

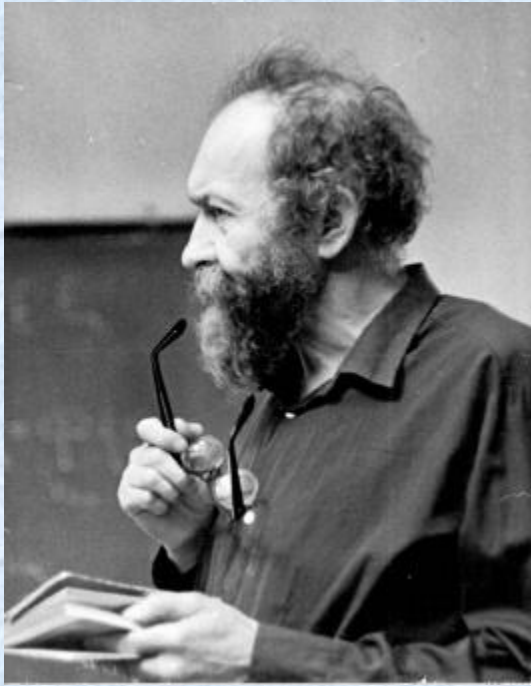
ЭВОЛЮЦИЯ МАТЕМАТИЧЕСКОГО ОПИСАНИЯ В МОДЕЛИРОВАНИИ АГРОЭКОЛОГИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

Н.Н.Семенова

**ВИЗР (Всероссийский НИИ защиты растений
РАСХН)**

**Санкт-ПетербургскийГУ
Математико-механический ф-т**

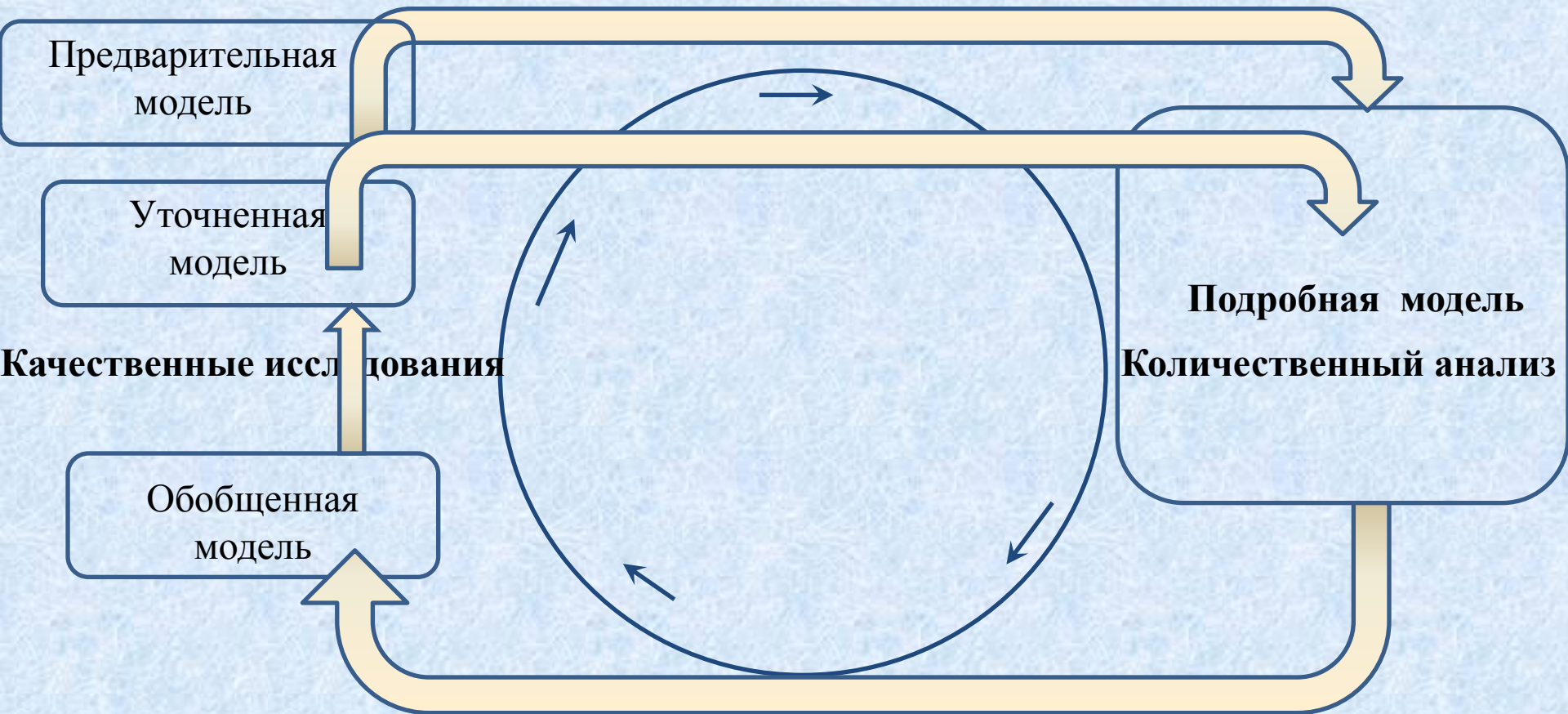
Истоки математического моделирования в экологии и агроэкологии



