

ЛЕСНОЙ КЛИМАТИЧЕСКИЙ ПРОЕКТ:
ОЦЕНКА ВЛИЯНИЕ ПОГОДНЫХ ФАКТОРОВ
НА РАЗВИТИЕ ВСПЫШЕК МАССОВОГО
РАЗМНОЖЕНИЯ ЛЕСНЫХ НАСЕКОМЫХ В
ТАЕЖНЫХ ЛЕСАХ И РИСКИ ИЗМЕНЕНИЯ
ЧАСТОТЫ И ЗОН ВСПЫШЕК ПРИ
ВОЗМОЖНЫХ КЛИМАТИЧЕСКИХ СДВИГАХ

В.Г.Суховольский^{1,3}, Ю.Д.Иванова², А.В.
Ковалев³, О.В.Тарасова⁴

¹*Институт леса им.В.Н.Сукачева, Красноярск*

²*Институт биофизики СО РАН, Красноярск*

³*ФИЦ КНЦ СО РАН, Красноярск*

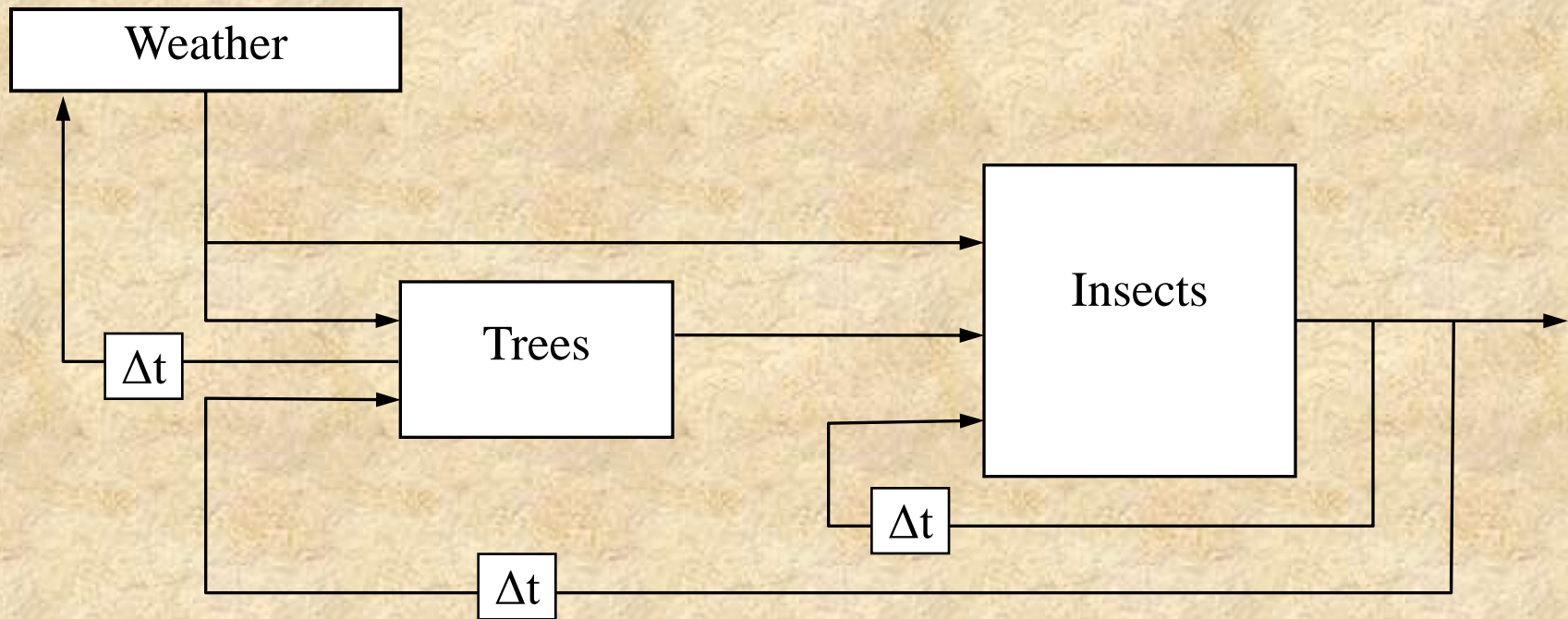
⁴*Сибирский федеральный университет, Красноярск*

Лесные насекомые являются вторым по значимости после пожаров фактором гибели лесов России. Риск значительных повреждений лесов в ходе вспышек массового размножения насекомых весьма велик. Так, в ходе последней вспышки массового размножения сибирского шелкопряда на территории Красноярского края были повреждены таежные леса на площадях до 1 млн. га.

Столь же сильно были повреждены пихтовые леса на территории Сибири (Томская и Иркутская области, Красноярский край) в ходе вспышки массового размножения уссурийского полиграфа.

Для сохранения лесов важно оценить риски вспышек и заблаговременно определить моменты начала вспышек и зоны, в пределах которых начинаются вспышки. Но для бескрайних территорий таежных лесов Сибири вести наземный энтомологический мониторинг технически невозможно.

Система «погода-лес-насекомые»



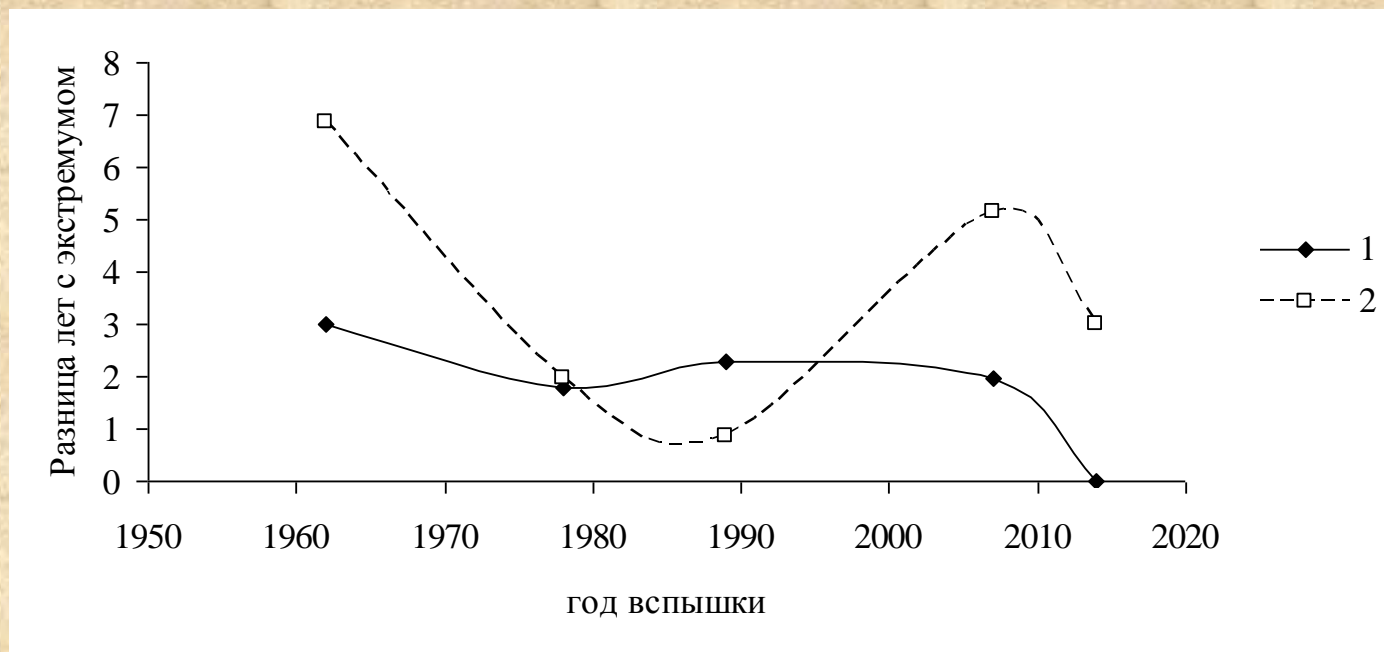
«Пирамида» событий, ведущих к развитию вспышки массового размножения отдельного вида лесных насекомых

1. Геофизические события – вся планета
2. Погодные события (для Сибири – 300 км)
3. Состояние насаждений (250х250 м)
4. Регуляторные свойства, проявляющиеся в ходе
ростовых процессов дерева (50х50 м)
5. Состояние особей в популяции насекомых

$$p(A_i, OUT) = p(A_i / OUT) p(OUT) = p(OUT / A_i) p(A_i)$$

Солнечная активность и вспышки массового размножения

Для оценки связей между показателями солнечной активности (числами Вольфа) и началом вспышек массового размножения были вычислены абсолютные значения минимальных разностей лет между годами минимума (1) и максимума (2) значений чисел Вольфа и годами начала вспышки.

