

Всероссийский научно-исследовательский институт лесоводства и  
механизации лесного хозяйства  
ФБУ ВНИИЛМ

Н. И. Лямцев

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ МАССОВЫХ РАЗМНОЖЕНИЙ  
НЕПАРНОГО ШЕЛКОПРЯДА, УГРОЗЫ ПОВРЕЖДЕНИЯ  
ДУБРАВ И НЕОБХОДИМОСТИ  
ЗАЩИТНЫХ МЕРОПРИЯТИЙ

Пушкино – 2018

УДК 630.4  
ББК 44.9  
Л97

**Лямцев, Н. И.** Прогнозирование массовых размножений непарного шелкопряда, угрозы повреждения дубрав и необходимости защитных мероприятий / Н. И. Лямцев. – Пушкино : ВНИИЛМ, 2018. – 84 с.

ISBN 978–5–94219–232–7

Рекомендации разработаны в результате многолетних исследований популяционной экологии и закономерностей массовых размножений непарного шелкопряда *Lymantria dispar* L. (Lepidoptera, Erebidae, Lymantriinae) – наиболее опасного вредителя дубовых лесов. Рекомендации уточнены и дополнены в рамках выполнения научно-исследовательских работ по теме № 9 «Прогнозирование массовых размножений непарного шелкопряда, угрозы повреждения дубрав и необходимости защитных мероприятий» Государственного задания ФБУ ВНИИЛМ на осуществление научно-исследовательских, опытно-конструкторских и технологических работ в 2013-2015 гг., утвержденного приказом Федерального агентства лесного хозяйства от 27.12.2012 № 562. Автором широко использованы собственные экспериментальные и литературные данные, материалы государственного лесопатологического мониторинга, архивные данные учета очагов непарного шелкопряда.

Рекомендации предназначены для специалистов по защите лесов от вредных организмов, научных работников, преподавателей и студентов вузов, других учебных заведений биологического профиля, экологов.

Рассмотрено и рекомендовано к изданию Научно-методической секцией по вопросам лесоводства и биологии Ученого совета ФБУ ВНИИЛМ, протокол № 8 от 25.10.2017 г.

ISBN 978–5–94219–232–7

© ВНИИЛМ, 2018

## Содержание

Введение.....	4
1. Информационная база прогнозирования .....	5
1.1. Методология и показатели прогноза.....	5
1.2. Особенности биологии непарного шелкопряда .....	8
2. Прогноз массовых размножений .....	12
2.1. Многолетняя динамика площадей очагов .....	13
2.2. Прогноз фаз массового размножения.....	16
2.3. Качественные и количественные показатели фаз.....	18
2.4. Фазовые портреты массовых размножений .....	21
2.4.1. Пороговые критерии угрозы массовых размножений.....	24
2.4.2. Прогноз интенсивности массовых размножений.....	26
2.5. Прогноз начала вспышек размножения. Экспертная оценка .....	30
2.6. Гидрометеорологические показатели прогноза .....	32
2.7. Прогноз эффективности энтомофагов и патогенов .....	37
2.8. Классификация насаждений по степени риска возникновения очагов .....	39
3. Оценка угрозы массового размножения по данным инвентаризации очагов.....	40
3.1. Встречаемость и распространение очагов .....	41
3.2. Долгосрочный прогноз угрозы образования очагов. Лесопатологическое районирование .....	43
3.3. Краткосрочный прогноз угрозы образования очагов .....	47
4. Методы анализа временных рядов .....	51
4.1. Долгосрочный и краткосрочный прогноз площадей очагов. Верификация моделей.....	55
4.2. Множественная регрессионная модель динамики очагов .....	61
4.3. Авторегрессионная модель динамики численности .....	63
5. Краткосрочный прогноз дефолиации деревьев.....	65
5.1. Оценка дефолиации с использованием критических чисел.....	66
5.2. Метод кормовых норм .....	67
6. Прогноз необходимости защитных мероприятий.....	70
6.1. Прогнозирование потерь прироста деревьев.....	71
6.2. Прогнозирование усыхания дубрав в очагах .....	72
6.3. Пороги вредоносности.....	73
6.4. Прогноз сроков защитных обработок .....	77
Заключение .....	79
Приложение 1 .....	83
Распространение и встречаемость очагов непарного шелкопряда по регионам Европейской России.....	83
Приложение 2 .....	84
Распространение и встречаемость очагов непарного шелкопряда по регионам в азиатской части России .....	84

## Введение

В области защиты лесов целесообразно прогнозировать возникновение и распространение очагов вредных организмов, угрозу повреждения лесов и необходимость защитных мероприятий. Непарный шелкопряд относится к группе насекомых, которые периодически образуют вспышки массового размножения на большой территории. Это обусловлено высокой плодовитостью, способностью питаться на многих видах древесных растений, повышенной миграционной активностью, недостаточной эффективностью природных механизмов регуляции. Для снижения ущерба от непарного шелкопряда необходимо разрабатывать прогнозы разного назначения. Прогноз – это искусство предвидеть проблемы до того, как они возникнут, и предсказывать вероятный ход и степень опасности конкретных проблем после того, как они определены [1, 2].

Прогнозирование невозможно без информационной базы – многолетних архивных и оперативных данных лесопатологического мониторинга и обследований. Из этих данных наибольший интерес представляют результаты инвентаризации очагов вредных организмов по всем регионам России. Наиболее оптимальным подходом является автоматизированная разработка прогнозов с применением простых статистических моделей на основе анализа временных рядов площадей очагов. Площади очагов характеризуют изменение популяций насекомых не только в пространстве, но и во времени и позволяют оценить периодичность возникновения и интенсивность их массовых размножений.

Для детализации прогнозов и обоснования защитных мероприятий используется комплекс эколого-популяционных показателей. Предлагаемая система прогнозирования основана на адаптивном подходе, который позволяет совершенствовать (уточнять) модели с учетом результатов лесопатологического мониторинга, что существенно повышает эффективность прогнозирования.

# 1. Информационная база прогнозирования

Система прогнозирования в области защиты лесов должна обеспечивать заблаговременную оценку угрозы образования очагов вредных организмов, повреждения насаждений и обоснование необходимости проведения защитных мероприятий. Для этого требуется правильная диагностика причин повреждения лесов, своевременный сбор, накопление и анализ данных лесопатологического мониторинга, включая площади очагов по регионам и лесничествам, показатели санитарного состояния насаждений, оценки численности и состояния (жизнеспособности) популяции вредного насекомого, климатических и погодных условий.

## 1.1. Методология и показатели прогноза

Разработку методов, алгоритмов и прогнозных моделей необходимо начинать с обобщения имеющейся информации и детального словесного описания лесопатологических процессов (пространственно-временных особенностей изменения численности непарного шелкопряда, дефолиации насаждений и других). В результате выявляются закономерности, с помощью которых выбирают адекватные способы моделирования и строят уравнения, позволяющие оценивать будущие значения показателей с определенной точностью и достоверностью по набору факторов, измеренных в предшествующие моменты времени. Проверку и усовершенствование моделей невозможно осуществить без сбора новых данных. Построение модели должно иметь итеративный характер, когда каждый вариант проверяется с помощью дополнительных наблюдений.

Повысить точность и достоверность прогнозов можно на основе более полного использования лесопатологической информации, автоматизированной обработки данных, прогнозных моделей и компьютерных программ [3, 12]. Для составления прогнозов необходимо иметь достаточно длинные временные ряды, характеризующие несколько (3 и более)

последовательных вспышек массового размножения в одной и той же местности (рис. 1).



Рис. 1. Динамика площади очагов непарного шелкопряда в Саратовской обл. и плотности популяции в Базарно-Карабулакском лесничестве

Представленные на рис. 1 оценки плотности популяции являются оригинальными данными. Они получены на стационарных участках в Саратовской обл. на разных фазах пяти последовательных массовых размножений непарного шелкопряда [13]. Для оценки эколого-популяционных показателей непарного шелкопряда в других регионах России использовали литературные данные [20-22]. Площади очагов по регионам взяты из архивов Рослесхоза, форм федерального государственного статистического наблюдения (№ 12-ЛХ), формы отчётности органов исполнительной власти субъектов Российской Федерации, уполномоченных в области лесных отношений (№ 10-ОИП), Обзоров санитарного и лесопатологического состояния лесов Российской Федерации [18, 19].

Наиболее информативными для прогноза являются данные о плотности популяции, прежде всего прямые, а затем и косвенные, учеты численности насекомого [13, 23]. Косвенные оценки получают с помощью

феромонных и других ловушек, а также по уровню дефолиации деревьев. Менее точной характеристикой динамики численности насекомого является площадь очагов (рис. 1), однако ее преимущество состоит в том, что изменение популяции оценивается и во времени, и в пространстве.

Данных о многолетних стационарных оценках численности непарного шелкопряда крайне мало. Поэтому необходимо максимально полно использовать материалы обследований очагов насекомого – архивные и полученные при государственном лесопатологическом мониторинге. Важной задачей является повышение точности оценки площадей очагов. О достоверности оценок свидетельствует сопряженность (корреляция) многолетней динамики площадей очагов и плотности популяции насекомого (см. рис. 1). В этом случае изменение площадей очагов адекватно характеризует развитие массового размножения насекомого и имеет большую прогностическую ценность.

К важным показателям угрозы образования очагов относятся оценки состояния и жизнеспособности насаждений. Как правило, в ослабленных насаждениях эффективность защитных систем деревьев снижается и угроза массового размножения насекомых становится максимальной. Основными факторами ухудшения фитосанитарного состояния дубрав являются неблагоприятные условия роста, многократное порослевое возобновление, повреждение листогрызущими насекомыми, болезнями, засухи и поздние весенние заморозки. Анализ радиального прироста дуба, как интегрального показателя состояния деревьев, показал, что массовые размножения насекомых начинаются после достаточно сильного падения прироста, свидетельствующего о снижении устойчивости насаждений.

Полученные данные хранят в виде электронных таблиц в формате Microsoft Excel (XLS). Программный пакет Microsoft Excel позволяет решать различные задачи – от составления простых статистических сводок, комплексных калькуляций, технических расчетов до научных выкладок. В Microsoft Excel существует множество вспомогательных функций: математические, статистические, логические и др. Excel имеет широкие воз-

можности для оформления отчетов и представления данных (диаграммы, графики, включая трехмерные, и т.д.).

Одной из основных функций, заложенных в программу Excel, является создание и обработка баз или банков данных. Все ячейки электронной таблицы легко переводятся в формат базы данных. После этого с электронными таблицами возможны любые операции: сортировка, выборка по критериям и т.д. Представление данных в виде таблиц, графиков, диаграмм является необходимым этапом анализа информации. Для дальнейшей визуализации данных и их привязки к цифровым картам административного деления можно использовать файлы электронной таблицы после их соответствующего преобразования.

Дополнительно используем компьютерную программу анализа временных рядов (см. главу 4). Программа позволяет накапливать информацию, проводить ее корректировку и анализ, создавать прогнозные модели, быстро уточнять их структуру и параметры, проводить постоянную адаптацию моделей при изменении условий.

## **1.2. Особенности биологии непарного шелкопряда**

Разработка структуры прогнозирующих моделей, оценка и корректировка их параметров невозможны без знания закономерностей массовых размножений насекомого и длительных наблюдений по определенной методике. Учитывая обширнейший ареал непарного шелкопряда, эта задача является весьма не простой. Он распространен в европейской части России до северной границы произрастания дуба, в Крыму и на Кавказе, в зонах мягколиственных лесов и лесостепи Сибири, на Алтае и в Саянах, Приамурье, на Сахалине и в Приморье [15].