А.А. Ляпунов "Вся теоретическая биология должна состоять, по нашему мнению, из двух частей: физико-химической, назначение которой состоит в том, чтобы расшифровать физико-химическую природу элементарных актов жизнедеятельности на уровне макромолекул или клеточных органелл, и кибернетической, назначение которой состоит в том, чтобы понять функционирование биологических систем, отправляясь от их структуры и сведений о свойствах их элементов"

Все нужно делать просто насколько это возможно, но не проще Альберт Эйнштейн

Круговорот моделирования



Имитационные модели

Симона

**Система Имитационного Моделирования
Нестационарных процессов в Агроэкосистеме**

AGROTOOL

Система Имитационного Моделирования

**Системы Имитационного Моделирования
в защите растений**

Взаимосвязь имитационных моделей в защите растений



Математическая модель циклического развития болезни Ван дер Планка

Предварительная модель

$$\frac{dx}{dt} = R(x(t - p) - x(t - p - i))(1 - x),$$

- x - число поражений на единицу ткани хозяина, либо доля зараженной ткани – динамическая переменная, характеризующая состояние системы
- Параметры модели
 - R - основная скорость инфекции
 - p и i - продолжительность латентного и инфекционного периодов

Переменные модели развития патогена

№	наименование	имя	размерность
1	номер уредогенерации	iu	
2	номер яруса	i	
3	указатель прорастания	upr1	
4	продолж. влажн. периода рассчитаного	vv	час
5	продолж. влажн. периода рассч. на пред. шаге	vv1	час
6	продолж. влажн. периода фактического	vlag	час
7	продолж. влажн. периода факт. на пред. шаге	vlag1	час
8	число дней с начала эксперимента	sday	
9	число погибших уредогенераций	j2	
10	число уредогенераций в текущий момент	ii	
11	номера живых уредогенераций	nu(50)	
12	возраст пустул в уредогенерации	l(50)	
13	продолжительность послепериод. периода	ll(50)	
14	максимальный возраст спор	m(50)	
15	длина латентного периода	taul(50)	Сут
16	день образования уредогенерации	tp(50)	
17	день образования пустул	tl(50)	
18	день окончания инфекционного периода	ti(50)	
19	день гибели уредогенерации	tu(50)	
20	сумма эффективных температур	tal(50)	°C
21	число осевших спор (текущее)	xs(3)	шт./м2
22	число произведенных спор (текущее)	xsp(3)	шт/м2
23	плотность спор на листовой поверхности	ys(3)	шт./см2
24	число погибших спор (текущее)	xds(3)	шт./м2
25	число спор в уред. по возрастам пустул	xsl(3,10,5)	шт./м2
26	плотность спор при прорастании	xss(3,50)	шт./см2
27	число спор, произведенное уредогенер.	xps(3,50)	шт./м2

28	текущее состояние уредогенерации: LAT, INF, POSTINF	st(50)	
29	число пустул (текущее)	xp(3)	шт./м2
30	плотность пустул на лист. поверхности	yp(3)	шт./см2
31	число погибших пустул	xpd(3)	шт/м2
32	число пустул пр уредогенерациям	xpp(3,50)	шт./м2
33	средняя площадь пустулы	sps(3)	мм2
34	средняя производительность пустулы	prs(3)	шт./пуст.
35	площадь пустулы	sp(3,50)	мм2
36	число спор на пустулу	pr(3,50)	шт./пуст.
37	к-т смертности от недостатка увлажнения	nvs	1/сут.
38	возрастной к-т смертности	cs1	1/сут
39	к-т смертности от внешних факторов	cp	1/сут.
40	инфицированная листовая поверхность	spi(3)	см2/м2
41	отмершая листовая поверхность, некроз в результате болезни	spd(3)	см2/см2
42	доля здоровой ткани	prz(3)	
43	процент развития болезни по шкале Гешеле	rzb(3)	