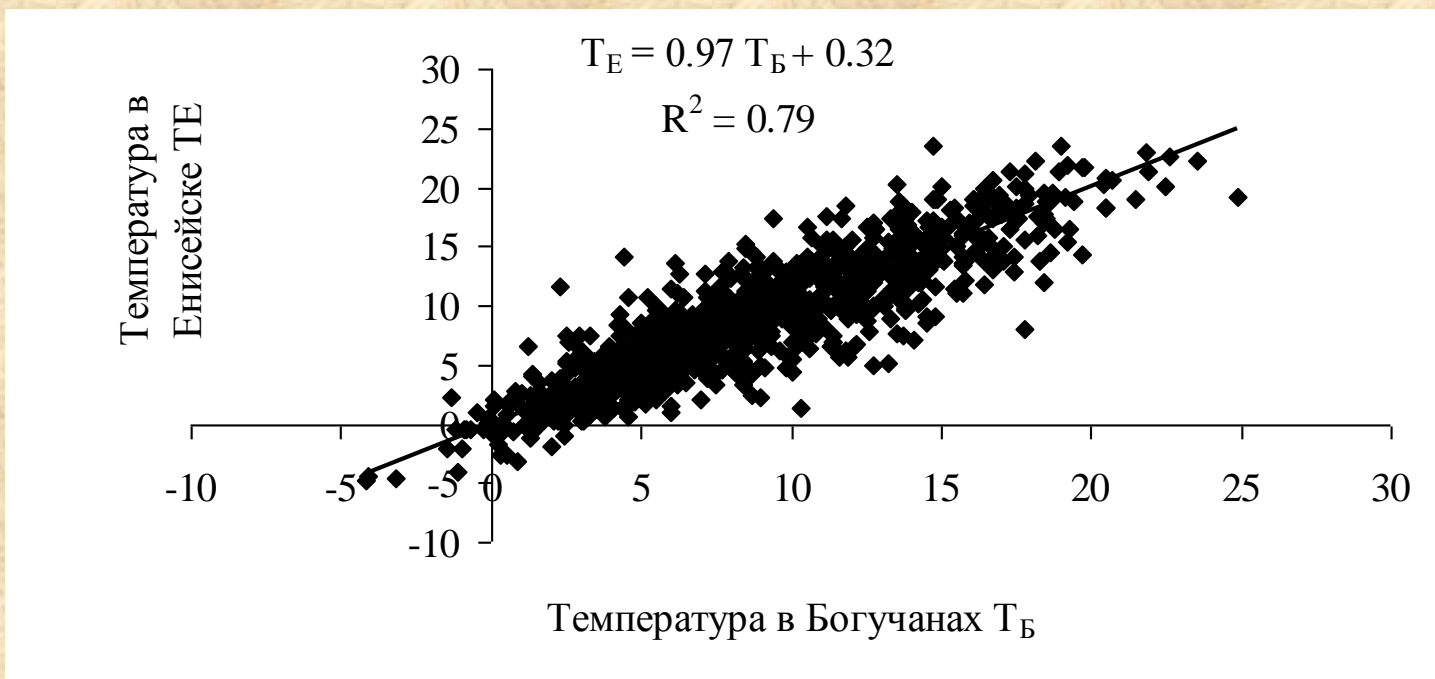


Размеры характерной территории – планета в целом

Условная вероятность $p(W/OUT)$ как необходимый фактор развития вспышки сибирского шелкопряда

Лесничество	Условная вероятность $p(W/OUT)$ перед вспышкой				
	Май	Июнь	июль	Август	Сентябрь
Енисейское	0.86	0.71	0.29	0.28	0.29
Дзержинское	1.00	0.00	0.5	0.5	0.5
Ирбейское	1.00	0.00	0.5	0.5	0.5
Саянское	0.60	0.2	0.2	0.8	0.6
Чунское	0.80	0.4	0.2	0.8	0
Большемуртинское	0.50	0	0	0	0
Нижне-Енисейское	1.00	1.00	0	0	0.5
Северо-Енисейское	0.86	0.71	0.29	0.14	0.29
среднее по лесничествам	0.83	0.38	0.25	0.38	0.34

Характерные размеры территории, на которой происходят погодные события – 300 км



Связь между температурами (на 12 часов дня) по данным метеостанций Енисейска и Богучан (~ 300 км) в течение мая с 1988 по 2019 г.

Формула Байеса для условных вероятностей критических значений погоды и вспышек массового размножения сосновой пяденицы

Событие OUT – вспышка массового размножения сосновой пяденицы в году i

Событие W – ГТК < 1 в мае $(i-1)$ -го года

вероятность	значение
$p(W/OUT)$	1
$p(OUT)$	0.114
$P(OUT/W)$	0.333
$p(W)$	0.343
$p(W, OUT)$	0.114

Точечные модели динамики численности лесных насекомых

Ранее нами была предложена ADL-модель динамики численности популяций, согласно которой текущая численность популяции (или связанное с ней значение площади поврежденных лесов) зависит от факторов двух типов – регулирующих и модифицирующих. Модель характеризуется следующим уравнением:

$$\ln X(i) = a_0 + \sum_{j=1}^k a_j \ln X(i-j) + \sum_{m=0}^n b_m W(i-m) \quad (1)$$

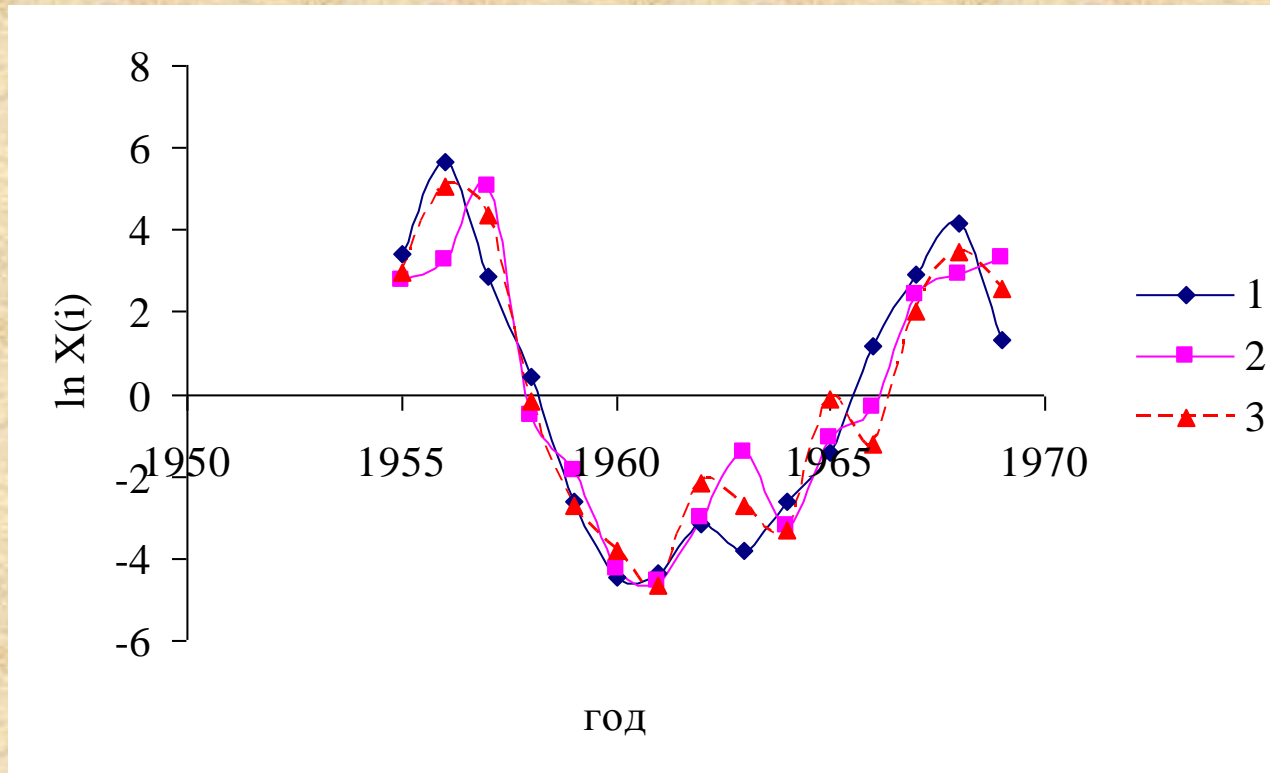
В (1) первый член a_0 в правой части уравнения – свободный член (шум системы), второй член характеризует влияние регулирующих факторов, определяемых через плотности популяции в предыдущие годы, третий член характеризует влияние модифицирующих факторов, в частности температуры воздуха и ГТК.

ADL(2,1)-модель динамики сосновой пяденицы

Урочище	Переменные модели				R ²
	a ₀	ГТК Май (i-1)	<i>ln X(i - 2)</i>	<i>ln X(i - 1)</i>	
Дюна	0.19 (0.23)	-0.36 (0.15)	-0.90 (0.10)	1.72 (0.10)	0.958

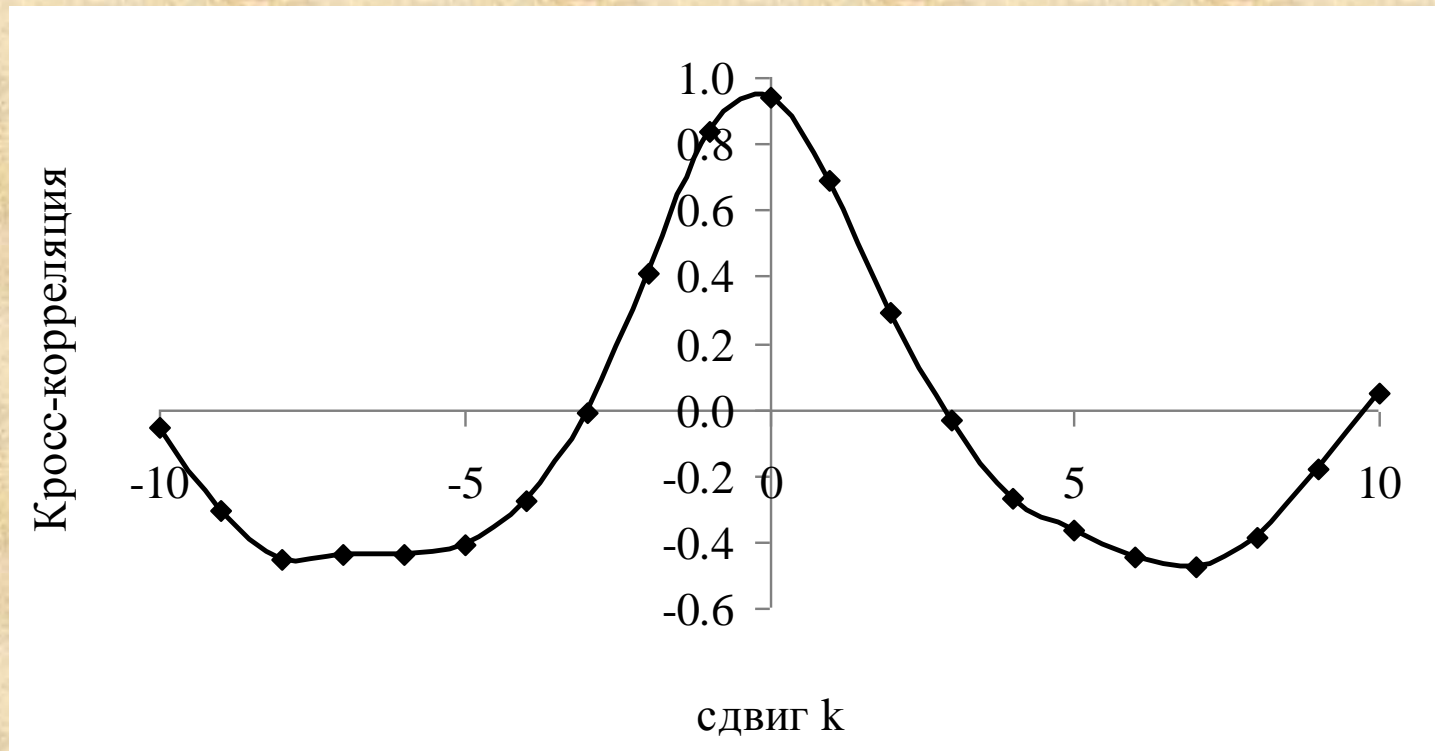
$$\chi = \frac{\partial(\ln X(i))}{\partial W(i-1)} = b(i-1) \quad \text{восприимчивость}$$