Для составления прогнозов большое значение имеют качественные и количественные показатели популяции непарного шелкопряда. Они существенно повышают точность прогнозов, если оцениваются ежегодно на стационарных участках и детально установлены особенности поведения и экологии вредителя. Учеты численности и состояния популяции непар-

ного шелкопряда осуществляют выборочным методом в определенный период жизненного цикла насекомого [4-6, 16, 21]. Схема и усредненная продолжительность стадий развития непарного шелкопряда приведены в табл. 1.

Таблица 1. Схема развития непарного шелкопряда

Год разви- тия	Стадии развития по месяцам и декадам															сен- тябрь- март	
	апрель			май			июнь			июль			август				
	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3	1	2	3		
Первый										В	В	В	В	В			
										Я	Я	Я	Я	Я	Я	Я	
Второй	Я	Я	Я	Я													
		Г	Г	Г	Г	Г	Г	Г	Г								
										К	К	К	К				

Примечание. В – бабочки, Я – кладки яиц, Г – гусеницы, К – куколки

Схему необходимо уточнить на основе фенологических наблюдений, определяя наиболее ранние и поздние сроки стадий развития при экстремальной погоде для конкретной территории (региона).

За год развивается одна генерация непарного шелкопряда. Гусеницы, дающие самцов, имеют пять возрастов, дающие самок – шесть возрастов. Требуемая для их развития сумма эффективных (превышающих 6°C) среднесуточных температур составляет около 650° и 740° соответственно. Продолжительность куколочной стадии – 10-15 сут. При пороге развития 9°C сумма эффективных среднесуточных температур для самцов должна быть 170°, самок – 140°. Вылет самцов происходит на 5-7 сут раньше самок. Количество откладываемых яиц варьирует от 10 до 1 500. Осеннее развитие яиц протекает при температуре 7°C и более и требует до начала диапаузы суммы эффективных температур 300°C [16].

Учет зимующих кладок яиц позволяет заблаговременно определить количество жизнеспособных яиц в среднем на одно дерево и дать прогноз угрозы его повреждения (степени дефолиации). Для этого необходимо отделять свежеотложенные (текущей генерации) кладки – выпуклые

и на ощупь упругие, без дырочек на поверхности, остающихся после выхода гусениц. Далее подсчитывается среднее число яиц в кладке (плодовитость насекомого), процент здоровых и нежизнеспособных (паразитированных, неоплодотворенных, уничтоженных хищниками) яиц.

Следует отметить, что учет кладок наиболее эффективен только для европейской расы непарного шелкопряда, когда яйца размещаются у основания стволов деревьев, а самки практически не летают. При нахождении кладок в кронах деревьев, трещинах и расселинах скал, на стенах домов, столбах и в других укрытиях (азиатская раса непарного шелкопряда) их учет и оценка угрозы повреждения насаждений становится сложной и трудоемкой задачей [21]. Необходимо дополнительно проводить феромонный мониторинг и учет гусениц старшего возраста и куколок. Следует помнить, что в лесном насаждении самки непарного шелкопряда откладывают яйца не только на предпочтительные кормовые породы, а для гусениц 1-го возраста характерно расселение ветром.

Существует также возможность образования крупных миграционных очагов в результате переноса ветром бабочек. Это редкое явление для Европейской России описано А. И. Воронцовым [2]. В Московскую обл. бабочки самки непарного шелкопряда были занесены фронтом циклона в июне-июле 1957 г. Бабочки, отродившиеся в зоне антициклона (юг и юго-восток Восточно-Европейской равнины, смещались с попутными восточными ветрами в зону циклона (центральные области Русской равнины), где оседали на сравнительно небольшой территории. Таким образом, волна массового размножения, охватившего в 1949-1953 гг. южные и юго-восточные районы, достигла в 1957-1959 гг. северной границы распространения непарного шелкопряда.

Учеты гусениц старшего возраста и куколок непарного шелкопряда позволяют получить дополнительные показатели: массу куколки (плодовитость будущих бабочек), зараженность энтомофагами и болезнями, соотношение полов и морфотипов особей в популяции [13, 16, 21].

Непарный шелкопряд является сухолюбивым и теплолюбивым насекомым. В Европейской России ареал непарного шелкопряда ограничен июльскими изотермами 15 и 27°С и январскими изотермами -18 и -12°С. Его первичные очаги возникают в более старых изреженных насаждениях, рединах, полезащитных полосах и по южным опушкам более полнотных древостоев, в непосредственной близости с поселками. В результате антропогенного воздействия эти насаждения характеризуются изреженностью первого яруса, отсутствием второго яруса и почвозащитного подлеска. Они произрастают преимущественно на склонах южной экспозиции в неблагоприятных почвенно-гидрологических условиях и имеют максимальную степень ослабления.

Обширный ареал непарного шелкопряда охватывает несколько лесорастительных зон. В зависимости от экологической специфики регионов многолетняя динамика численности насекомого имеет характерные особенности. Популяции непарного шелкопряда могут иметь стабильный, продромальный или эруптивный тип динамики [14]. Стабильная разреженная популяция характеризуется небольшими колебаниями численности, так как среда обитания недостаточно оптимальна. При улучшении условий развития наблюдается более значительный (в 100 раз) диапазон изменения численности насекомого и преобладают массовые размножения продромального типа. При этом нет выраженной эруптивной фазы (взрывного роста плотности популяции до предельно высокого уровня, сильного повреждения насаждений и распространения очагов). Эруптивный тип свойственен популяциям, обитающим в наиболее благоприятных условиях и дающим вспышки массового размножения на большой территории, с диапазоном предельно высокого и минимального уровня численности порядка 1 000 раз и более.

Баланс популяции обусловлен изменением смертности (выживаemости), рождаемости и миграциями. Факторы, определяющие баланс, разделяются на регулирующие и модифицирующие, соответственно зависящие или не зависящие от плотности популяции. Первые обеспечива-

вают существование лесных биоценозов как саморегулирующих систем, что позволяет прогнозировать эти процессы. Действие модифицирующих факторов (прежде всего погоды) является случайным, и прогнозировать можно не наступление события, а его последствия.

Возникновение вспышек массового размножения непарного шелкопряда связано с засушливой погодой, которая оказывает прямое и косвенное влияние на популяцию, приводит к росту выживаемости и плодовитости насекомого, снижению эффективности естественных врагов и устойчивости насаждений. В дальнейшем массовое размножение закономерно развивается во времени и пространстве. Оно завершается в результате действия регулирующих механизмов, которые возвращают популяцию к стабильному состоянию.

Сильное воздействие благоприятных модифицирующих факторов приводит к развитию эруптивных вспышек и образованию очагов на больших территориях, так как улучшаются условия существования насекомого и увеличивается площадь оптимальных для развития местообитаний. При менее благоприятных погодных условиях или ухудшении кормовой базы нарастание вспышки происходит менее интенсивно или прекращается на продромальной фазе, и формируются локальные очаги.

## **2. Прогноз массовых размножений**

Прогнозирование популяционных циклов (колебаний численности) базируется на пространственно-временных закономерностях массовых размножений, их периодичности (частоте), интенсивности (максимальной плотности популяции, площади очагов), продолжительности отдельных фаз. Эти параметры существенно меняются в пределах ареала непарного шелкопряда в зависимости от географического положения лесных участков. Наиболее точно их можно установить на основе данных динамики численности насекомого, но таких данных мало. Поэтому для составления прогнозов по регионам России предлагается несколько способов и приемов использования площадей очагов массового размножения непарного шелкопряда.

## 2.1. Многолетняя динамика площадей очагов

Во многих регионах России учет очагов насекомых - вредителей леса осуществляется с 1955 г. Ретроспективный анализ данных площадей очагов массового размножения позволяет судить о периодичности возникновения вспышек, их интенсивности и индивидуальных особенностях в разных регионах [9, 13]. При этом необходимо учитывать основной недостаток этих данных, обусловленный неточностью оценки площадей очагов и запаздыванием их выявления.

Рассмотрим алгоритмы прогнозирования массовых размножений на примере анализа многолетней динамики площадей очагов Саратовской обл. в 1977-2016 гг. (табл. 2).

Сначала необходимо оценить возможность использования данных табл. 2 для долгосрочного и среднесрочного прогнозирования. Наличие межвспышечных периодов (годы без очагов) позволяет отделить одно массовое размножение от другого. Это – наиболее трудная задача. Часто она решается только для площадей очагов в более мелких территориальных единицах – лесничествах, в которых межвспышечные периоды намного длиннее.

Таблица 2. Площадь очагов непарного шелкопряда в Саратовской обл., га

Год	Площадь	Год	Площадь	Год	Площадь	Год	Площадь
1977	17 929	1987	17 660	1997	45 413	2007	23 787
1978	23 776	1988	21 030	1998	4 538	2008	871
1979	5 180	1989	31 185	1999	76	2009	423
1980	0	1990	23 613	2000	0	2010	423
1981	226	1991	4 442	2001	73	2011	0
1982	618	1992	3 922	2002	0	2012	0
1983	5 932	1993	0	2003	0	2013	510
1984	418	1994	89 511	2004	1 130	2014	21 745
1985	2 475	1995	119 244	2005	8 351	2015	22 428
1986	9 206	1996	119 244	2006	7 397	2016	1 074

Продолжительность периода очагов массового размножения изменяется от 7 до 12 лет – средняя 10 лет (4 четко различающихся периода с очагами за 40 лет – 1981-1992, 1994-2001, 2004-2010, 2013-2017 гг.) (см.

табл. 2). Наиболее интенсивная вспышка массового размножения зафиксирована в 1994-2001 гг. (максимальная площадь очагов – 119 244 га). Продолжительность отдельных фаз массового размножения составляет в среднем 2 года.

Прогноз массовых размножений базируется на предположении стационарности процесса многолетней динамики численности насекомого [23]. При этом прогноз составляется по одной реализации процесса (конкретному массовому размножению), считая, что будущая вспышка не будет значительно отличаться от текущей. Прогноз оправдывается, если не происходит существенных изменений среды и площадь очагов или средняя характерная плотность популяции в конкретном местообитании относительно постоянна.

Частота вспышек и их интенсивность по России значительно варьируются [13-16]. В зоне постоянных массовых размножений (лесостепная и степная зоны) общая продолжительность вспышки в одном и том же насаждении составляет 7-8 лет при 2-3-летней длительности межвспышечного периода. Часто происходят затяжные массовые размножения. Наибольшей изменчивостью характеризуется межвспышечный период.

Прогнозирование начинается с графического анализа данных. Графики позволяют выявить особенности изменения очагов во времени и пространстве и провести их сравнительный анализ. На основе данных лесопатологического мониторинга составляем диаграммы для наглядного представления изменений площадей очагов во времени (рис. 2).

На рис. 2 изображены временные ряды площадей очагов в Тульской, Рязанской, а также в Саратовской (по данным табл. 2) областях. Так, в Тульской обл. за 60 лет массовое размножение было зафиксировано только в 1955-1964 гг., площадь очагов в 1957-1958 гг. составляла 70 500 и 150 926 га. Распространению очагов, вероятно, способствовал перенос самок непарного шелкопряда фронтом циклона в июне-июле 1957 г. В последующие годы очаги непарного шелкопряда не регистрировались (хотя локальные, возможно, и были). Поэтому прогно-

зировать можно только появление локальных очагов после засух, а вспышки массового размножения на большой территории наиболее вероятны один раз в 60-70 лет. В настоящее время возможно образование очагов непарного шелкопряда.

