \cdot L^2 \delta L^2$$

- Пусть плотность популяции $n = {}^1\!/\!_\Omega$, тогда это условие принимает
- вид . $n \cdot \lambda^2 \ll 1$
- Для такой популяции при $\lambda \ll R$ справедлива гипотеза случайных блужданий, следовательно, такую популяцию возможно описать при помощи модели типа “реакция–диффузия” с постоянным коэффициентом диффузии.
- Пусть теперь .$\lambda \cong R$ Тогда скорость перемещения особей можно определить с использованием соотношения неопределенности как . $V = \Psi \cdot L\delta L \cdot \sqrt{n}$
- Оценим поток численности особей через границу модельной прямоугольной области. Пусть длина ее границ составляет Δx и 1 соответственно. Поток через единичную границу теперь дается выражением .

$$W = \frac{\Psi \cdot L\delta L}{4} \cdot \frac{n_1^{3/2} - n_2^{3/2}}{\delta x} \cong D \cdot \sqrt{n} \cdot \frac{\partial n}{\partial x}$$

- Можно провести следующую характеристику популяций (и занимаемых ими ареалов)
- $n << R^{-2}$, λ - любая.
- Популяция с малой плотностью населения. Не описывается уравнениями типа “реакция–диффузия” ввиду того, что невозможно представить поток через границу элементарной площадки в виде функции плотности.
- $n \cong R^{-2}, \lambda. << R$
- Численность популяции близка к оптимальной, популяция описывается уравнением с постоянным коэффициентом диффузии, так как справедлива гипотеза случайных блужданий. Поток через границу будет определяться выражением .

$$W \cong \frac{\partial (V \cdot n)}{\partial x} \cong D \cdot \frac{\partial n}{\partial x}$$

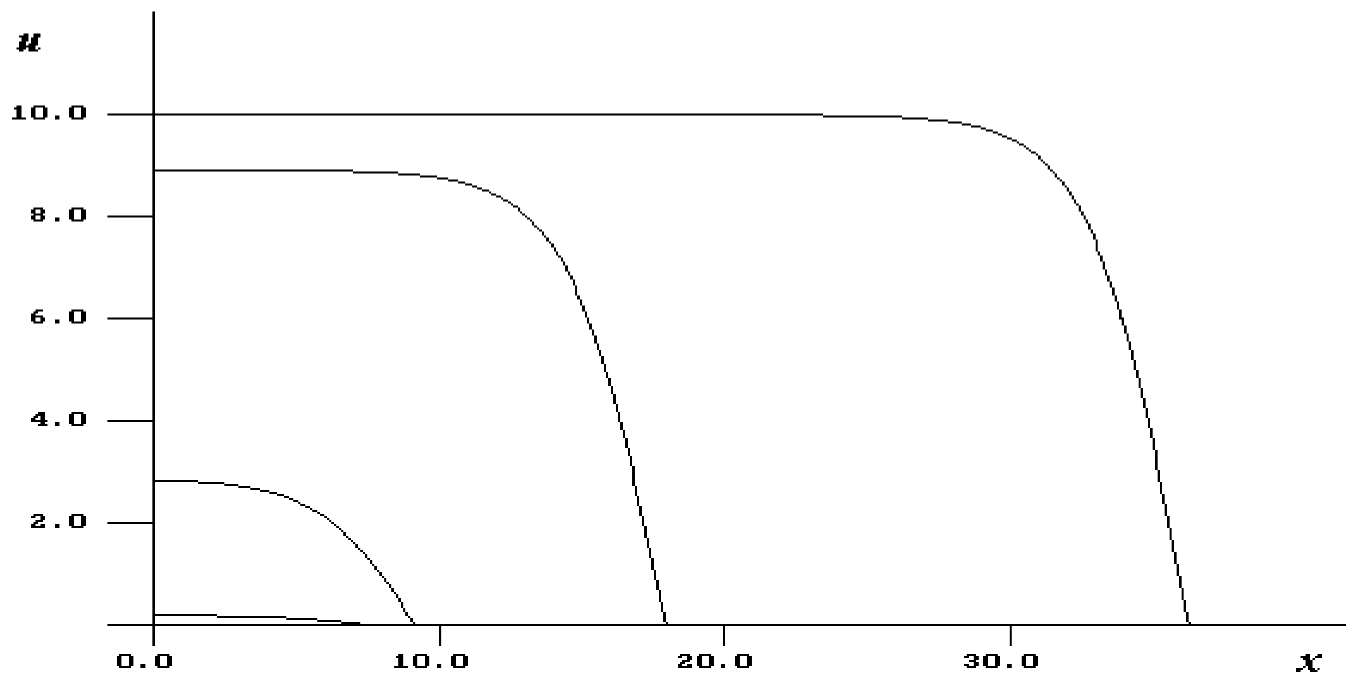
$$n \cong R^{-2}, \lambda \sim R$$

- Несмотря на то, что численность популяции “оптимальная”, динамика популяции описывается нелинейным уравнением диффузии. Этот случай рассмотрен выше.