Динамика численности сибирского шелкопряда в бассейне Ангары

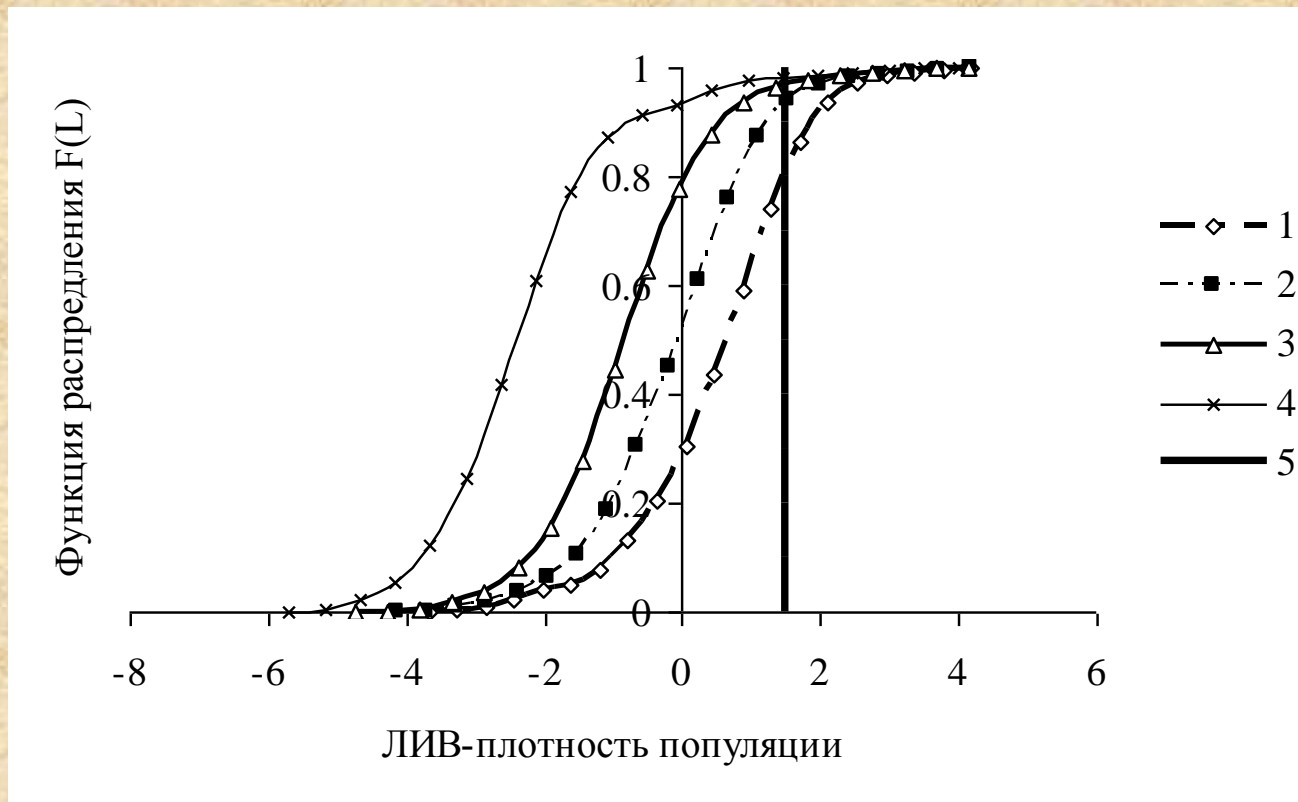


1 – учеты; 2 – AR(2), $R^2=0.83$; 3 – ADL(2,1), $R^2=0.90$

Кросс-корреляция рядов данных и модели ADL(2,1)

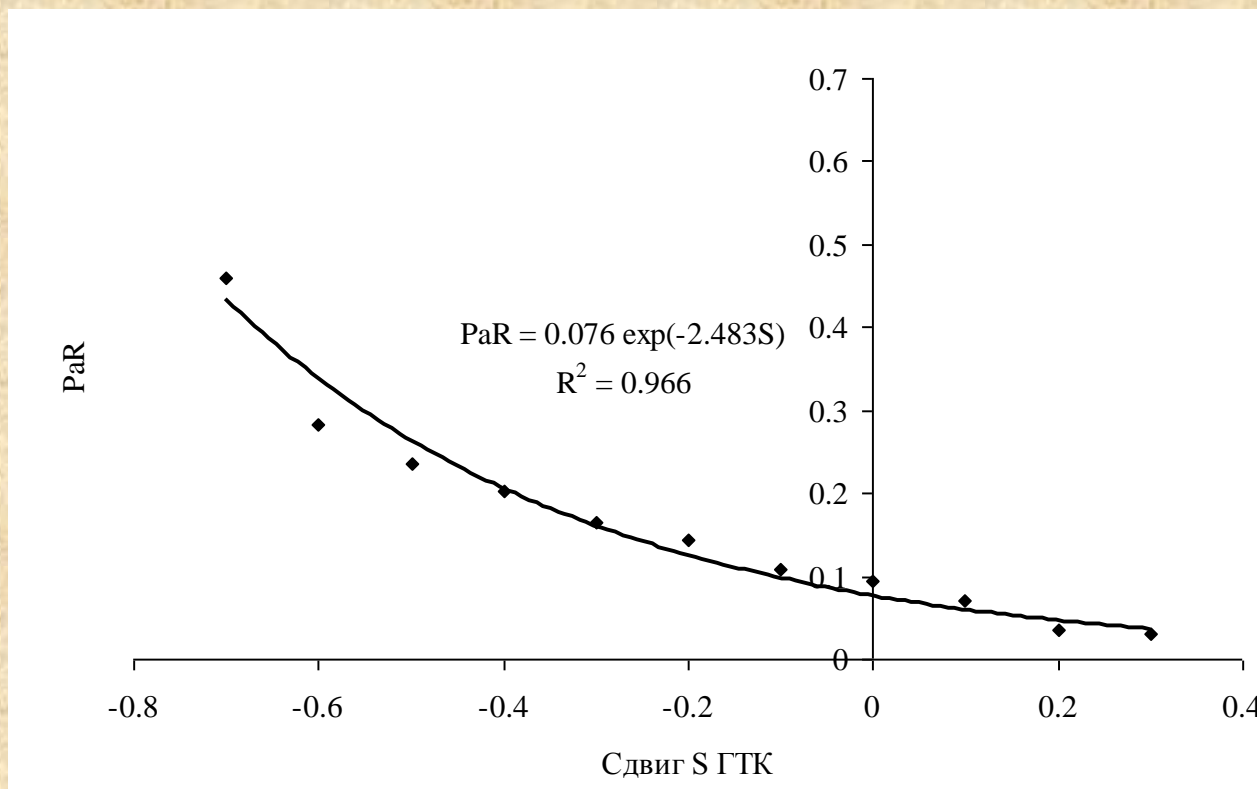


Функции распределения плотности модельных популяций сосновой пяденицы в урочище Дюна при различных значениях ГТК



1 – $(ГТК_0 - 0.7)$; 2 – $ГТК_0$, 3 – $(ГТК_0 + 1)$, 4 – $(ГТК_0 + 2)$; 5- критическая плотность $L_r = 1.5$.

Функция риска вспышки при разных значениях ГТК



Вероятность P вспышек сосновой пяденицы при разных климатических сценариях

Климатические сценарии		P
Сдвиг средней температуры, °C	Сдвиг по осадкам, %	Дюна
0	0	0.071
4	-10	0.074
4	10	0.073
4	0	0.059
0	-10	0.064
2	-10	0.089
4	10	0.084
5	-20	0.115

Дистанционные показатели для насаждений

В качестве дистанционных показателей, характеризующих насаждения, используются вегетационный индекс растительности (NDVI) в течение сезона и температура подстилающей поверхности LST.

Характерные размеры территории – 250х250 м.