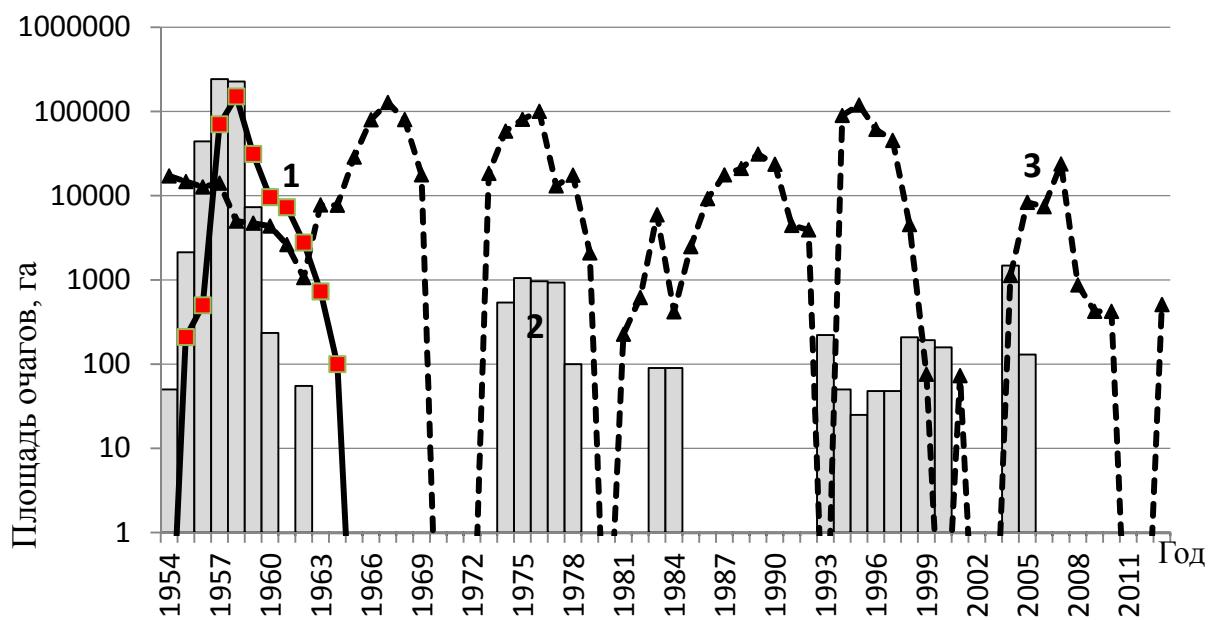


Рис. 2. Динамика площадей очагов непарного шелкопряда в Тульской (1), Рязанской (2) и Саратовской (3) областях в 1954-2013 гг.

В Рязанской обл. крупная вспышка численности непарного шелкопряда была также только в 1954-1962 гг. Площадь очагов в 1957-1958 гг. составляла 242 232 и 227 209 га. Последующие четыре массовых размножения были менее интенсивными, площадь очагов была в 100 раз меньше. В 2004 г. очаги зарегистрированы на 1 479 га, в другие годы – на площади от 222 до 1 054 га. Прогноз следующий: в Рязанской обл. наиболее вероятны непродолжительные массовые размножения непарного шелкопряда, возникающие с близкой к 11-летней периодичностью, небольшой интенсивности (локальные очаги или незначительный охват территории) с длительным (3-10 лет) межвспышечным периодом. Вероятность начала массового размножения в настоящее время высокая.

В Саратовской обл. очаги зарегистрированы в 2013 г. Они появились после сильной засухи 2010 г. Продолжительность межочагового периода составила 2 года. Прогноз их образования полностью подтвердился, так как многолетняя динамика площадей очагов в Саратовской облас-

ти имеет более постоянный (стационарный) характер, чем в Рязанской и Тульской.

## 2.2. Прогноз фаз массового размножения

Вспышки массового размножения закономерно развиваются во времени [7, 10, 13, 16] и проходят четыре фазы (рис. 3): первую, или *начальную*; вторую, или фазу *роста численности* вредителя (продромальная, нарастания численности); третью, или фазу *собственно вспышки* (эруптивная, максимума) и четвертую, или фазу *кризиса* (разреживания).

В первой (начальной) фазе вспышки массового размножения численность вредителя увеличивается незначительно, чаще в 2-3 раза по сравнению с численностью предшествующего вспышке поколения.

Во второй фазе (роста численности), охватывающей несколько (чаще всего два) поколений, численность вредителя увеличивается, однако повреждение крон можно обнаружить лишь при специальном осмотре. Происходит формирование очагов размножения вредителя, расширение их территории. В начале этой фазы имеющиеся локальные очаги не выявляются (не регистрируются).

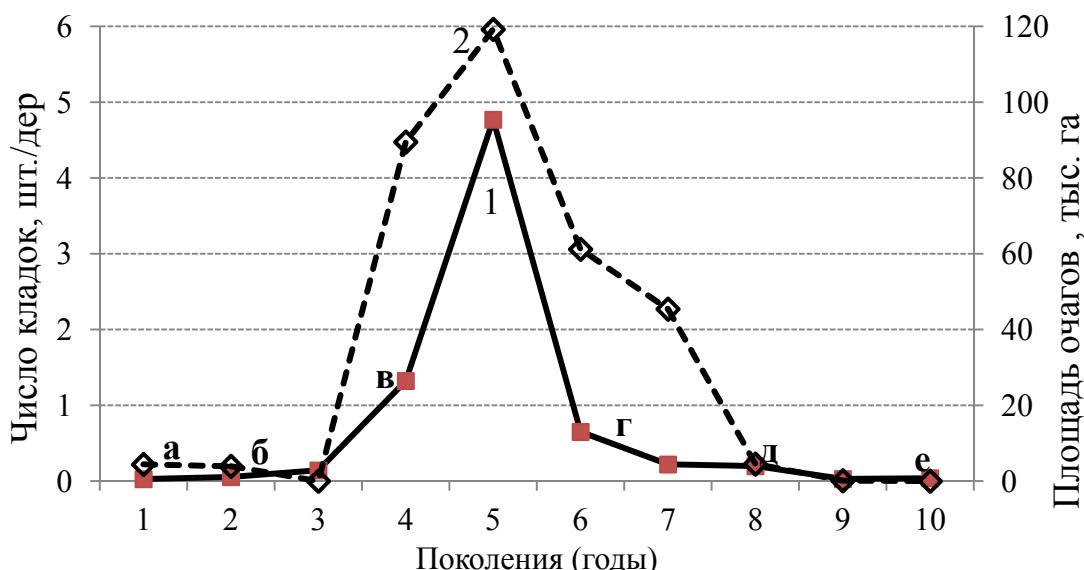


Рис. 3. Изменение плотности популяции непарного шелкопряда (1) и площади очагов (2) по фазам вспышки массового размножения в дубравах Саратовской обл.: аб – начальная фаза; бв – фаза роста численности; вг – собственно вспышка; гд – фаза кризиса; де – период депрессии

При переходе в третью фазу численность вредителя скачкообразно увеличивается, кроны повреждаются в сильной степени или полностью. В конце фазы, в результате перенаселения и недостатка корма, резко снижаются плодовитость и доля самок в популяции, увеличивается зараженность паразитами и болезнями. Наблюдается интенсивная миграция насекомых и образование вторичных очагов. Третья фаза охватывает чаще всего два поколения и является кульминацией вспышки. В четвертой фазе (кризиса) численность вредителя начинает резко идти на убыль, наблюдается минимальная плодовитость и доля самок (в начале фазы), максимальная зараженность паразитами и болезнями.

Диагностика текущей и прогноз следующей фазы массового размножения также начинаются с графического анализа. При наличии ежегодных оценок плотности популяции на одной и той же стадии развития насекомого в течение массового размножения строим диаграмму их изменения (см. рис. 3). Выделяем точки перехода из одной фазы массового размножения в другую (а-е).

Если таких данных нет, то используем этот рисунок или другую диаграмму (из литературных источников), условия которой аналогичны или достаточно близки к исследуемым объектам. Для определения текущей фазы оценку плотности популяции сравниваем с диаграммой. Например, плотность популяции в среднем 1 кладка на дерево. Это означает, что фаза роста численности завершилась, и популяция перешла во вспышечное состояние. При этом уже зафиксированы повреждения крон деревьев и локальные очаги насекомого, однако часто их обнаруживают достаточно поздно, уже в конце фазы роста численности. В результате начало вспышки часто регистрируется на 1-2 года позже.

Период между вспышками включает этапы депрессии (линия «де» на рис. 3), восстановления и стабилизации численности [10, 13]. Поэтому массовое размножение в одном и том же насаждении может повториться не ранее чем через 3 года после завершения предыдущей вспышки.

Продолжительность и интенсивность массового размножения определяются развитием второй фазы вспышки. Неблагоприятные гидротермические условия в этот период могут сократить (при эффективном комплексе энтомофагов) или, наоборот, увеличить на 2-3 года продолжительность массового размножения, привести к повторному объеданию насаждений [16]. Затяжные вспышки формируются при повторных засухах за счет охвата новых насаждений. Прервать вспышку массового размножения можно только в случае, если она имеет локальный характер.

## **2.3. Качественные и количественные показатели фаз**

При мониторинге популяции насекомого диагностика фаз его массового размножения не представляет труда. Однако при разовых обследованиях решение такой задачи существенно усложняется, так как при одной и той же плотности популяции в следующем году может быть рост численности насекомого или ее снижение (затухание вспышки). Это требует анализа дополнительных показателей. Для прогноза фаз вспышки массового размножения используется комплекс критериев [7, 12-16]. Наиболее эффективными являются параметры популяции, характеризующие ее состояние, структуру и особенности распределения в пространстве. На разных фазах градации они значительно и достоверно отличаются по абсолютной величине или направлению и степени изменения.

К качественным показателям относятся: плодовитость (среднее число яиц в кладке), соотношение полов (половой индекс, доля самок), жизнеспособность (смертность или выживаемость насекомых), изменчивость окраски его гусениц (соотношения фенотипов), численность и эффективность паразитов и хищников, распространение болезней (степень зараженности). Так, А. И. Ильинский [16] для диагностики фаз вспышки предлагал использовать следующие критерии (табл. 3).

Таблица 3. Изменение массы яйцекладок и плодовитости по фазам (1 – начальная, 2 – рост численности; 3 – собственно вспышка; 4 – кризис)

Показатель	Значения показателей по фазам вспышки				
	1 и 2		3	4	
	макси- мальные	средние	средние	средние	минималь- ные
Масса яйцекладки, мг	800-1 000	500-600	200-300	80-120	10
Число яиц, шт.	1 000-1 500	500-700	250-350	100-120	10

Количественные показатели характеризуют изменение численности вредителя во времени и пространстве, интенсивность размножения и развития вспышки, благоприятность условий местообитания, степень угрозы насаждениям. К количественным показателям относятся: абсолютная и относительная заселенность насаждений, коэффициент размножения, коэффициент расселения, коэффициент нарастания вспышки [16].

Абсолютная заселенность (плотность популяции) – число особей насекомого, приходящихся в среднем на единицу площади насаждений или одно дерево (табл. 4), ветвь, единицу пищевого субстрата. В последнем случае это называется экологической плотностью популяции. По абсолютной заселенности вычисляют коэффициенты размножения и нарастания вспышки (табл. 4), степень угрозы насаждению со стороны вредителя.