$$n \cong R^{-2}, \lambda >> R$$

- или $n >> R^{-2}$ “Перенаселенная” популяция. Меняется тип взаимодействия. Описывается нелинейной диффузией.

$$\frac{\partial n}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x}\left(n \ \frac{\partial n}{\partial x} \right) + a \cdot n - \varepsilon \cdot n^2$$



Рассматривается целочисленная решетка $(i=1,...,L, j=1,...,F)$, на который равномерно произрастает ресурс (трава). Уравнение роста ресурса имеют вид:

$m^{i.j}_{t+1} = m^{i,j}_{t} + K - \theta_t$, если $m^{i,j}_{t} < H$ и $m^{i,j}_{t} = H$, если $m^{i,j}_{t} \geq H$,

где $m^{i,j}_{t}$ - текущее количество ресурса в точке (i,j),

K - скорость роста травы,

H - максимальное возможное количество ресурса.,

а θ_t - доля изъятия ресурсом особью, если она есть в точке (i,j)

На этой решетке находится некоторое множество подвижных особей, которые потребляют ресурс, размножаются и могут перемещаться из узла в узел. Считается, что особь имеет возраст (τ).

Гибель особи определяется условием недостатка «энергии» (ресурса) $(n_\tau \leq 0)$, который необходим для поддержания затрат на основной метаболизм.

Считается, что с возрастом, потребление ресурса уменьшается.

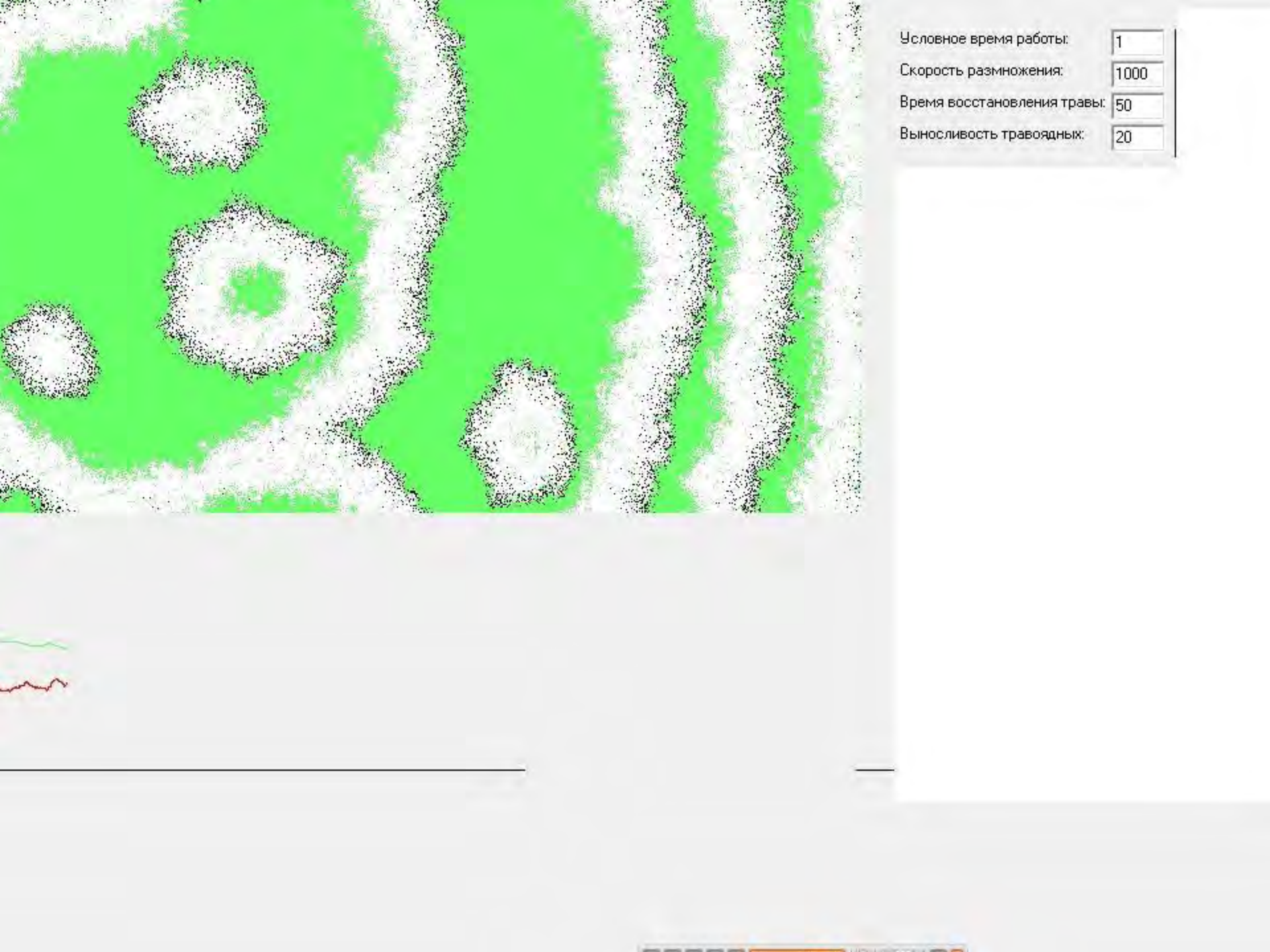
$\theta = n_\tau * C_1 (1 - \frac{\tau}{T})(1 - \frac{n_\tau}{N})$, где C_1, T, N - некоторые постоянные.