Входная и выходная информация модели развития патогена

входные параметры блока развития патогена

№		имя	размерн. н.
1	эффективная темпер. для выхода из латентн. Периода	tpol	$^{\circ}\text{C}$
2	продолжительность эксперимента	period	сут.
3	число уредогенераций в латентном периоде	il	
4	число ярусов	nl	
5	день появления видимой инфекции	gust	сут
6	длина инфекционного периода	taui	сут.
7	к-ты распределения спор по ярусам	aa(i)	
8	начальная плотность спор	ys0(i)	шт./см
9	начальная плотность пустул	yp0(i)	шт./см
10	к-т смертности от обработок	cs	1/сут.
11	к-т регрессии для вычисления площади пустулы	rra	
12	к-т регрессии для вычисления площади пустулы	rb	
13	к-т регрессии для вычисления производ. пустулы	rsa	
14	к-т регрессии для вычисления производ. пустулы	rsb	
16	температура воздуха	temp	
17	осадки	os	мм
18	влажность воздуха	w	

выходные переменные блока развития патогена

№	наименование	имя	размерн. н.
1	доля здоровой ткани	przg(t)	%
2	развитие болезни по шкале Гешеле	spig(t)	%
3	число производимых спор	xspg(t)	шт/м ²
4	плотность пустул	ypg(t)	шт/см ²
5	плотность осевших спор	ysg(t)	шт/см ²

Микроцикл развития типичного микоза

Имитационная модель

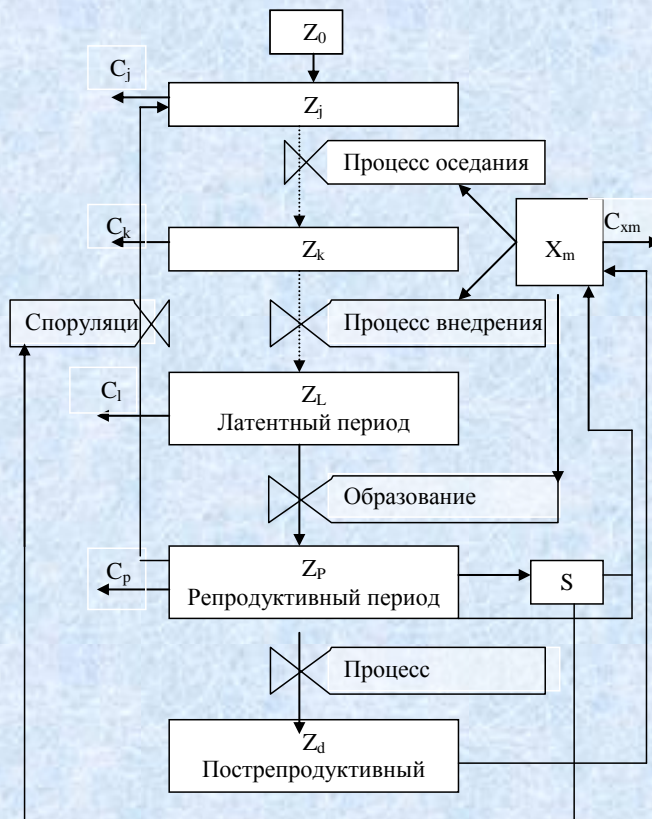


Схема развития патогена – возбудителя бурой ржавчины

$$\begin{cases} \frac{dz_k}{dt} = g_k(Z, s, V_k, M, X) - c_k(M, X)z_k, \\ \frac{ds}{dt} = f(s, Z, C, N), \quad k = 1, \dots, l, \end{cases}$$

1. Связь между периодом увлажнения и температурой воздуха
 $T = 16,5/\sqrt{(t-2)} + 13,5 (t+30)$
2. Доля погибших от недостатка увлажнения спор (R -время увлажнения, $R < T$)
 $Y = 87,96 - 40,71 \ln(R) - 0,76t$
3. Связь между плотностью пустул p и их размером (s)
 $\ln(s) = a + b \ln(p)$
4. Развитие болезни (D) по шкале Гешеле (S - доля площади листа, занятой пустулами)
 $\ln D = 1.63983 + 1.30294 \ln (S)$