Таблица 4. Среднее число кладок яиц, шт. на 1 дерево, коэффициент размножения и нарастания вспышки непарного шелкопряда в Саратовской обл. осенью 2002-2017 гг.

Год	Кладок яиц	Коэффициент размножения	Коэффициент нарастания вспышки	Год	Кладок яиц	Коэффициент размножения	Коэффициент нарастания вспышки
2002	0,007	0,7		2010	0,003	0,167	
2003	0,013	1,857	1,8	2011	0,004	1,333	1,3
2004	0,030	2,308	4,3	2012	0,057	14,250	19
2005	0,160	5,333	22,8	2013	0,646	11,333	215,3
2006	0,785	4,904	112,1	2014	1,125	1,741	375
2007	1,485	1,892	212,1	2015	0,538	0,478	179,3
2008	0,451	0,304	64,4	2016	0,092	0,171	30,7
2009	0,018	0,040	2,6	2017	0,015	0,163	5

Относительной заселенностью называют долю проб, содержащих вредителя, от общего количества проб. Она характеризует степень охвата насаждений вредителем. В зоне постоянных вспышек массового размножения (первичных очагов непарного шелкопряда) для расчета заселенности более информативно использовать элементарную единицу учета – дерево, так как на пробной площади (50-100 деревьев) кладки не встречаются только при самой низкой численности. Так, в период депрессии популяции весной 2011 г. в Базарно-Карабулакском лесничестве Саратовской обл. кладки были обнаружены на 5 из 16 пробных участков (31,2 %), в 2012 г. – на 7 из 16 пробных участков (43,8 %). В 2013 г. и последующие годы относительная заселенность насаждений составляла 100 %, что свидетельствует о начавшемся массовом размножении непарного шелкопряда. Относительная заселенность деревьев (встречаемость деревьев с кладками яиц непарного шелкопряда) в Базарно-Карабулакском лесничестве Саратовской обл. весной 2011 г. была 0,3 %, 2012 г. – 0,4 %, 2013 г. – 5,5 %, 2014 г. – 38,1 %, 2015 г. – 58,6 %.

Коэффициент размножения – наиболее информативный параметр популяции. Он определяется как отношение абсолютной заселенности в данном году к заселенности в предыдущем году, или отношение плотности популяции двух смежных поколений на одной и той же стадии развития насекомого. Вследствие агрегированного размещения популяции и других причин величина коэффициента размножения (табл. 5) в разных насаждениях может варьироваться от 6 до 27 (средняя 11,3). Это необходимо учитывать при осуществлении мониторинга и учете численности непарного шелкопряда.

Коэффициентом расселения называют соотношение относительной заселенности вредителем насаждений в данном году (поколении) к относительной заселенности в предшествующем году (поколении).

**Таблица 5. Среднее число кладок яиц, шт. на 1 дерево, и коэффициент размножения непарного шелкопряда на пунктах постоянных наблюдений (ППН) в Саратовской области**

№ ППН	Число кладок на 1 дерево весной, шт.		Коэффици-ент раз-множения	№ ППН	Число кладок на 1 дерево весной, шт.		Коэффици-ент размно-жения
	2013 г.	2014 г.			2013 г.	2014 г.	
1	0,06	0,37	6,17	9	0,1	0,59	5,90
2	0,06	0,44	7,33	10	0,04	0,29	7,25
3	0,09	1	11,11	11	0,04	0,27	6,75
4	0,15	1,64	10,93	12	0,03	0,74	24,67
5	0,07	0,78	11,14	13	0,02	0,51	25,50
6	0,04	0,76	19,00	14	0,03	0,7	23,33
7	0,05	0,52	10,40	15	0,03	0,76	25,33
8	0,06	0,57	9,5	16	0,04	1,08	27,00

Коэффициент расселения, установленный по встречаемости кладок яиц непарного шелкопряда в Базарно-Карабулакском лесничестве Саратовской обл., составлял в 2012 г. (период депрессии) 1,3, на фазе роста численности (2013 г.) – 13,8, в 2014 г. – 6,9, в эруптивной фазе массового размножения (2015 г.) – 1,5.

Коэффициентом нарастания вспышки называют отношение абсолютной заселенности вредителем насаждений за данный год (поколение) к абсолютной заселенности им тех же насаждений в последний предвспышечный год (поколение).

Коэффициент нарастания вспышки в течение массового размножения непарного шелкопряда в Саратовской обл. варьировал от 1,3 до 375 (см. табл. 4). Максимальный показатель коэффициента нарастания вспышки в 2003-2009 гг. равен 212,1, в 2011-2017 гг. – 375, то есть он прямо пропорционален интенсивности массового размножения и показывает степень роста численности насекомого (при вспышке она увеличивается в несколько сотен раз).

## 2.4. Фазовые портреты массовых размножений

Наибольшую прогностическую ценность имеют многолетние оценки плотности популяции непарного шелкопряда на стационарных участках

[8, 13, 20, 21]. Их можно использовать при всех видах прогнозов – от краткосрочного (степени дефолиации насаждений) до долгосрочного (периодичности массовых размножений). Из графических моделей наиболее наглядным и эффективным инструментом прогнозирования являются градационные кривые [16] и фазовые портреты популяции, построенные на основе экспериментальных данных [10]. Градационные кривые – это диаграммы многолетней динамики плотности популяции, где ось ординат – численность, а абсцисс – год (рис. 4).

Мониторинг численности непарного шелкопряда свидетельствует об увеличении частоты его массовых размножений (снижении их средней продолжительности до 9 лет) в Саратовской обл. в последние десятилетия. Вспышки массового размножения также стали менее интенсивными – максимальная плотность популяции не превышает 1,5 кладки на дерево, коэффициент нарастания вспышки (см. табл. 4) – 375.

Для выявления того, как изменяется плотность популяции при низком уровне численности вредителя, и построения фазовых портретов данные, характеризующие два последовательных массовых размножения, трансформируем в логарифмы (табл. 6).

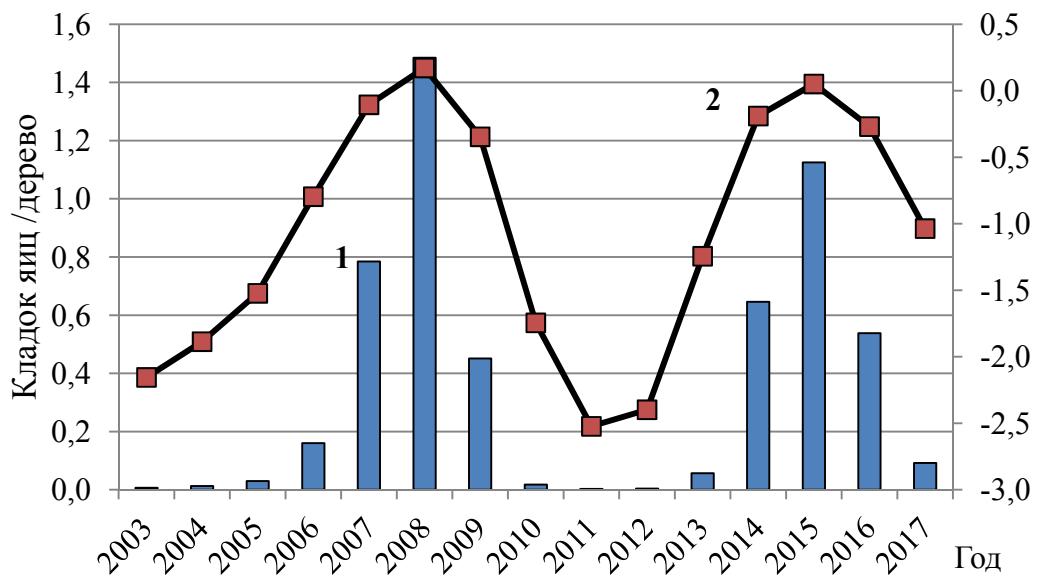


Рис. 4. Изменение плотности популяции непарного шелкопряда весной 2003-2017 гг. в абсолютной (1) и логарифмической (2) (вспомогательная ось) шкалах

Рассчитываем коэффициенты размножения. Логарифмическая

шкала (см. рис. 4) более наглядно отражает тенденции численности, показывает выход популяции из депрессии и начало роста численности (2012 г.).

**Таблица 6. Результаты логарифмирования оценок численности непарного шелкопряда весной 1976-2003 гг. и ее изменения за год**

Год	Кладки яиц, шт./дер.	Кладки яиц, шт./дер. (lg)	Коэффициент размножения (lg)	Год	Кладки яиц, шт./дер.	Кладки яиц, шт./дер. (lg)	Коэффициент размножения (lg)
1976	2,200	0,342	0,184	1990	0,284	-0,547	-0,697
1977	3,364	0,527	-0,346	1991	0,057	-1,244	-0,358
1978	1,516	0,181	-0,461	1992	0,025	-1,602	0,334
1979	0,525	-0,280	-0,121	1993	0,054	-1,268	0,420
1980	0,397	-0,401	-0,675	1994	0,142	-0,848	0,969
1981	0,084	-1,076	-0,970	1995	1,322	0,121	0,557
1982	0,009	-2,046	0,125	1996	4,769	0,678	-0,866
1983	0,012	-1,921	0,243	1997	0,650	-0,187	-0,470
1984	0,021	-1,678	-0,067	1998	0,220	-0,658	-0,046
1985	0,018	-1,745	0,407	1999	0,198	-0,703	-0,850
1986	0,046	-1,337	0,769	2000	0,028	-1,553	0,133
1987	0,270	-0,569	0,356	2001	0,038	-1,420	-0,580
1988	0,613	-0,213	0,034	2002	0,010	-2,000	-0,155
1989	0,663	-0,178	-0,368	2003	0,007	-2,155	0,269

Информативность показателей еще более возрастает, если анализировать зависимость коэффициента размножения от плотности популяции и их многолетнюю динамику (метод фазовых портретов). Для этого изменение численности насекомого в течение массового размножения представляем на фазовой плоскости (рис. 5), где ось  $x$  – плотность популяции в начале генерации ( $x_n$ ), а  $y$  – коэффициент размножения ( $x_{n+1} / x_n$ ). Логарифм коэффициента размножения равен ( $\lg x_{n+1} - \lg x_n$ ). Все расчеты в электронных таблицах выполняются автоматически по заданным алгоритмам.

Используем классификацию фаз массового размножения А. С. Исаева [10]. При коэффициенте размножения непарного шелкопряда 1 ( $\lg y = 0$ ) популяция стабильна, если  $y > 1$ , то популяция возрастает, а  $y < 1$  – убывает.