Для отдельного года переменную LST можно рассматривать как входную в системе, а переменную NDVI – как выходную. Если предполагать, что выходной сигнал зависит от входного, то эту связь в течение года можно записать через интегральное уравнение:

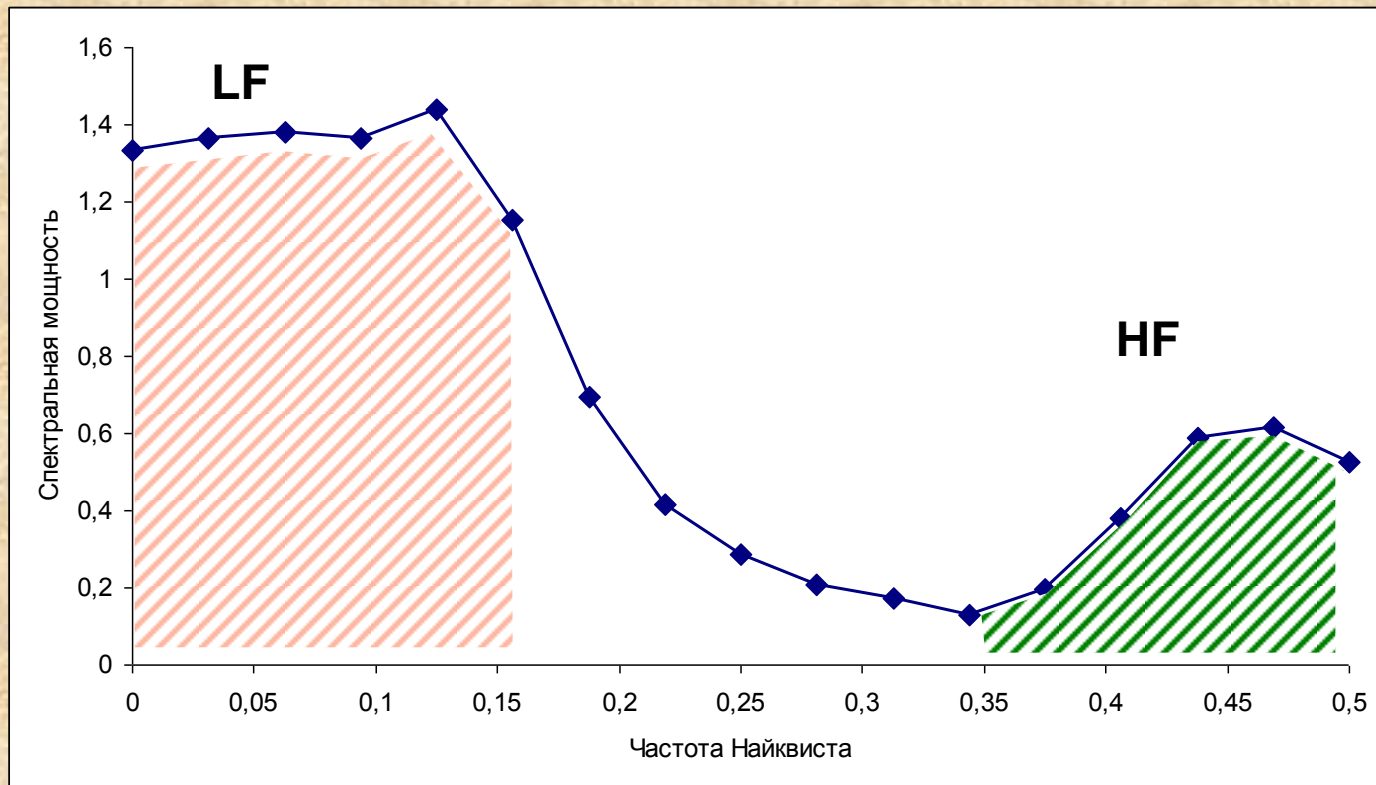
$$\Delta NDVI(t) = \int_0^t h(\tau) \Delta LST(t - \tau) d\tau$$

$h(\tau)$ – функция отклика (ядро интегрального уравнения, функция Грина)

$$\Phi_{yx} = \int_0^t h(\tau) \Phi_{xx} d\tau$$

$$H(f) = FT(h(\tau)) = \frac{FT(\Phi_{yx})}{FT(\Phi_{xx})}$$

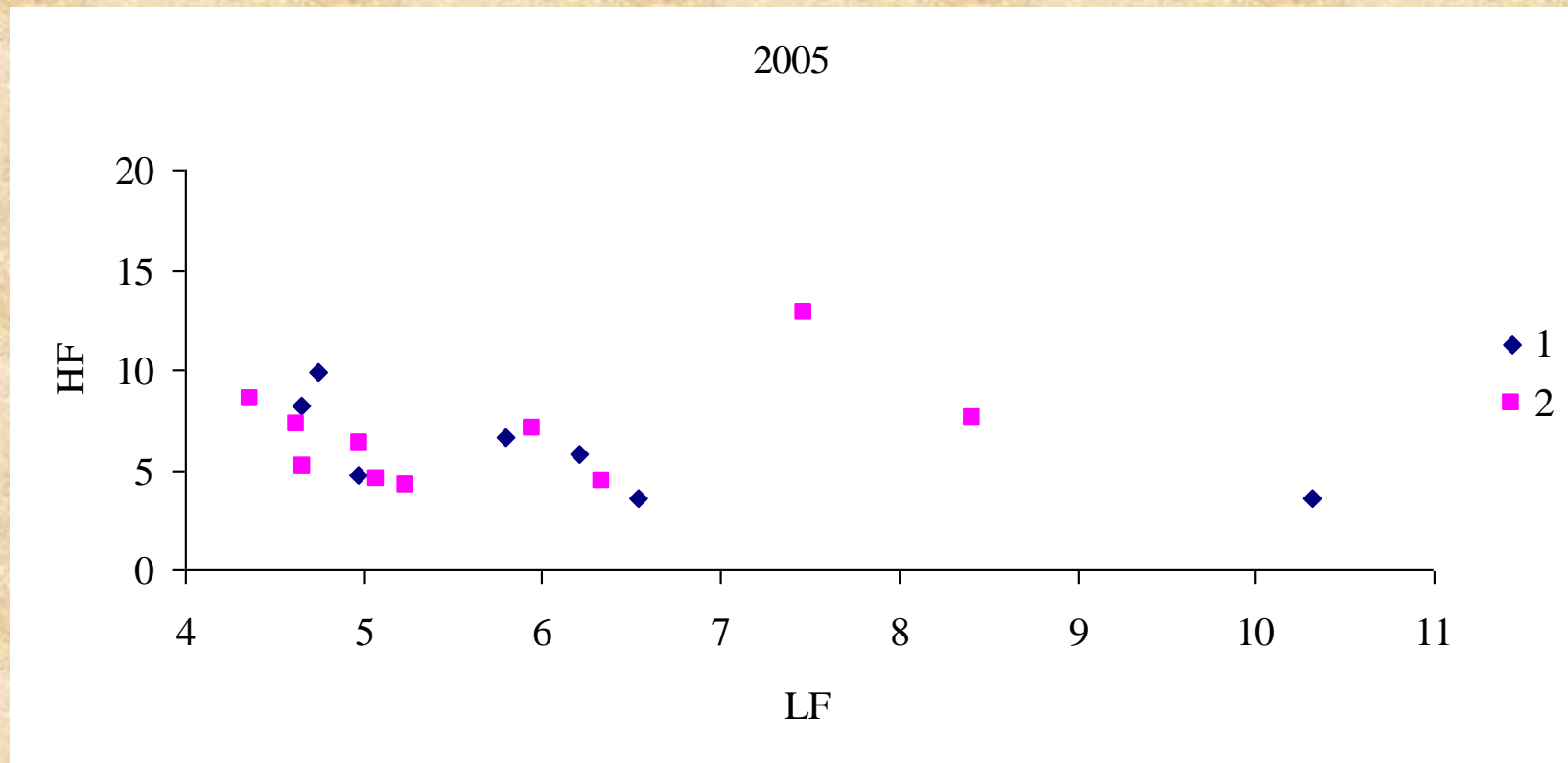
Спектр $H(f)$ функции отклика $h(\tau)$ изменений NDVI в ответ на изменения LST