Математическая модель циклического развития болезни как следствие имитационной модели Обобщенная модель

$$\frac{dx}{dt} = (U_{t-p} - U_{t-p-i} + V)(1 - x) - cx$$

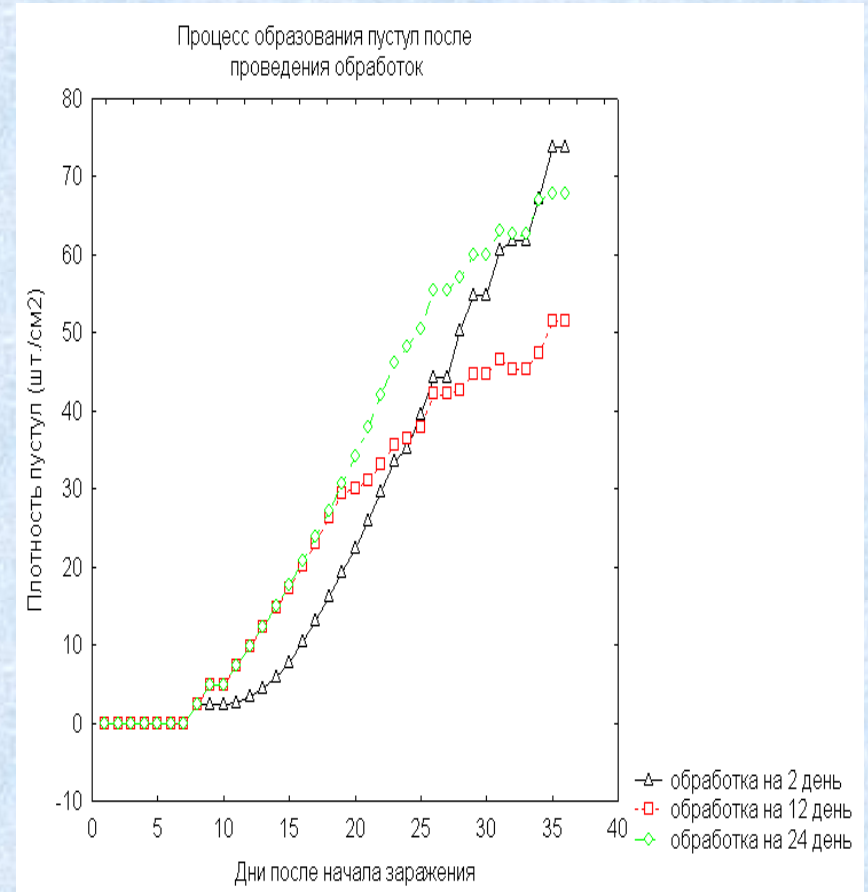
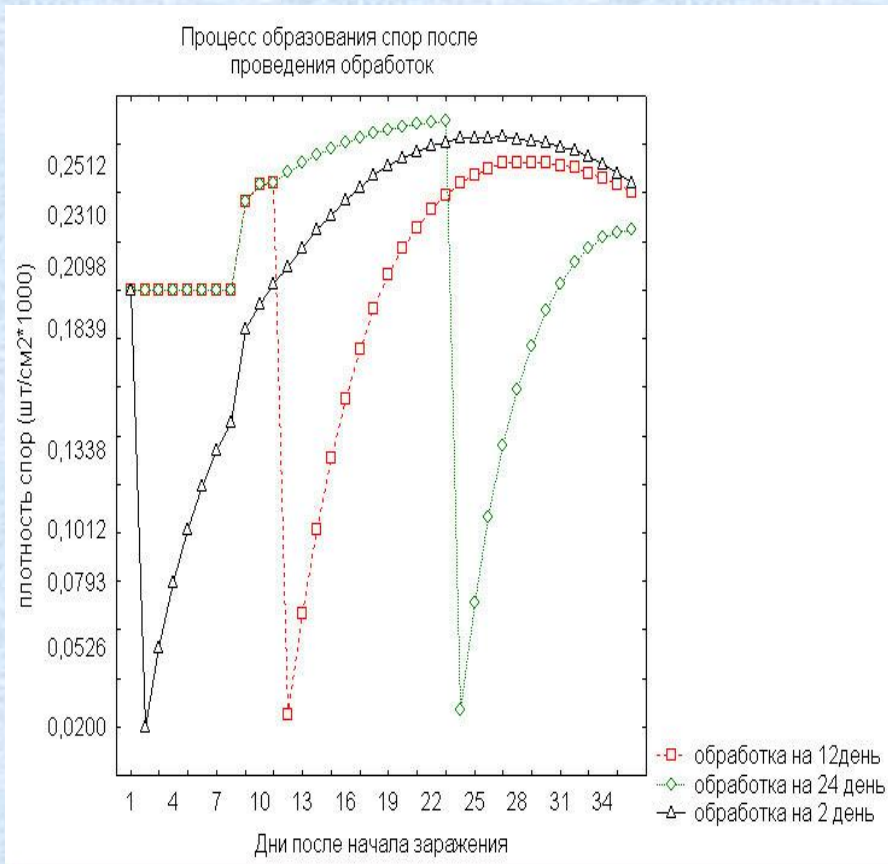
$$U_{t-d} = K_1 F(s) G \frac{x(t-d)s(t)}{s(t-d)} + K_2 G x(t-d), \quad d = p, p - i,$$