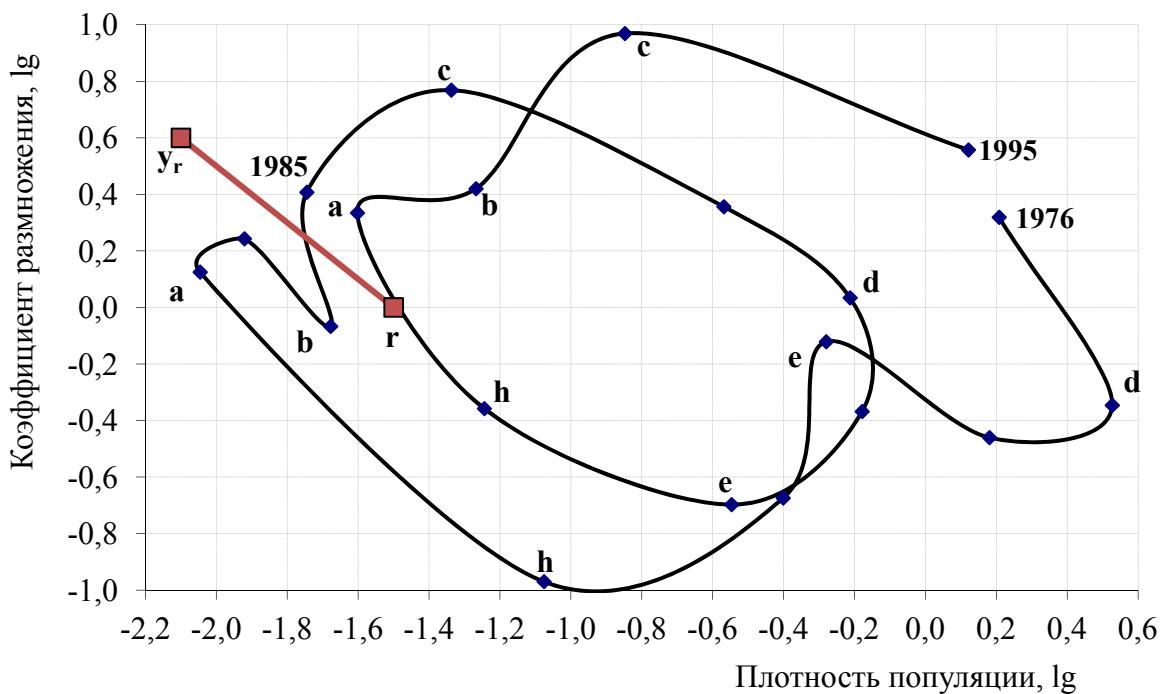


Рис. 5. Фазовый портрет (траектория) двух массовых размножений непарного шелкопряда в Базарно-Карабулакском лесничестве Саратовской обл.: bc – фаза нарастания численности; cd – максимума; de – разреживания; eh – депрессии; ha – фаза восстановления стабильной численности;  $r - y_r$  – пороговая линия (переход к массовому размножению); точки на траектории – годы (1976–1995)

#### 2.4.1. Пороговые критерии угрозы массовых размножений

Фазовые портреты многолетней динамики популяций вредных насекомых для определения (выявления и прогноза) угрозы массового размножения можно использовать двумя способами. Первый и более универсальный - определять положение текущих популяционных параметров (численность и коэффициент размножения) относительно существующей фазовой траектории. Второй – по фазовой траектории (см. рис. 5) определять пороговую линию ( $r - y_r$ ) и пороговые значения численности и коэффициента размножения, превышение которых указывает на наличие и степень угрозы массовых размножений насекомых.

Например, по результатам мониторинга непарного шелкопряда в 1985 г. получили следующие оценки параметров: плотность популяции весной – 0,018 кладок яиц на 1 дерево, коэффициент размножения – 2,26. По положению этой точки на фазовом портрете (см. рис. 5) видно,

что наблюдается не только рост численности насекомого, но и превышение пороговой линии. Популяция выходит на траекторию вспышки массового размножения, что и подтвердилось в следующем году.

Пороговую линию определяем следующим образом. На фазовом портрете (см. рис. 5) на основании анализа экспериментальных данных выявляем точку  $g$ , отделяющую стабильное состояние от состояния популяции, переходящей к массовому размножению. Для порослевых дубрав Саратовской обл. значение стабильной плотности популяции составляет около 0,005–0,02 кладки на дерево. Пороговая плотность популяции – 3 кладки на 100 деревьев. После этого начинается массовое размножение (фаза роста численности). Из этой точки к оси ординат проводим наклонную прямую (биссектрису), которая в логарифмической шкале характеризует пороговые значения плотности популяции и соответствующие коэффициенты размножения, приводящие к вспышке массового размножения. Координаты точки  $g$  ( $x = -1,523$ ;  $y = 0$ ), что в обычной шкале составляет: плотность популяции ( $x_r$ ) – 0,03 кладки на дерево, коэффициент размножения – 1.

Далее переходим от графического к аналитическому описанию с использованием программы Excel: пороговую линию ( $g-y_r$ ) (см. рис. 5) в логарифмической шкале аппроксимируем уравнением

$$y = -1,0x - 1,523, \quad (1)$$

где:

$X$  – плотность популяции (lg кладок яиц, шт./дер.);

$Y$  – коэффициент размножения (lg).

Для получения абсолютных значений пороговых показателей используем стандартный алгоритм извлечения антилогарифмов и расчет по уравнению (1) коэффициентов размножения, соответствующих разной пороговой численности кладок яиц (табл. 7). Например, пороговый коэффициент размножения для плотности популяции 0,015 кладок на дерево равен 2: антилогарифм  $(-1,824 \times -1,0) - 1,523 =$  антилогарифм  $0,301 = 2,0$ . То есть угроза возникает при росте численности непарного шелкопряда не менее чем в 2 раза.

**Таблица 7. Результаты расчета пороговых значений плотности популяции и соответствующих коэффициентов размножения непарного шелкопряда для дубрав Саратовской обл.**

Число кладок (lg)	Число кладок, шт./дер.	Коэффициент размножения (lg)	Коэффициент размножения
-2,523	0,003	1,000	10,00
-2,222	0,006	0,699	5,00
-2,046	0,009	0,523	3,33
-1,921	0,012	0,398	2,50
-1,824	0,015	0,301	2,00
-1,745	0,018	0,222	1,67
-1,678	0,021	0,155	1,43
-1,620	0,024	0,097	1,25
-1,569	0,027	0,046	1,11
-1,523	0,030	0,000	1,00

Однако пороговая плотность популяции может быть и ниже. Чем она ниже, тем выше должен быть коэффициент размножения, чтобы наступила фаза нарастания численности. По экспериментальным данным установлены следующие пороговые соотношения этих показателей. Чтобы началось массовое размножение сильно разреженных популяций, когда на 500 деревьев приходится около 3 кладок яиц непарного шелкопряда, необходимо значительное, не менее чем в 5 раз, увеличение его численности. При плотности популяции в 4-5 раз выше для начала массового размножения может быть достаточно и небольшого (в 1,2 раза) увеличения численности.

#### **2.4.2. Прогноз интенсивности массовых размножений**

Фазовый портрет популяций с эруптивным типом динамики численности характеризуется зонами стабильности и вспышки. Анализ структуры и границ фазовых портретов (см. рис. 5) позволяет выявить закономерности, типичные для вида в целом, и установить особенности массовых размножений, прежде всего их интенсивность (пределы изменения плотности популяции и продолжительности повреждения насаждений). При интенсивной вспышке массового размножения плотность популяции колебалась от 0,009 до 4,8 кладок яиц на дерево, при менее интенсивной – от 0,023 до 0,663 кладок на дерево.

Массовое размножение 1984–1992 гг. (рис. 5) можно классифицировать как проромальный этап многолетней динамики численности непарного шелкопряда. Менее высокие темпы увеличения плотности популяции непарного шелкопряда и ее более низкий уровень повысили эффективность энтомофагов как регуляторов численности. При этом увеличивалось не только количество особей шелкопряда, погибших от энтомофагов, но и их доля, что свидетельствует о наличии отрицательной обратной связи (регуляции). Реакция энтомофагов на изменение плотности популяции непарного шелкопряда характеризовалась минимальной величиной запаздывания. Поэтому массовое размножение не имело выраженной фазы собственно вспышки (эруптивной фазы). Численность вредителя была в 5-7 раз ниже максимальной (4,8 кладок на дерево), а дефолиация – незначительной. При таких проромального типа массовых размножениях мероприятия по ликвидации очагов можно не планировать или назначать только на локальных участках.

Для выявления особенностей динамики популяции в оптимальных и субоптимальных частях ареала на фазовой плоскости строим траектории вспышек массового размножения в различных регионах [13, 20]. Проводим сравнительный анализ фазовых портретов популяций (рис. 6), определяем продолжительность и интенсивность массовых размножений.

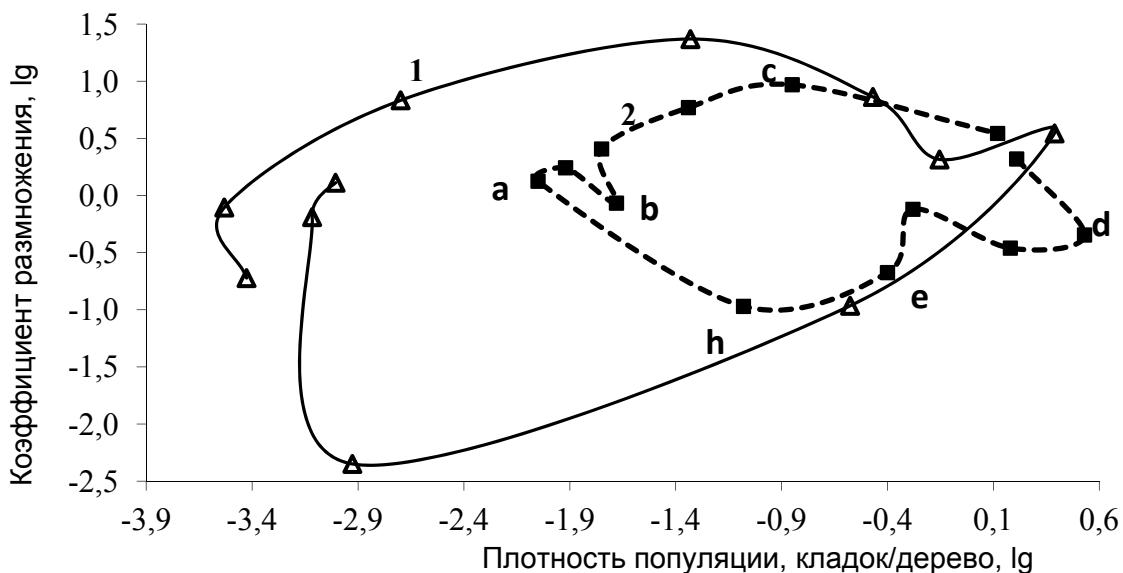


Рис. 6. Фазовый портрет (траектория) динамики численности непарного шелкопряда в Челябинской (1) и Саратовской (2) областях:  
 bc – фаза нарастания численности; cd – максимума; de – разреживания;  
 eh – депрессии; ha – восстановления стабильной численности

В Челябинской области (рис. 6) существенным отличием является более глубокая депрессии популяции (более низкая численность непарного шелкопряда в межвспышечный период). Также более низкой является и пороговая численность, что свидетельствует о высокой угрозе массовых размножений.

Фазовый портрет нескольких массовых размножений на одном и том же лесном участке позволяет выявлять долговременные тенденции (тренды). При снижении интенсивности вспышек траектория имеет вид закручивающейся вокруг точки оптимальной плотности популяции спирали. В случае периодических массовых размножений траектория представлена семейством замкнутых кривых с общим центром. При нарастающей интенсивности вспышек траектория представляет собой раскручивающуюся спираль.

Используя фазовые портреты (см. рис. 6), по плотности популяции и коэффициенту размножения непарного шелкопряда можно составлять прогнозы разного временного интервала. При этом получаем не только качественные (долго- и среднесрочный прогноз периодичности массового размножения и реализации его фаз), но и количественные (краткосрочный прогноз численности насекомого) оценки.

Фазовые портреты позволяют осуществлять самое важное – определять и прогнозировать начало массового размножения. Новая вспышка размножения может возникнуть только после того, как полностью завершится период депрессии и восстановление стабильной численности (участок  $ha$  на фазовой траектории – см. рис. 6). Дальнейший рост численности происходит быстро при благоприятной (засушливой) погоде. В неблагоприятных условиях плотность популяции увеличивается низкими темпами, и фаза роста численности реализуется после улучшения ситуации.