$$S = \int_0^{0.5} H(f) df$$

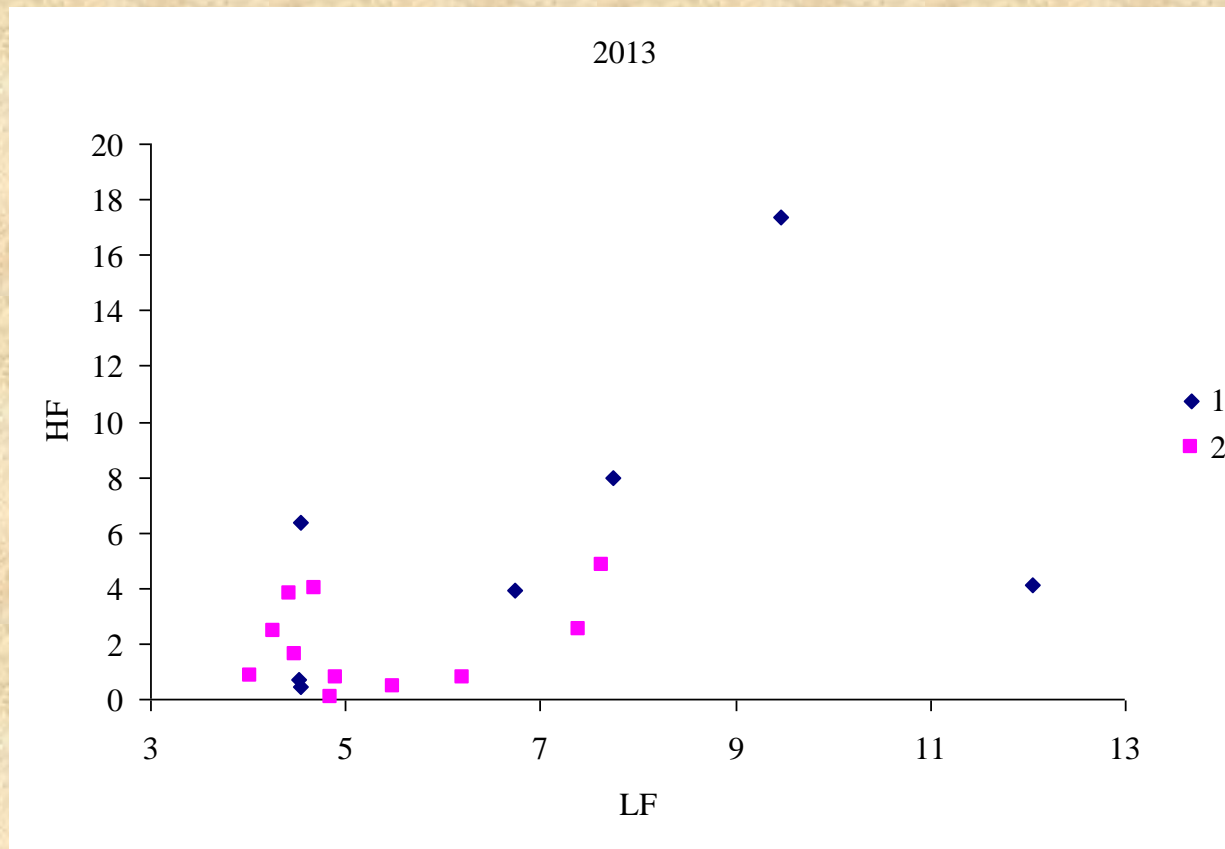
Мощность спектра функции отклика

Компоненты спектра $H(f)$ функции отклика $h(\tau)$ за 10 лет до начала вспышки



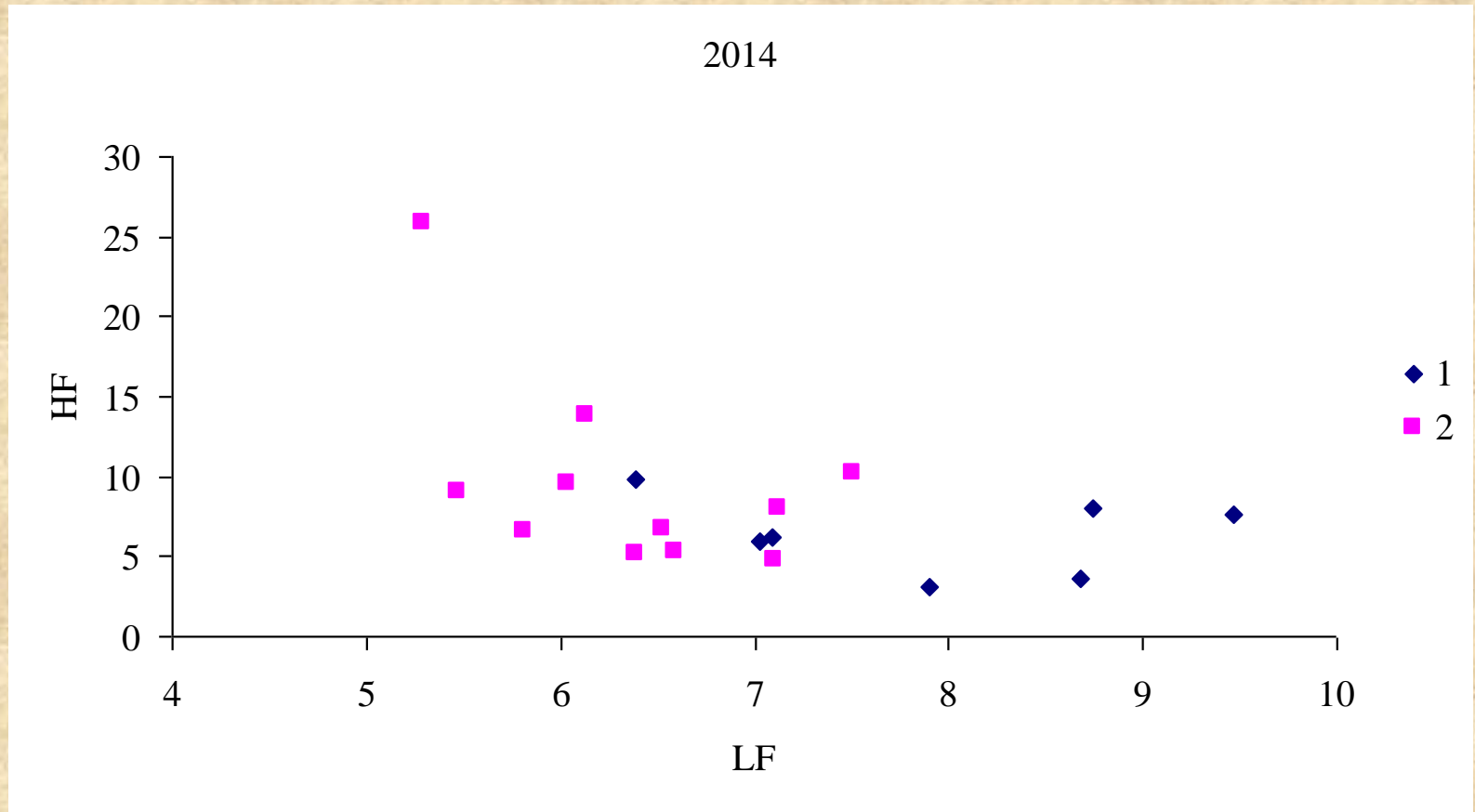
1 – контроль; 2 – будущие очаги

Компоненты спектра $H(f)$ функции отклика $h(\tau)$ за два года до начала вспышки



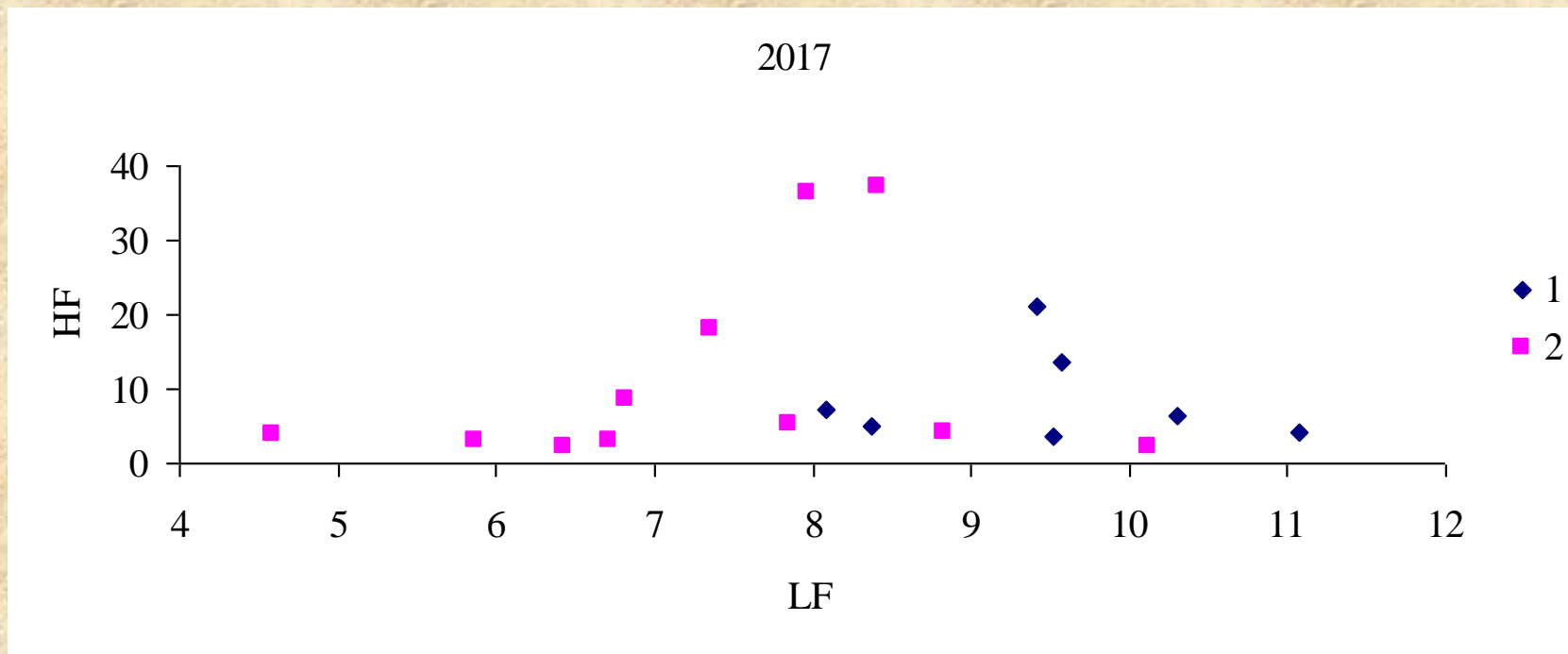
1 – контроль; 2 – будущие очаги

Компоненты спектра $H(f)$ функции отклика $h(\tau)$ за год до начала вспышки



1 – контроль; 2 – будущие очаги

Компоненты спектра $H(f)$ функции отклика $h(\tau)$ через два года после начала вспышки