По достижении определенного размера особь случайным образом делится (процесс рождения), при этом теряется часть «энергии». Перемещение особи определяется «длиной прыжка» (S) за один временной такт и при этом теряется часть «энергии», имеющейся у особи. Особь характеризуется способностью «видеть» ресурс на расстоянии радиуса обзора (R). Направление движения особи определяется расположением ближайшего узла, в котором есть ресурс.

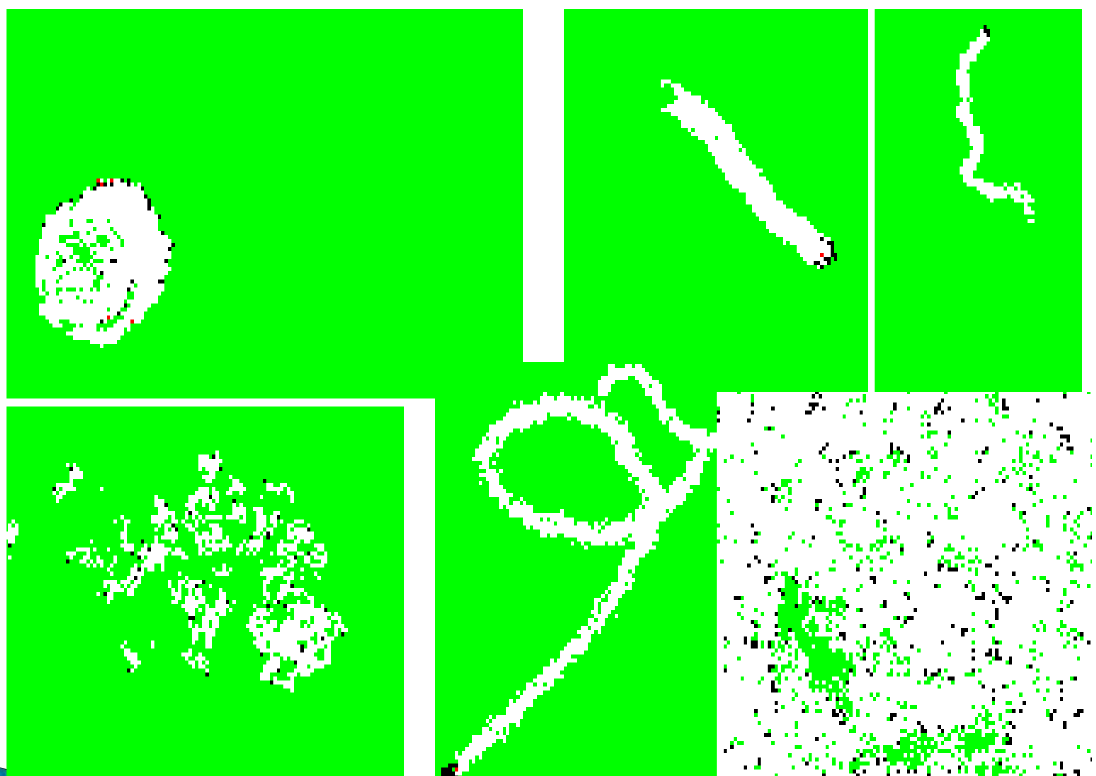
Уравнение баланса «энергии» особи имеет вид:

$$n_{\tau+1} = n_\tau * C_1 (1 - \frac{\tau}{T})(1 - \frac{n_\tau}{N}) - C_2 n_\tau S - \alpha n_\tau{}^\beta - \lambda \frac{n_\tau}{2}$$

где $C_2 n_\tau S$ - затраты на перемещение; $\alpha n_\tau{}^\beta$ - основной метаболизм; $\lambda \frac{n_\tau}{2}$ - затраты на рождение ($\lambda = 1$ – происходит рождение в момент времени t, в противном случае $\lambda = 0$). В модели считается , что рождение происходит в среднем один раз за некоторый период времени.


Условное время работы: 1
Скорость размножения: 1000
Время восстановления травы: 50
Выносливость травоядных: 20

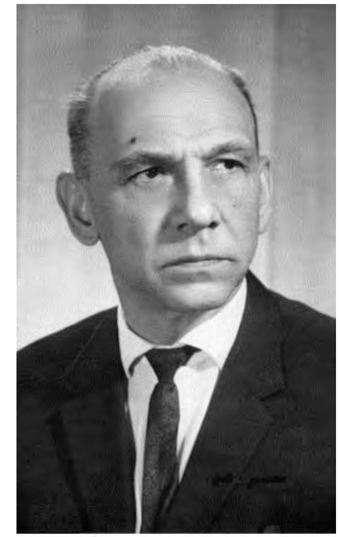
Режимы движения животных



- Из вышеприведенных примеров можно сделать вывод, что возможно целесообразно при описании живых систем заимствовать «математические образы», возникшие в процессе описания микрофизических объектов. Поскольку, как было показано выше, принципиальные совместные измерения общепринятых в настоящее время базовых экологических переменных (численность, концентрации биогенных элементов, количество видов) имеет ограниченную совместную измеримость.
- *«Всякая экспериментальная установка, которая позволила бы контролировать такие (биологические) отправления с той же степенью точностью, какая требуется для четкого их описания на языке физики, будет препятствовать свободному течению жизни.»* (Бор, 1971)

Дородницын А.А. – академик АН СССР

- «Построение математической модели – это прежде всего определение структуры оператора, а для этого алгоритмов нет…
- Моделист» находится в плену существующей математики: он пытается описать явления в новых областях с помощью известных математических структур – в основном дифференциальных уравнений, иногда с введением конечно-разностных соотношений…. только создание новой математики – дифференциального и интегрального исчислений – позволило сформулировать математическую модель движения…задачу внедрения информатики в «описательные» науки я считаю одной из важнейших, быть может самой важной проблемой близкого будущего.»
- *«Информатика, предмет и задачи» (1984 г.))*



- Всякое *новое знание* является нам в *оболочке старых понятий*, приспособленной для объяснения прежнего опыта, и что всякая такая оболочка может оказаться слишком узкой для того, чтобы включить в себя новый опыт.
- …*расширение системы понятий* не только восстанавливает порядок внутри соответствующей области знаний, но и еще раскрывает аналогии в других областях.
- .(Н.Бор «Единство знаний» 1955)

- «Человеческое мышление создает вечно изменяющуюся картину Вселенной.
- Закон инерции нельзя вывести непосредственно из эксперимента, его можно вывести лишь умозрительно – мышлением, связанным с наблюдателем. Наука для своих нужд должна создавать свой собственный язык, свои собственные понятия. Научные понятия часто начинаются с понятий, употребляемых в обычном языке повседневной жизни, но они развиваются совершенно иначе. Обобщение понятий –– процесс, часто применяемый в науке. *Однако при всяком обобщении должно быть строго удовлетворено одно требование: любое обобщенное понятие должно сводиться к первоначальному, когда выполнены первоначальные условия. Это положение составляет* ***суть принципа соответствия***.». (А.Эйнштейн)

- *Спасибо за внимание.*