На основе сравнительного анализа фазовых портретов динамики численности непарного шелкопряда с учетом выявленных существенных отличий составляем прогноз массового размножения непарного шелкопряда для разных регионов (экологических условий). Например, в берез-

няках Южного Урала (Челябинская обл.) прогнозируется более интенсивное разреживание популяции и продолжительное нарастание численности, а также большая амплитуда ее колебания, чем в дубравах Саратовской обл.

Фазовые портреты дают вероятностную оценку продолжительности межвспышечного периода, вспышки массового размножения и отдельных ее фаз. Для эффективного планирования лесозащитных мероприятий особенно важна диагностика перехода популяции в фазу роста численности и кризиса. Например, продолжительность массового размножения непарного шелкопряда составляет 10-11 лет, каждая из 4-х фаз вспышки длится в среднем 2 года, проводить защитные обработки насаждений необходимо в 1-2-й годы фазы собственно вспышки. При наступлении фазы кризиса применять инсектициды нецелесообразно.

Для диагностики и прогноза фаз массового размножения используем комплекс эколого-популяционных показателей, характеризующих направление и степень изменения качественного состояния популяции и ее пространственной структуры (табл. 8).

**Таблица 8. Изменение параметров популяции непарного шелкопряда по фазам градации**

Популяционный параметр	Изменение параметров по фазам градации			
	рост численности	максимум	разреживание	депрессия и восстановления
Коэффициент размножения	1,7÷8,1	2,1÷3,5	0,14÷0,56	0,16÷1,3
Число яиц в кладке, шт.	427÷281	172	230÷268	370÷393
Половой индекс (доля самок)	0,5÷0,6	0,21	0,3÷0,4	0,45÷0,67
Паразитировано куколок, %	5÷24	25÷35	50÷60	10÷15
Масса куколок самок, г	1,1÷1,6	0,5÷0,6	0,6÷0,8	1,0÷1,5

Плодовитость и половой индекс минимальны в год кульминации численности, а максимальны - при выходе популяции из депрессии и в начале массового размножения. Они постепенно увеличивались в период

снижения и уменьшались в период роста численности (их изменение имеет противоположное направление). На фазе максимума и в начале кризиса снижается масса яйца, а также степень пространственной агрегации популяции (распределение насекомых в насаждении становится более равномерным).

Для детализации прогноза фаз градации в период снижения и роста численности необходимо учитывать и другие показатели, главным образом плотность популяции (коэффициент размножения) и характеристики погоды.

Используя критерии градационных фаз, их длительность и закономерный характер смены, определяем текущую фазу массового размножения и разрабатываем среднесрочные и долгосрочные прогнозы.

## **2.5. Прогноз начала вспышек размножения. Экспертная оценка**

Наиболее точный прогноз начала нового подъема численности обеспечивается при использовании фазового портрета (см. рис. 5, 6). Массовое размножение начинается только после восстановления стабильной численности. Через сколько лет после этого реализуется фаза роста численности, уточняем путем анализа метеорологической ситуации и показателей состояния насекомого. Выход популяции вредителя из состояния стабильности связан с засухой, которая приводит к росту его выживаемости и плодовитости, снижению эффективности естественных врагов и биологической устойчивости насаждений.

Темпы реализации массового размножения зависят также от состояния популяции в год засухи, ее готовности к выходу из депрессии, эффективности энтомофагов. Если состояние вредителя неудовлетворительное (низкая плодовитость, половой индекс, жизнеспособность), то численность растет медленно.

О выходе популяции непарного шелкопряда из зоны стабильной численности (переходе от фазы восстановления к фазе нарастания численности) свидетельствуют существенное увеличение – до максимального

или близкого к нему значения – плодовитости (450 яиц) и полового индекса (доля самок 0,65) при средней величине массы яйца, а также максимальная агрегация популяции в насаждении, снижение зараженности особей паразитами и смертности на разных фазах развития.

Прогноз начала массового размножения непарного шелкопряда можно эффективно составлять на основе экспертной оценки. Однако она должна базироваться на научных знаниях и достаточно большом объеме информации. Преимущество метода заключается в том, что используется комплекс разнородных качественных показателей (табл. 9).

Прежде всего необходимо определить фазу массового размножения в текущем (n) и предыдущем году (1 – начальная фаза, 2 – продромальная (роста численности), 3 – эруптивная, 4 – кризис, 5 – период депрессии).

**Таблица 9. Экспертная оценка угрозы образования очагов массового размножения**

Фаза массового размножения в году		Изменение состояния популяции	Засуха		Неблагоприятная погода		Наличие локальных очагов	Угроза в году n + 1
n-1	n		n-1	n	n-1	n		
4	5	-	Нет	Нет	Да, нет	Да, нет	Нет	Нет
5	5	0	Сильная	Нет	Да, нет	Нет	Нет	Слабая
5	5, 1	0, +	Сильная	Средняя	Нет	Нет	Нет, да	Средняя
5, 1	1	+	Сильная	Сильная	Нет	Нет	да	Сильная

Примечание. – снижение численности, + – рост численности, 0 – стабильная численность; n-1 – предыдущий год, n +1 – прогноз.

По динамике фаз оцениваем тенденции в изменении состояния популяции. При выходе популяции из состояния депрессии (восстановление стабильной численности) угроза массового размножения увеличивается до средней степени, в начальной фазе угроза максимальна. При ведении учетов плотности популяции тренд можно характеризовать более детально: «-» – снижение численности, «+» – рост численности, 0 – ста-

бильная численность. Сильная засуха в текущем и, особенно, предыдущем году значительно повышает угрозу массового размножения. Засуху можно оценивать в баллах: сильная засуха – 3, средняя – 2, отсутствует – 1.

Целесообразно также учитывать наличие неблагоприятных для развития непарного шелкопряда погодных условий. Прохладное и дождливое лето, особенно весенние заморозки, снижают темпы роста численности насекомого и задерживают реализацию вспышки массового размножения.

Наличие локальных очагов непарного шелкопряда (даже в соседних лесничествах) существенно повышает степень угрозы его массового размножения. В таблицу (см. табл. 9) можно включить дополнительную информацию или конкретизировать ее показатели. Однако эффективным инструментом прогнозирования она может стать только при наличии опыта и знаний особенностей массового размножения насекомого в конкретном регионе.

Например, закончился период депрессии, популяция непарного шелкопряда восстановила стабильную численность в прошлом году. Если в текущем году наблюдается засуха и существует информация об увеличении численности в соседнем лесничестве (области), то фаза роста численности реализуется уже на следующий год. Если отмечена только засуха, то рост численности наиболее вероятен через 1-2 года.

## **2.6. Гидрометеорологические показатели прогноза**

Для прогноза особенно важен анализ погодной ситуации [12-16]. Большое значение имеют метеорологические показатели, характеризующие диапазон изменчивости всех основных климатических данных по годам и частоту повторяемости наибольших отклонений.

Прежде всего необходимо учитывать засухи как фактор, действующий на состояние насаждений и популяции вредных организмов. Для этого накапливаем и постоянно обновляем данные по температуре воздуха и осадкам (табл. 10). Используем базу данных месячной и суточной

температуры воздуха и количества осадков на метеорологических станциях России и бывшего СССР (<http://meteo.ru/data/162-temperature-precipitation#описание-массива-данных>).

**Таблица 10. Фрагмент электронной таблицы месячного количества осадков (Саратовская метеостанция)**

Год	Количество осадков по месяцам, мм												
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	$\Sigma_{(4-7)}$
2010	91,4	65,3	44,7	22,7	17,7	16,8	20,5	1,1	19	56,7	91,7	38,7	78
2011	63,8	34,7	8,9	17	12,3	62,7	4,9	19,9	52,7	35,4	31,1	50,6	97
2012	69,6	59,1	59,1	17	6,3	46,7	27,2	94,8	22,6	61,8	33,1	26,8	97
2013	49,2	21,5	53,3	30,8	44	141	37,2	11,1	115,1	8,7	15	17,5	253
2014	47,2	26,5	38,8	34,7	17,2	73,5	13,9	34,3	39	7,9	17,9	60,6	139
2015	37,5	20,9	3,3	39	58,8	48,5	30,2	17,2	4,8	43,8	118,9	39	177
2016	84,6	64,3	29,5	45,2	77,5	9,1	28,8	8,3	100,1	-	-	-	161

Осадки являются более информативным показателем характеристики засушливости периода и степени благоприятности условий роста насаждений. Изменчивость осадков от года к году более существенна, чем варьирование температуры воздуха. Используем количество осадков за разные периоды, прежде всего за период активного развития (питания) насекомых, например апрель–июль (см. табл. 10).

Состояние погоды анализируем за многолетний период, хотя бы за предшествующее десятилетие, по материалам метеостанции, находящейся поблизости от центра обследуемого или наблюдаемого лесного массива. Для повышения достоверности прогнозов необходимо располагать данными об изменении погодной ситуации за возможно более длительный период, сопоставляя их с данными об уровне численности и площади очагов вредителей.

Для прогнозирования угрозы массовых размножений насекомых оцениваем степень засушливости вегетационных и других периодов и встречаемости засух. Выбор периода и конкретных метеорологических показателей является достаточно сложной задачей в условиях значительного их варьирования и сравнительно невысокой универсальности.

Критерий отбора - наибольшее влияние особенностей погоды на вредителей и состояние насаждений (критические периоды сезонного цикла развития вредителя). Для этого создаем электронные таблицы суточных и среднемесячных температур воздуха и количества осадков. Проводим графический анализ, определяем средние многолетние и отклонения от средних значений *метеорологических показателей*.

*Коэффициент водности* – количество выпавших осадков за определенный период, выраженное в процентах от среднего многолетнего значения за этот же период. Определяется за календарный год, за гидрологический год (за период от октября предшествующего года по сентябрь текущего включительно), по скользящим периодам в 2-3 года, за 3 летних месяца (июнь, июль, август) и т. д.

*Гидротермический коэффициент* (ГТК). Для оценки условий увлажнения используется отношение количества осадков к испаряемости или основным факторам испарения (температуре и дефициту влажности воздуха, солнечной радиации и др.). Широко применяется гидротермический коэффициент Г. Т. Селянинова, определяемый по формуле:

$$\text{ГТК} = \Sigma P \times 10 / \Sigma(T_n), \text{ или } \text{ГТК} = \Sigma P / (0,1 \times \Sigma(T_n)),$$

где:

$\Sigma P$  – сумма осадков за определенный период (не менее трех декад);

$T_n$  – среднесуточная температура воздуха за каждый день периода с  $T_n$  больше  $10^{\circ}\text{C}$

Испаряемость в этой формуле (мм) численно приравнена к сумме средних суточных температур за период с температурой выше  $10^{\circ}\text{C}$ , уменьшенной в 10 раз. Гидротермический коэффициент нельзя применять для оценки погодных условий весны и осени, когда температура воздуха ниже  $10^{\circ}\text{C}$ .

В программе Excel создаем таблицу, в которой гидротермический коэффициент рассчитывается автоматически после введения данных о количестве осадков и температуре воздуха. При этом используем ежеднев-

ные или месячные данные в зависимости от длительности оцениваемого периода (табл. 11).