$$V = \int_{t-p}^t U(t-p)c(t)dt, \quad c = R_L + R_s, \quad R_L = \frac{1}{L} \frac{dL}{dt}, \quad R_s = \frac{1}{s} \frac{ds}{dt},$$

$$R = K_1 F(s) G$$

Параметр K_1 характеризуют процесс внедрения;
 F - величина, определяющая репродуктивную
способность патогена и зависящая от размера
поражения s ,
 G - характеристика процесса оседания спор

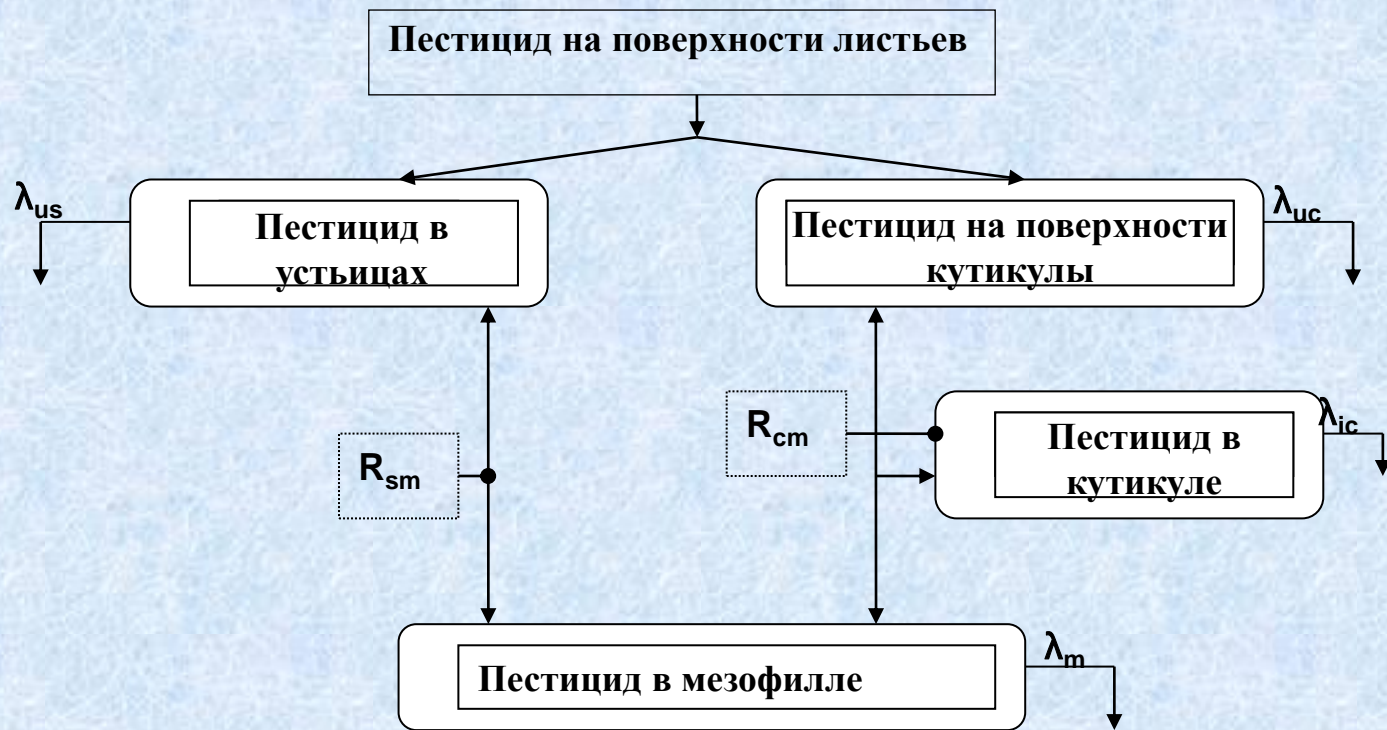
Эффективность обработок при изменении сроков проведения (начальный уровень зараженности - 0.1 пустула./кв.см)