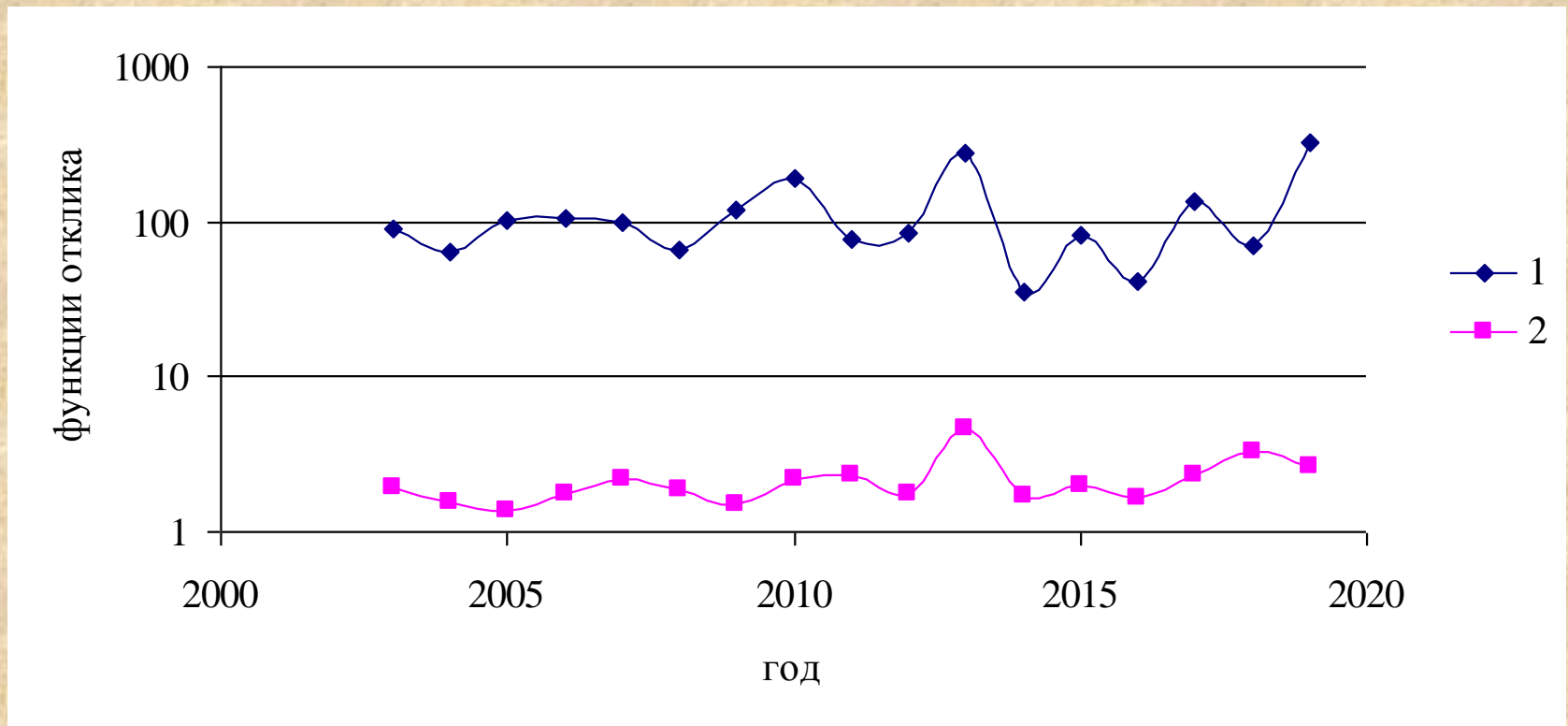


1 – контроль; 2 – текущие очаги

Функция отклика $g(\tau)$ «NDVI-LST»

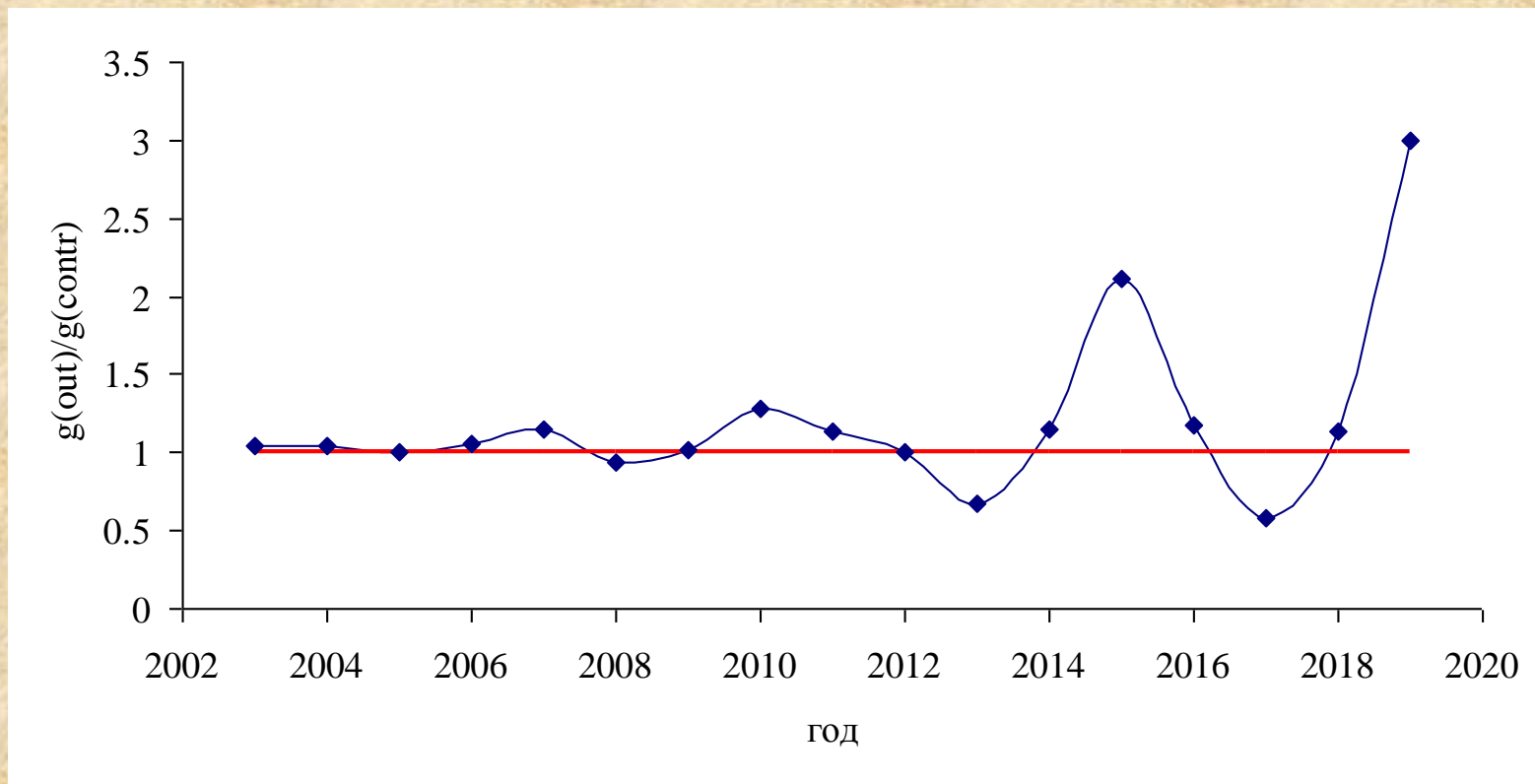
$$\Delta LST(t) = \int_0^t g(\tau) \Delta NDVI(t - \tau) d\tau$$

Сопоставление мощностей S спектров $H(f)$ и $G(f)$ функций отклика в контроле



1 – $S(H(f))$: LST/NDVI; 2 – $S(G(f))$: NDVI/LST

Изменение относительной мощности S спектра функции отклика $g(\tau)$ в очаге после начала вспышки сибирского шелкопряда



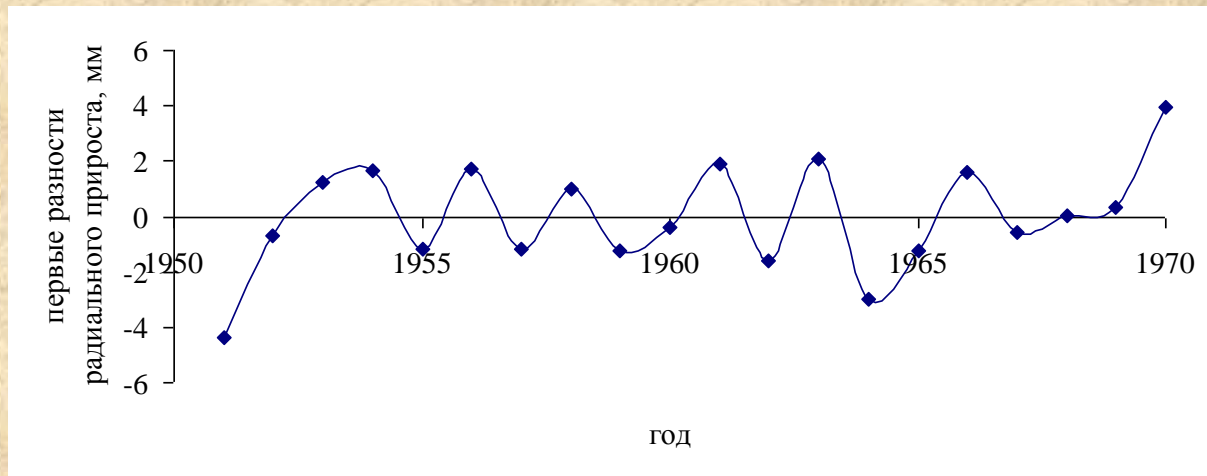
Оценки характеристик экосистемы после выбора территории для наземных исследований

1. Регуляторные характеристики радиального прироста перед вспышкой (флуктуационный спектр рядов первых разностей радиального прироста)
2. Состояние деревьев (диэлектрические характеристики, спектр отклика ИК-сигнала от ствола дерева)
3. Микропространственное распределение насекомых по учетным единицам
4. Состояния особей насекомых (флуктуационная диэлектрическая спектроскопия)

Для анализа были использованы следующие продукты системы Terra/Aqua:

- Продукты MOD11A1 и MYD11A1. Содержат информацию о температуре подстилающей поверхности LST. Данный показатель хорошо коррелирует с метеонаблюдениями о температуре воздуха. Наблюдения ежедневные. Пространственное разрешение 1x1км.
- Исходные спектральные каналы sur_refl_b01 (красный) и sur_refl_b02 (ближний инфракрасный) для расчета вегетативного индекса NDVI, содержащиеся в продуктах MOD09Q1 и MYD09Q1. Они представляют собой восьмидневный композит (очищенные и селектированные данные за период в восемь дней). Пространственное разрешение – 250x250 метров.