Определяем годы засух, их интенсивность и длительность засушливого периода. Оценки рассчитываем для определенного периода развития насекомого, когда популяция наиболее восприимчива к гидротермическим условиям. Тёплая и сухая погода в период развития гусениц младшего возраста, а также куколок и бабочек предыдущей генерации способствует росту численности непарного шелкопряда. При повышении температуры мая на 2-3°C и уменьшении осадков в мае на 20-30% возникает климатическая обстановка, благоприятная для развития массового размножения. Качественная перестройка состояния популяции и ее переход к массовому размножению происходят из-за теплой и засушливой погоды мая–июля. Крайние отклонения погоды вносят существенные изменения и в дальнейшее развитие массового размножения, влияя на его интенсивность, продолжительность в целом и отдельных фаз.

Таблица 11. Фрагмент электронной таблицы оценки гидротермических коэффициентов (Саратовская метеостанция)

Год	Температура воздуха, °С		Осадки, мм		ГТК		
	май	июнь	май	июнь	май	июнь	июль
2006	15,6	22,1	483,6	663	0,87	0,39	0,62
2007	17,8	19,9	551,8	597	0,30	1,09	0,88
2008	16	18,9	496	567	0,70	0,66	0,79
2009	15,3	22,7	474,3	681	0,66	0,30	0,42
2010	18,2	24,4	564,2	732	0,31	0,23	0,26
2011	17,1	19,5	530,1	585	0,23	1,07	0,45
2012	19,2	23	595,2	690	0,11	0,68	0,38
2013	19,6	20,9	607,6	627	0,72	2,25	1,18
2014	18,9	19,1	585,9	573	0,29	1,28	0,59
2015	17,1	23,8	530,1	714	1,11	0,68	0,74
2016	16,1	21	499,1	630	1,55	0,14	0,70

Проводим графический анализ изменения во времени метеорологических и лесопатологических показателей, например количества осадков (рис. 7) и (или) ГТК и площадей очагов за 1966-2016 гг. Отмечаем наличие или отсутствие связи возникновения очагов с проявлением засушливых периодов, интенсивностью и продолжительностью засух.

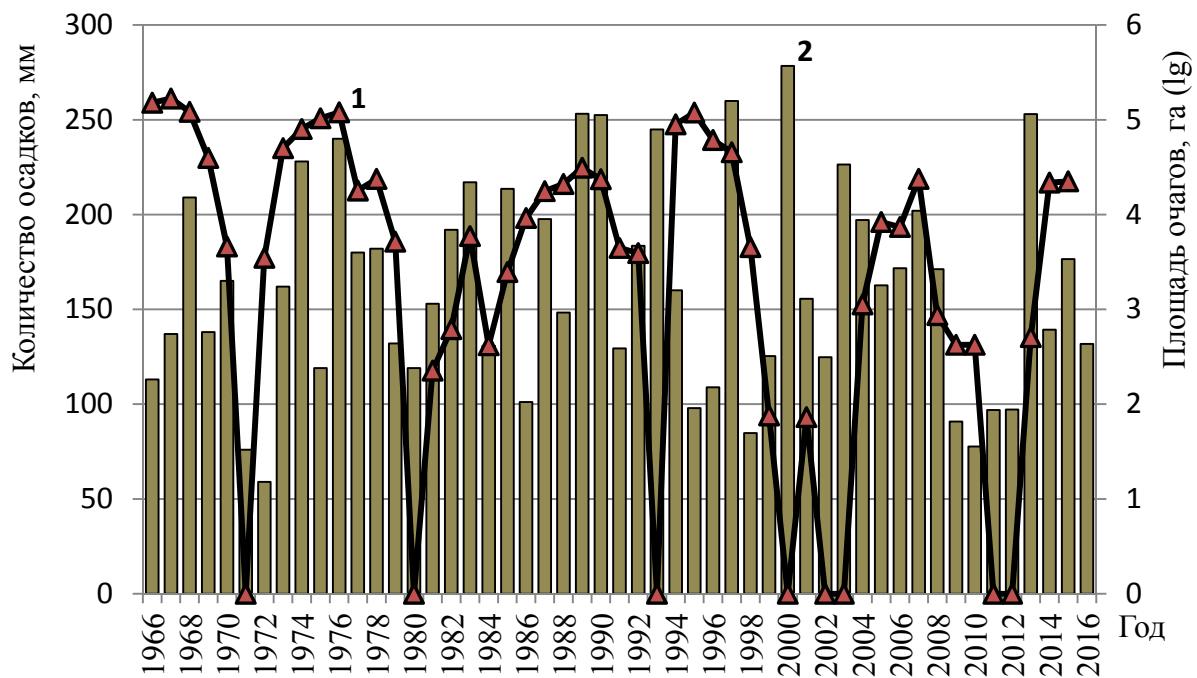


Рис. 7. Изменение количества осадков (2) за апрель-июль 1966-2016 гг. и площадей очагов непарного шелкопряда (1) в Саратовской области

Среднее многолетнее количество осадков за апрель-июль 1966-2016 гг. составляет 163 мм. В 2009-2012 гг. ежегодно выпадало только 48-60% нормы осадков (рис. 7). Такого продолжительного периода дефицита осадков за 50 лет еще не было. Только в 1971-1972 гг. дефицит осадков был сильнее (36-47%), однако засуха была менее длительной. По результатам анализа погодной ситуации 2010 г. прогноз следующий: новое массовое размножение непарного шелкопряда начнется через 2 года.

Численные значения гидротермического коэффициента, по Г. Т. Селянинову, означают: 2,0 – избыточное увлажнение, 1,5 – хорошее, 1,0 – на грани засухи, 0,5 – сильная засуха, 0 – полное бездождье. Так как условия увлажнения отдельных лет отличаются от средних, используют изменчивость этого коэффициента во времени или отклонения значений ГТК от среднего. Например, в табл. 12 приведены оценки ГТК мая-июля (Саратовская метеостанция) и основных параметров популяции непарного шелкопряда осенью 2007-2016 гг.

Таблица 12. Динамика ГТК, площадей очагов и плотности популяции шелкопряда (Саратовская обл.)

Показатель	Изменение показателей по годам									
	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016
ГТК <sub>5-7</sub>	0,88	0,79	0,42	0,26	0,45	0,38	1,18	0,59	0,74	0,70
Площадь очагов, га	23 787	871	423	423	0	0	510	21 745	22 428	1 074
Кладок, шт./дерево	1,485	0,451	0,018	0,003	0,004	0,057	0,646	1,125	0,538	0,092
Коэффициент размножения	1,892	0,304	0,040	0,167	1,333	14,25	11,33	1,741	0,478	0,171

Данные показывают, что засуха в сезон (май-июль) была 4 года подряд (2009-2012). Поэтому после затухания очагов непарного шелкопряда уже в 2011 г. можно было прогнозировать новое массовое размножение. Действительно, в 2012 г. численность насекомого выросла в 14 раз, а очаги были зарегистрированы уже в 2013 г.

Для повышения точности прогноза численности непарного шелкопряда необходимо учитывать минимальные температуры в период развития гусениц I и II возрастов. Наиболее неблагоприятны для непарного шелкопряда сильные заморозки в мае (от -3 до -5°C). После них численность вредителя снижается в несколько раз. При благоприятной дальнейшей погоде смертность частично компенсируется ростом плодовитости и доли самок и увеличением численности в следующем году.

Холодная и дождливая погода, удлиняя период развития, повышает смертность вредителя. Сильные морозы (до -40°C) не увеличивают существенно смертность. Для развития вредителя неблагоприятны также мягкие малоснежные зимы, когда кладки яиц находятся ниже уровня снега.

## 2.7. Прогноз эффективности энтомофагов и патогенов

Прогнозом вероятной активности энтомофагов и возбудителей болезней является оценка возможной смертности в популяции вредных насекомых (снижение их численности) под влиянием хищников, паразитов и патогенов. Это необходимо для определения, прежде всего, целесообразности проведения защитных работ по локализации и ликвидации очагов [8, 16].

Основой прогноза являются показатели состояния популяции вредителя, многолетние данные о количественных соотношениях энтомофагов и фитофага, а также степень развития эпизоотий. По этим данным устанавливают критерии (например, доля паразитированных и больных особей), при которых в конкретных условиях может не назначаться обработка насаждений, особенно химическими инсектицидами. Для непарного шелкопряда таким критерием является зараженность гусениц паразитами на 30-40% и куколок 40-50% на 3-4-й год после начала подъема численности вредителя.

Для уточнения прогноза создается фазовый портрет динамики зараженности непарного шелкопряда (смертности от конкретных паразитов и хищников) в зависимости от его исходной численности в ряду поколений (рис. 8). Он является более наглядным количественным критерием эффективности энтомофагов как механизмов регуляции в конкретных экологических условиях.

Проводится анализ траектории, оценивается диапазон колебаний зараженности в целом и на отдельных фазах размножения, степень запаздывания ее динамики относительно изменения численности хозяина, теснота связи между этими показателями и ее характер (положительная или отрицательная), эффективность регуляции (степень запаздывания реакции энтомофагов).

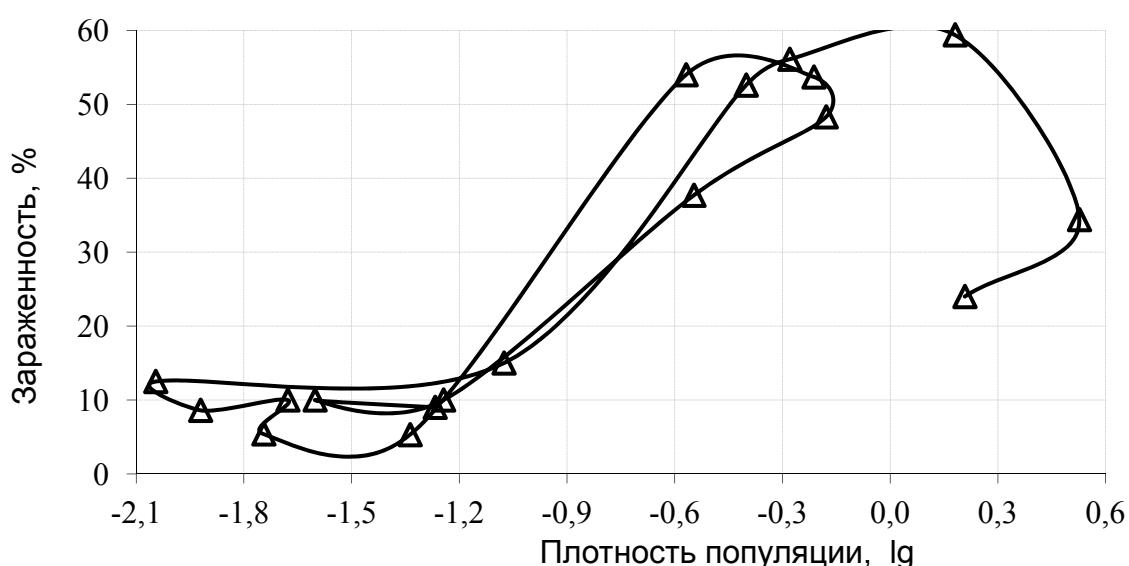


Рис. 8. Фазовая траектория зараженности куколок непарного шелкопряда тахиной *Blepharipoda scutellata*

Как видно из рис. 8, мухи-тахины являются важным регулятором численности непарного шелкопряда. Однако эффективность регуляции не постоянна. Запаздывание реакции паразитоида значительно меньше (зараженность на фазе кульминации массового размножения составляет 50-55 %), если средняя численность непарного шелкопряда не превышает 1 кладки на дерево. При более интенсивном массовом размножении, когда плотность популяции на фазе кульминации достигает в среднем 4 кладки яиц на дерево запаздывание реакции мухи-тахины более значительно (зараженность составляет только 25-35%). Поэтому в такой ситуации необходимо планировать применение инсектицидов для защиты дубрав от сильного повреждения.