Процессы, определяющие поведение пестицидов в системе растение-почва

- **Начальное распределение пестицидов в растительности и почве.**
 - 1.1. Наземная обработка посева. Снос при обработке
 - 1.2. Внесение в почву: поверхностное внесение, заделка в почву.
- **2. Вертикальная миграция**
 - 2.1. Передвижение пестицида в почве.
 - 2.2. Перемещение пестицида в растительности.
- **3. Взаимодействие с растительностью и почвой.**
 - 3.1. Перехват и снос с листовой поверхности.
 - 3.2. Проникновение в наземную часть растения.
 - 3.3. Сорбция почвой.
 - 3.4. Поглощение корневой системой растения.
- **4. Элиминирование пестицидов.**
 - 4.1. Разложение пестицидов.
 - 4.2. Испарение с листовой поверхности и поверхности почвы

Схема проникновения пестицида в листья растений

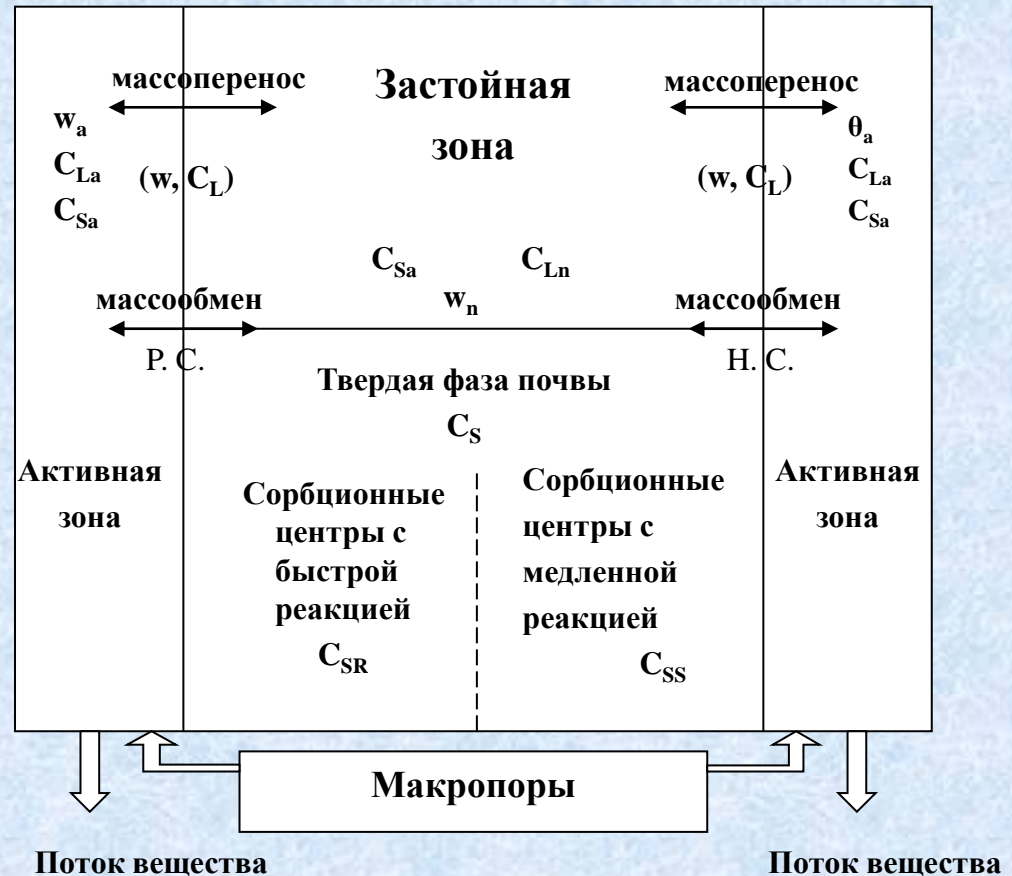


- Перераспределение пестицида
- ↔ Диффузия пестицида
- ↓ Метаболизм и деградация пестицида

- ▭ Компартмент
- ▭ Переменная состояния
- ▭ ● Сопротивление движению

Схематичное представление концепций двух сорбционных центров и двух зон почвы – застойной и проточной.