Флуктуационно-диссипационная теорема: связь между регуляцией роста деревьев и их устойчивостью к нападению вредителей



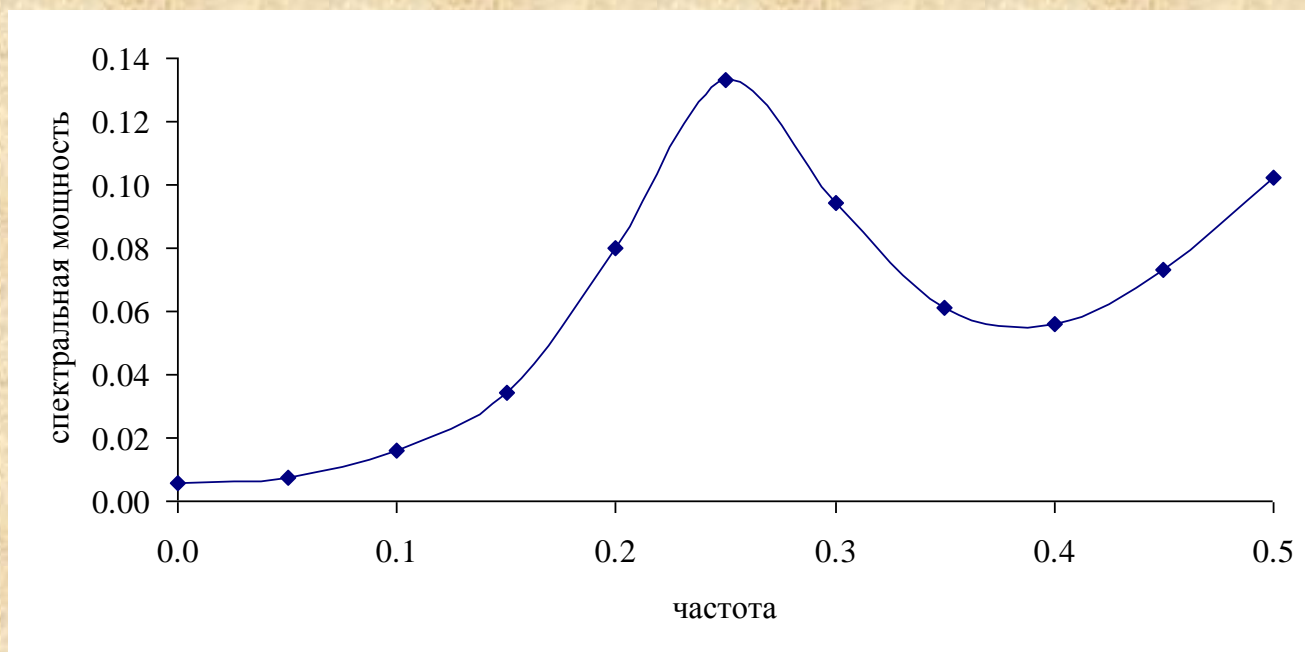
Ряд первых разностей радиального прироста до начала вспышки

Характерные размеры территория - десятки метров

Спектр временного ряда первой разности радиального прироста до нападения насекомых связан с откликом насаждений на нападения – изменением радиального прироста

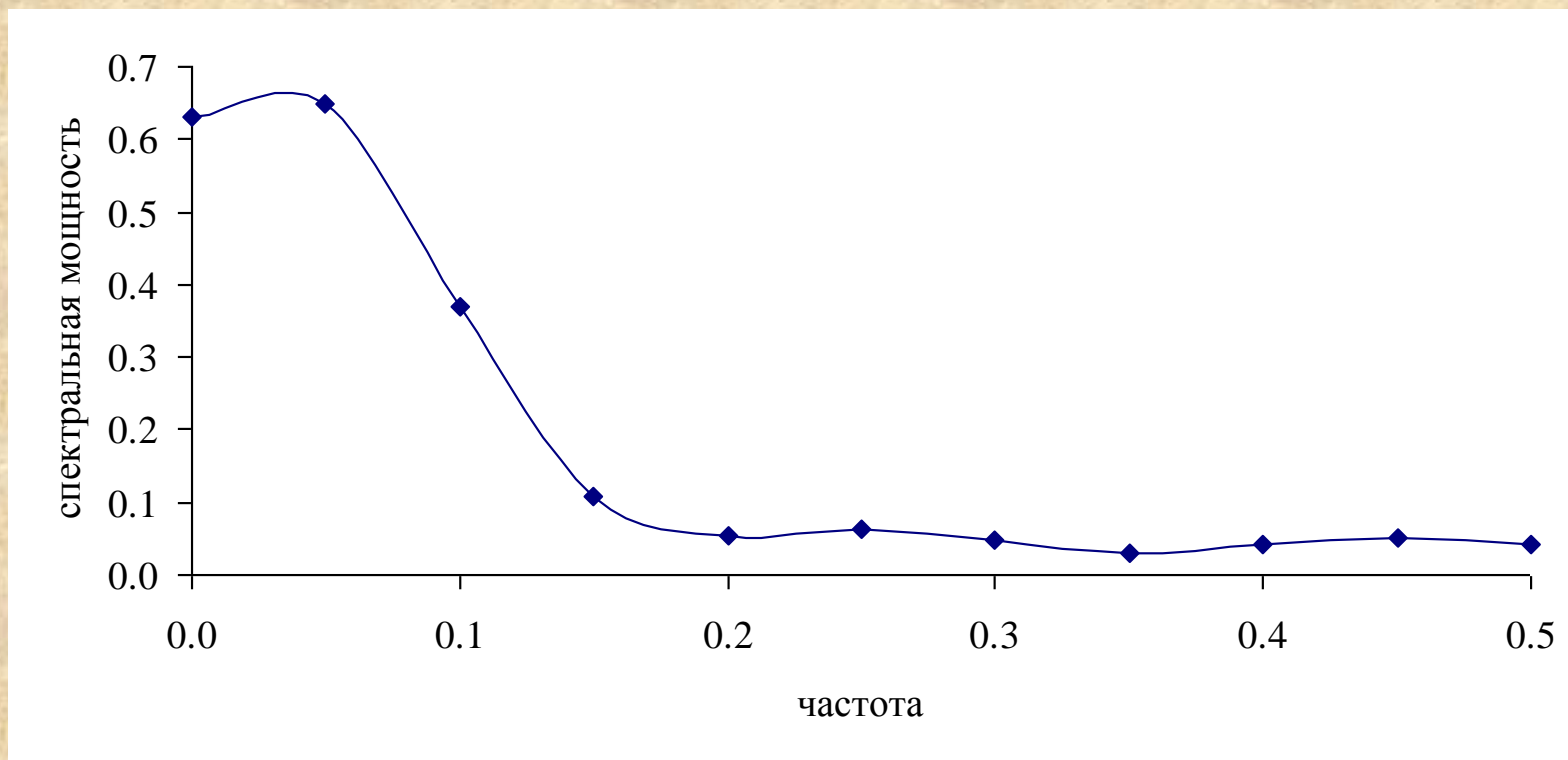
$$S(f) = 2hf \coth\left(\frac{hf}{2kT}\right) G'(w)$$

Спектр автокорреляционной функции ряда первых разностей радиального прироста в контроле



Мощность спектра $M = 0.66$

Спектр автокорреляционной функции ряда первых разностей радиального прироста в очаге



Мощность спектра $M = 2.09$

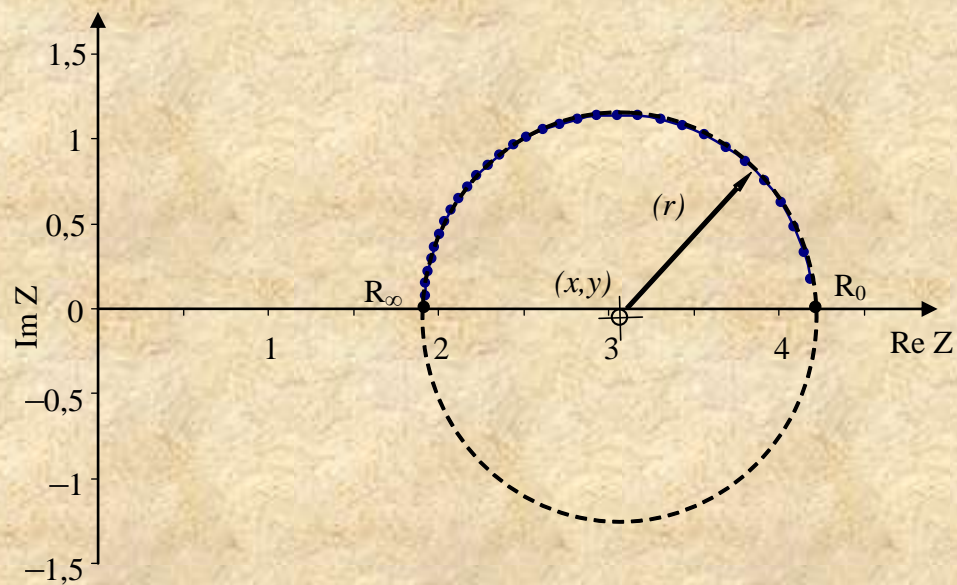
Состояние особей в популяции

Характеристики физиологического состояния гусениц лесных насекомых во многом определяют плодовитость особей, интенсивность повреждения насекомыми кормовых деревьев, возможности воздействия повреждающих факторов (химических соединений, бактерий, вирусов) в ходе мероприятий по контролю численности насекомых-вредителей.