- Н.С. – неравновесная, Р.С. – равновесная сорбция;
- W_a , W_n – влажность почвы в мобильной и застойной зонах;
- C_{La} , C_{Ln} – концентрация вещества в жидкой фазе в мобильной и застойной зонах;
- C_{Sa} , C_{Sn} – концентрация вещества в твердой фазе в мобильной и застойной зонах;



Динамическая модель взаимодействия пестицидов с компонентами агроценоза

$$\frac{dC_{T_i}^k}{dt} = -\frac{J_i^k - J_{i-1}^k}{h_i} - f_{Di}^k - f_{Pi}^k, \quad C_T^k = \sum_{\alpha} C_{\alpha}^k \rho_{\alpha}^k$$

$$C_{T_i}^k(x, 0) = C_{T_{0i}}^k(x), \quad k = 1, 2, \quad i = 1, \dots, n,$$

$$C_{\beta}^k(x, t) = \int_0^t f(\tau) F_k(C_{\alpha}^k(x, t - \tau)) d\tau + C_{\beta}^k(x, 0) f(t), \quad k = 1, 2,$$

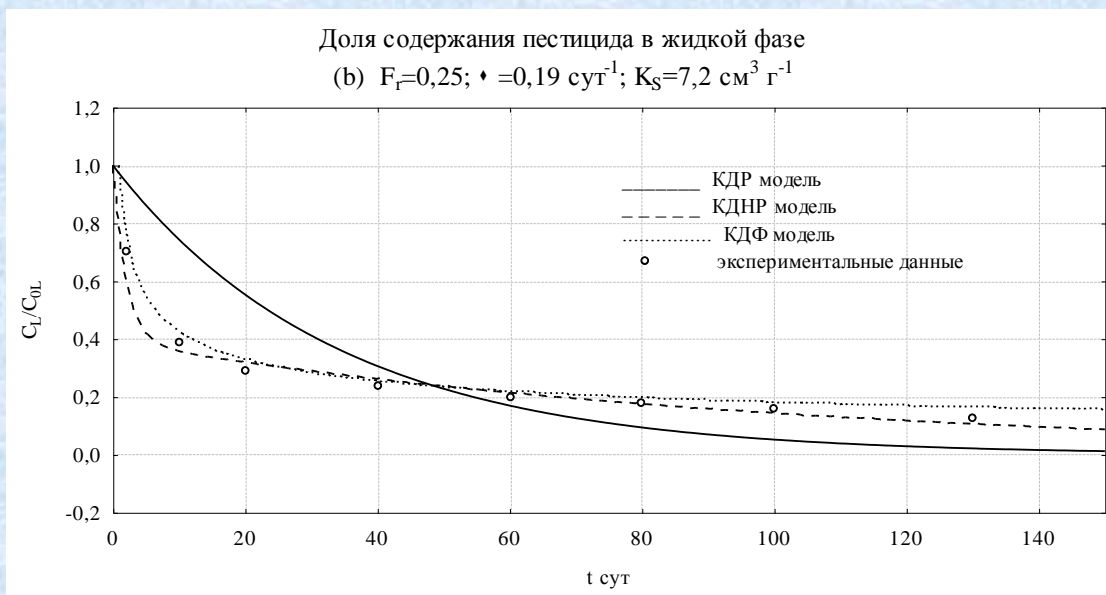
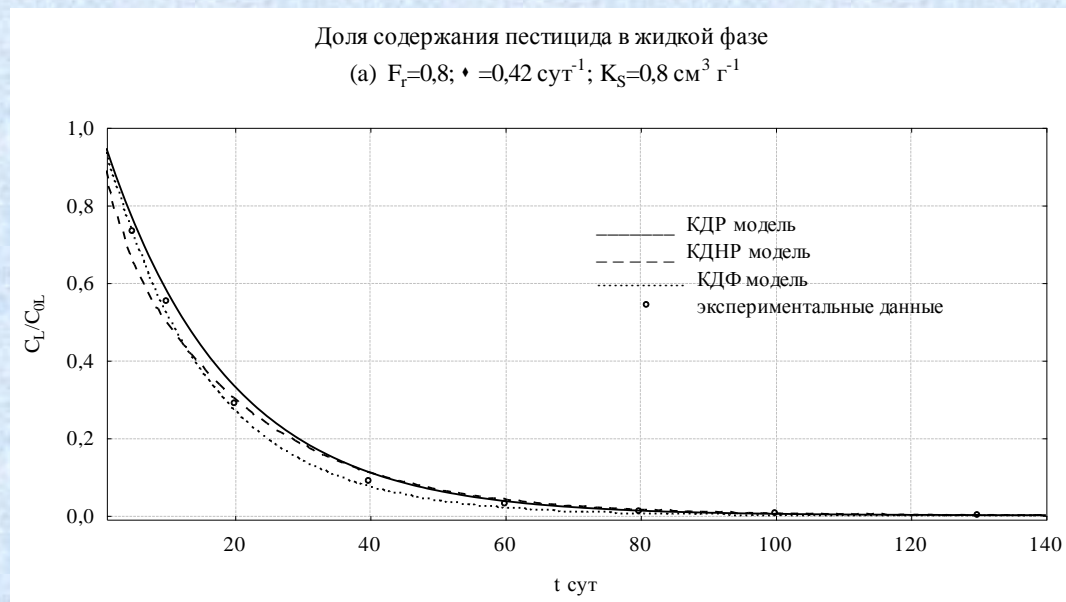
Где i, h_i - номер и высота пространственного компартмента

C_i^k, J_i^k - концентрация пестицида и потока пестицида из i -того компартмента; $k=1, 2$; $k=1$ - соответствует наземной части агроценоза, $k=2$ - почве; T - общее содержание в пространственном компартменте

$F_k(C)$ - функция, характеризующая поведение пестицида на границе раздела фаз или компонентов агроценоза

α, β, i - обозначения функциональных компартментов; ρ_{α}^k - плотность вещества в компартменте; $f(t)$ - функция задает свойства разделяющей поверхности.

Сравнительная характеристика расчетов деградации пестицидов для моделей конвективно-дисперсионных с равновесной и неравновесной сорбцией КДР, КДНР и моделью движения во фрактальной среде КДФ



Соответствие между обобщенными и эмпирическими моделями поведения пестицидов в почве агроценозов

Процессы	Типы моделей			
	Конвективного переноса (КП)	Точечные		
		ТР	ТНР	ТФ
Описание процессов				
Влагоперенос	Стационарные влажность и водный поток	Стационарная влажность, отсутствие миграции		
Массоперенос	Уравнение поршневого вытеснения	-	-	-
Сорбция	Линейная равновесная сорбция	Линейная равновесная сорбция	Линейная неравновесная сорбция	Линейная неравновесная сорбция с учетом нерегулярности границы
Деградация	Кинетика 1-го порядка, общий показатель деградации	Кинетика 1-го порядка, общий показатель деградации	Кинетика 1-го порядка, влияние сорбции	Кинетика 1-го порядка, влияние сорбции
Переход в газообразную фазу	Закон Генри	Закон Генри	-	-
Взаимодействие с корневой системой	Упрощенная модель роста корней, пассивный транспорт	Упрощенная модель роста корней, пассивный транспорт	-	-
Условия применения				
Свойства среды	Изотропная в горизонтальной плоскости среда	Однородная среда	Неоднородная среда с регулярной границей	Неоднородная среда с нерегулярной границей
Свойства пестицида	$0 < \lg K_{ow} < 4,5$	$0 < \lg K_{ow} < 4,5$	$0 < \lg K_{ow} < 4,5$	$\lg K_{ow} > 0$
Соответствующие эмпирические модели				
Типы эмпирических зависимостей	-	Экспоненциальная	Сумма двух экспонент	Степенная

Интеграция процессов в почве с использованием фрактальных моделей

- Моделирование гетерогенности почвенной структуры и ее влияния на почвенные характеристики**
- Моделирование связи гетерогенности почвенной структуры и архитектоники корневой системы**
- Моделирование гетерогенности распределения удобрений и ее влияния на урожайность культур**
- Моделирование связи гетерогенности почвенной структуры и распределения почвенной фауны**
- Моделирование движения почвенной влаги и вещества в почве**

Выводы

- 1. Доминирование динамических моделей
- 2. Сближение качественного моделирования с имитационным
- 3. Включение нового математического аппарата, позволяющего осуществить это сближение