Состояние гемолимфы

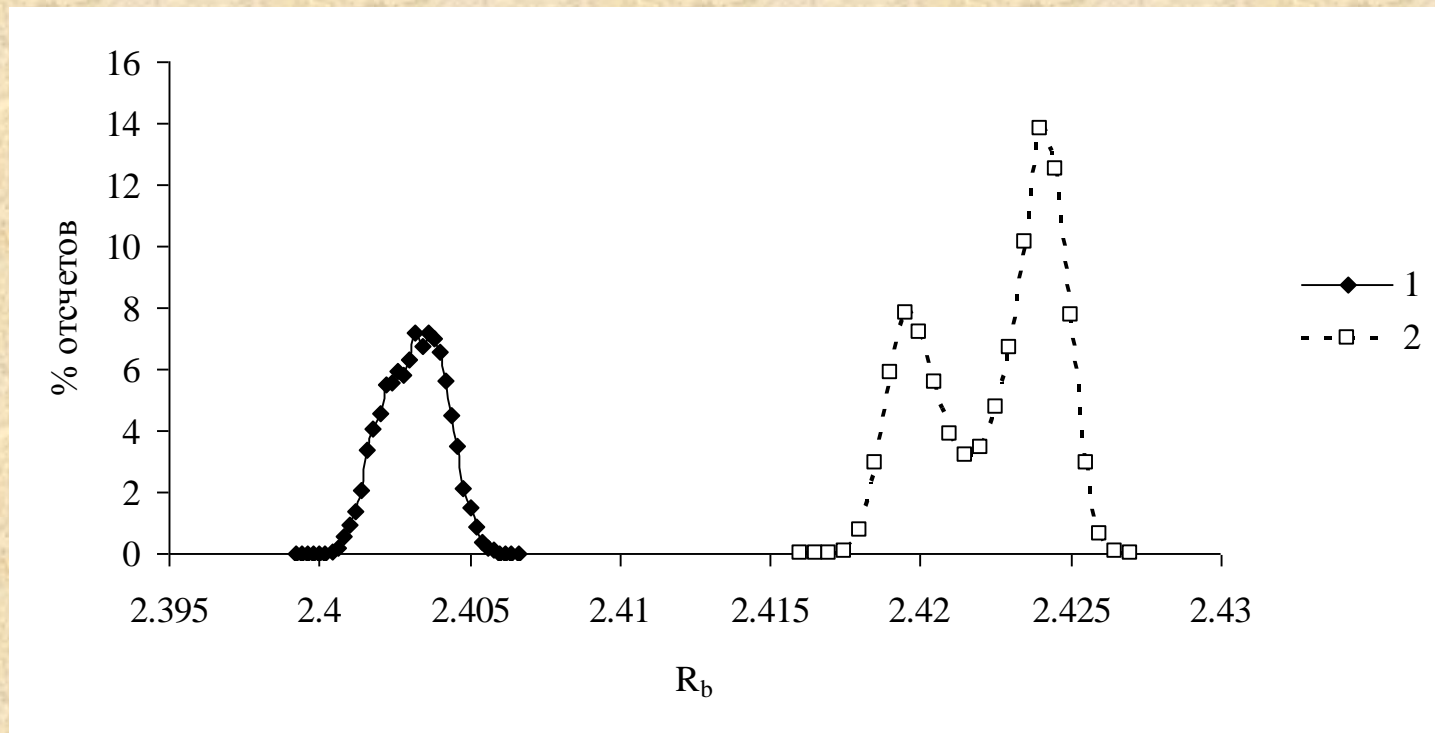
Достаточно давно для оценки состояния особей предлагалась использовать характеристики гемолимфы насекомых - тканевой жидкости в теле насекомых. Подобно крови у позвоночных животных, гемолимфа образована жидким межклеточным веществом (плазмой) и находящимися в ней клетками — гемоцитами. Суммарный объём гемоцитов, циркулирующих в теле насекомого, достигает 10% от общего объёма гемолимфы.

Для оценки состояния гемолимфы использовались методы диэлектрической спектроскопии. Диэлектрические параметры гемолимфы (сопротивление и емкость в широком диапазоне частот) позволяют характеризовать емкость мембран гемоцитов и проводимость тканей.

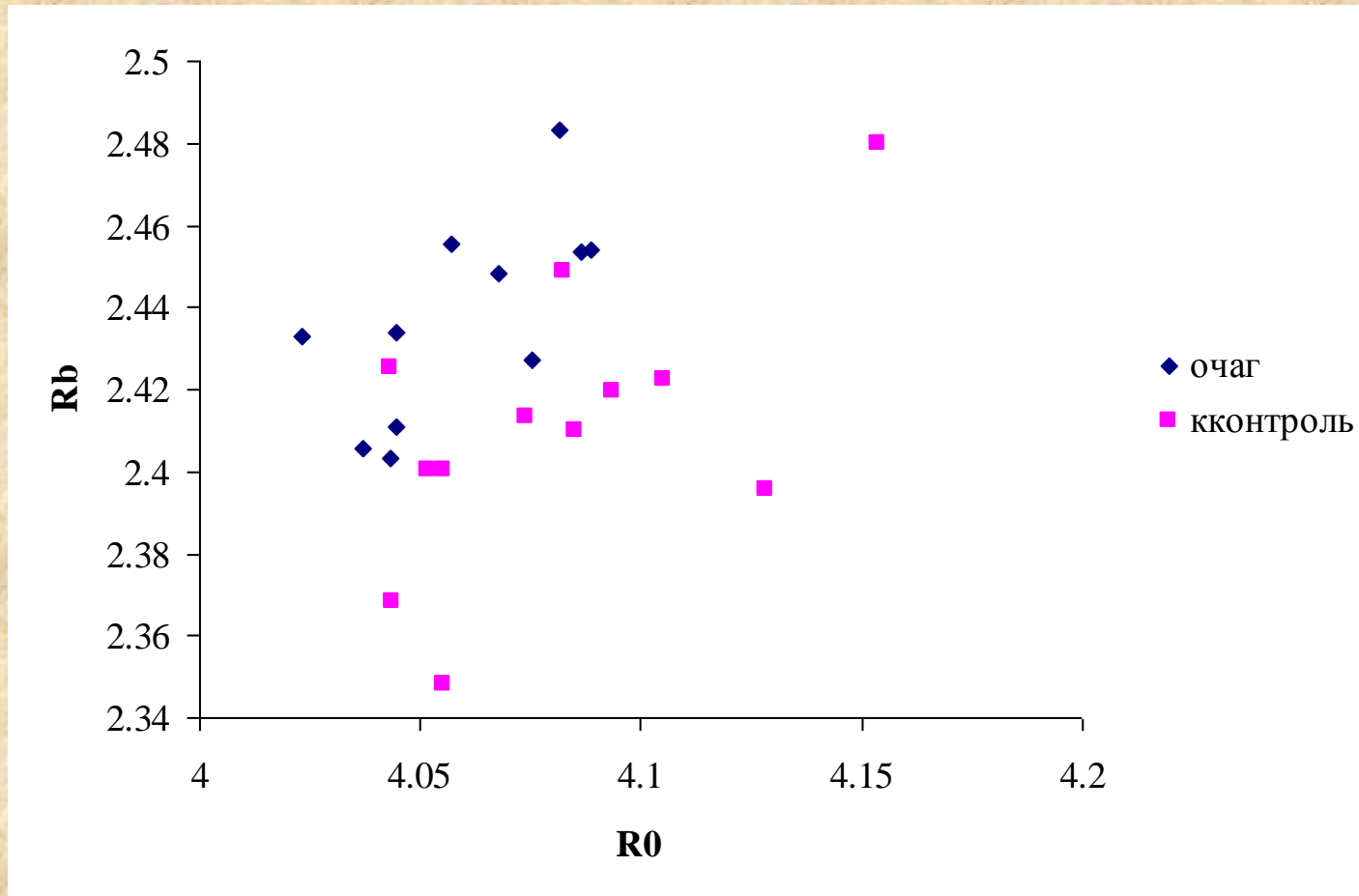


Образцы гемолимфы брались из тела гусениц с помощью капиллярной канюли. Диэлектрические характеристики (импеданс-годограф) образца гемолимфы объемом менее 0.001 см^3 измерялись в капиллярной кювете в режиме однократного измерения характеристик всего образца гемолимфы и в режиме последовательности 5000 измерений гемолимфы, движущейся в кювете под воздействием микронасоса. При первом режиме измерений рассматривались интегральные характеристики R_0 и R_b образца, при втором режиме измерений рассматривалась функция плотности распределения величин R_b .

Типичные функции плотности распределения характеристик R_b гемолимфы для особи в очаге массового размножения (1) и особи вне очага (2)



Диэлектрические характеристики гемолимфы гусениц в очаге непарного шелкопряда и в контрольном неповрежденном насаждении.



Классификационная матрица дискриминантного анализа по диэлектрическим характеристикам

	Percent	очаг	контроль
очаг	90.91	10	1
контроль	83.33	2	10
всего	86.96	12	11

заклучение

1. Построение «пирамиды» модифицирующих событий позволяет оценить необходимые и достаточные условия вспышки массового размножения лесных насекомых и выбрать территорию для наземных обследований
2. Характерные размеры территории, на которой происходят изменения погоды в Сибири – до 300 км.
3. Восприимчивость динамики численности популяций лесных насекомых к влиянию погоды – до 9-10% дисперсии численности.
4. Для оценки состояния насаждений возможно использовать данные дистанционного зондирования. Характерные размеры оцениваемой территории – 250x250 м.
5. После начала вспышки восприимчивость изменений погоды к динамике NDVI возрастает.
6. На основе характеристик пирамиды модифицирующих факторов возможно выбрать территории для наземных обследований.

Благодарю за внимание