## **2.8. Классификация насаждений по степени риска возникновения очагов**

Для различных видов насекомых при построении критериев классификации используется разная информация – от характеристик лесорастительных условий, рельефа, гидрографии, микроклиматической ситуации до параметров пригодности кормовых объектов.

Для непарного шелкопряда большое значение имеют строение древостоев, их возрастная и породная структура. Приуроченность очагов массового размножения и резерваций насекомых к специфическим ландшафтно-экологическим условиям и местообитаниям является основой прогноза пространственного распространения очагов. Величина плотности популяции насекомых зависит от состава, структуры и возраста насаждений, рельефа и экспозиции местности, особенностей почв и других факторов. Для выделения древостоев – потенциальных очагов непарного шелкопряда – используем таксационные описания как независимые переменные и многомерную статистическую модель. Умножая оценки таксационных показателей на соответствующие коэффициенты уравнения (2.2), рассчитываем дискриминантный критерий ( $Z$ ). Насаждения относятся к резервациям, если этот критерий положительный ( $Z \geq 0$ ):

$$Z = 51,59 + 0,20x_1 - 1,58x_2 + 0,30x_3 - 42,18x_4 - 7,77x_5 + 1,53x_6, \quad (2.2)$$

где:

- $x_1$  - доля предпочтаемой кормовой породы в составе, %;
- $x_2$  - средний диаметр, см;
- $x_3$  - средний возраст, лет;
- $x_4$  - полнота;
- $x_5$  - класс бонитета;
- $x_6$  - средняя категория состояния.

При этом повышается вероятность правильного выбора участков для лесопатологического мониторинга и увеличивается эффективность учетных работ. Используя полученный критерий и базу таксационных данных (включая и цифровой план насаждений), получаем карты-схемы резерваций и потенциальных очагов вредителя.

### 3. Оценка угрозы массового размножения по данным инвентаризации очагов

Для прогноза вероятности возникновения массовых размножений непарного шелкопряда по регионам России и их пространственного распространения используем базу данных многолетней динамики площадей очагов (табл. 13).

Таблица 13. Фрагмент электронной таблицы площадей очагов по регионам России

Регион	Площадь очагов, га, по годам										
	2004	2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014
Астрахан-ская обл.	880	3 887	1 409	513	32	46	0	0	0	0	150
Башкортостан	126 844	196 436	50 917	10 143	33 546	28 620	7 465	50 965	6 334	0	276
Белгород-ская обл.	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Волго-градская обл.	7 649	11 478	5 194	3 039	319	661	371	169	214	55	870
Воронеж-ская обл.	0	0	0	0	0	0	0	0	6 244	3 430	1 572
Дагестан	2 639	24 797	0	0	0	0	0	0	7 840	16 001	12 823
Красно-дарский край	2 202	1 375	0	3	96 274	481 036	486 448	0	0	0	0

Анализ данных многолетней динамики площадей очагов позволяет получить важную статистику, которая является основой долгосрочных прогнозов по регионам и в целом по России [12–16]. Например, в 1977–2013 гг. минимальная площадь очагов непарного шелкопряда в лесах России составляла 155,9 тыс. га (1980 г.), максимальная – 1 796 тыс. га (1978 г.). Количество регионов с очагами варьировало от 14 (2011 г.) до 35 (1997 г.).

Для оценки угрозы массовых размножений определяем и используем следующие показатели: средние многолетние, минимальные и максимальные ежегодные площади очагов, вероятность обнаружения или встречаемость очагов (приложения 1 и 2), а также периодичность их возникновения в различных регионах России. Данные в приложении характеризуют период наблюдений с 1954 (для части регионов – с 1977) по 2013 г. продолжительностью 60 и 37 лет соответственно. Среднюю площадь очагов рассчитывали как частное от суммы площадей очагов за период наблюдений, деленное на количество лет наблюдений. Например, в Воронежской обл. средняя многолетняя площадь очагов составляет 5 476 га.

Встречаемость очагов определяли как отношение числа лет с очагами к количеству лет наблюдений. Так, встречаемость очагов в Краснодарском крае составляет 75% (в среднем 7 лет с очагами из 10), в Воронежской области – 58,3% (6 лет с очагами из 10).

### **3.1. Встречаемость и распространение очагов**

Используя оценки встречаемости очагов в регионах (приложение 1, 2) и лесничествах (при наличии данных), определяем регионы с очагами непарного шелкопряда. Территории, где очаги наблюдались хотя бы один раз за весь период, относятся к зоне массового размножения. Зона массовых размножений охватывает 52 региона России. Ее также можно разделить на территории с разной периодичностью вспышек массового размножения (длительностью существования очагов). Так, в Саратовской

обл. очаги непарного шелкопряда наблюдаются практически ежегодно (периодичность вспышек один раз в 11 лет), а в Московской обл. годы с очагами составляют около 15% всего периода наблюдений (периодичность интенсивных вспышек один раз в 40-45 лет).

Сопоставляя встречаемость очагов, рассчитанную по регионам за первую и вторую половину временного ряда, проводим оценку трендов в продолжительности их существования и вероятности обнаружения. Выявляем территории, где очаги появились впервые (ранее не регистрировались) и где их образование прекратилось. Например, для количественной характеристики сокращения длительности функционирования очагов период с 1954 по 2013 г. разделили на два (по 30 лет) этапа и рассчитали встречаемость очагов (табл. 14), а также оценили направление и степень изменения этого показателя (тренд).

**Таблица 14. Встречаемость очагов непарного шелкопряда в 1954–1983 гг. и 1984–2013 гг. по регионам Европейской России**

№	Регион	Встречаемость очагов, %, за период		
		1954-1983 гг.	1984-2013 гг.	тренд
1	Астраханская обл.	76,2	83,3	+7,1
2	Республика Башкортостан	100,0	96,7	-3,3
3	Белгородская обл.	76,7	23,3	-53,4
4	Брянская обл.	20,0	0,0	-20,0
5	Волгоградская обл.	100,0	100,0	0

Полученные данные позволяют прогнозировать тенденцию снижения встречаемости (на 10–53%) и площади очагов непарного шелкопряда, наблюдавшуюся в последнее 3 десятилетия в ряде регионов европейской части России (Брянская, Белгородская, Воронежская, Тульская и другие области). И наоборот, угроза образования очагов выросла в некоторых регионах Поволжья и Северного Кавказа (Республика Татарстан – на 13,3%, Ставропольский край – на 23,3%).

Очаги шелкопряда не наблюдались последние 40 лет в 14 регионах зоны его массовых размножений (Ивановская, Калужская, Кемеровская, Костромская, Новгородская, Псковская, Сахалинская, Смоленская, Твер-

ская, Томская, Ярославская области; республики Ингушетия, Карачаево-Черкессия, Марий-Эл). Причем в лесах Кемеровской, Новгородской, Псковской, Сахалинской и Томской областей очаги были возможны, а в остальных отмечались ранее.

Для составления прогноза регионального уровня даем оценку площади очагов и амплитуды ее колебания в конкретном регионе. Например, во Владимирской обл. наиболее вероятны локальные очаги площадью от 80 га, а в Республике Башкирия – в десятки тысяч раз больше (в среднем 1,378 млн га). Вероятность обнаружения очагов во Владимирской обл. – 8%, а в Волгоградской обл. – 100%.

По данным о встречаемости очагов можно сделать следующий прогноз: в предстоящее десятилетие очаги в Волгоградской обл. будут наблюдаться ежегодно, максимально возможная площадь – 115 тыс. га, в Воронежской обл. очаги наиболее вероятны только в течение 5 лет из 10 с максимальной площадью 47 тыс. га.

### **3.2. Долгосрочный прогноз угрозы образования очагов. Лесопатологическое районирование**

Прогноз заключается в оценке частоты (периодичности) массовых размножений непарного шелкопряда. По данным учета очагов, количество вспышек массового размножения за 60-летний период в разных регионах изменялось от 1 до 6. Например, 1 массовое размножение было зарегистрировано в Орловской, Брянской, Тульской, Курской областях; 2 – в Республике Мордовия, 4-5 – в Белгородской, Липецкой, Рязанской областях; 6 – в Саратовской, Волгоградской, Оренбургской областях, Краснодарском и Ставропольском краях, Республике Татарстан.

Более точно периодичность колебания площадей очагов оцениваем при помощи стандартных компьютерных программ, рассчитывая корреляционные функции и периодограммы рядов. Период колебания площадей очагов в разных регионах варьировал от 6 лет до 22 лет (исходные данные трансформированы в логарифмы и проведено их сглаживание).

Для характеристики частоты массовых размножений можно использовать встречаемость очагов. Чем продолжительнее период существования очагов, тем выше их встречаемость, частота массовых размножений, угроза образования очагов и вредоносность непарного шелкопряда. По встречаемости очагов в пределах ареала насекомого проводим районирование земель лесного фонда: выделяем зоны слабой, средней и сильной угрозы образования очагов [14].

При слабой угрозе число лет с очагами в регионе составляет менее 30% (в среднем 12,2%) всего периода наблюдения (рис. 9). Эruptивные (на большой территории) вспышки массового размножения реализуются один раз в 40-45 лет и реже. В Европейской России к зоне слабой угрозы образования очагов (незначительного вреда) относятся Брянская, Владимирская, Кировская, Курская, Московская, Орловская, Пермская, Тульская области и республики Адыгея, Кабардино-Балкарская, Калмыкия, Марий Эл, Мордовия, Северная Осетия.



Рис. 9. Зоны с разной степенью угрозы образования очагов непарного шелкопряда в Европейской России

При средней угрозе (зоне периодического интенсивного вреда) число лет с очагами вредителя в регионе составляет 31–70% (в среднем 47,6%) за период наблюдения. Очаги на значительной площади в течение нескольких лет подряд наблюдаются в среднем один раз в 20-25 лет, а в промежутках формируются небольшие по площади локальные очаги. К зоне средней угрозы образования очагов относятся Белгородская, Воронежская, Екатеринбургская, Калининградская, Липецкая, Нижегородская, Тамбовская, Рязанская области, Ставропольский край, республики Дагестан, Удмуртия, Чеченская, Чувашия.

Сильная угроза массового размножения непарного шелкопряда отмечается в тех регионах, где встречаемость очагов более 70% (средняя 87,4%) от периода наблюдений. Массовые размножения наблюдаются со средней периодичностью 11 лет. К зоне перманентного интенсивного вреда относятся Астраханская, Волгоградская, Оренбургская, Пензенская, Ростовская, Самарская, Саратовская, Ульяновская, Челябинская области, Краснодарский край, республики Башкортостан, Татарстан.

Сопоставление зон с разной частотой встречаемости очагов и распределением гидротермического коэффициента показало, что вспышки массового размножения шелкопряда наблюдаются на территории, расположенной южнее изолинии ГТК, равного 1,5. Вероятность формирования очагов севернее этой границы при избыточных условиях увлажнения очень низка. При этом изолинии ГТК, равные 1,25-1,5, достаточно почти совпадают с границами зоны незначительного вреда. Условия недостаточного увлажнения ( $\text{ГТК} < 1,1$ ) характеризуют зону перманентного интенсивного вреда, где годы действия очагов массового размножения составляют 71-100% от периода наблюдений. Осадки на данных территориях не превышают 300 мм в период со средними суточными температурами воздуха более 5°C. Термические условия этой зоны характеризуются суммами температур выше 5°C, равными 2 400-4 000° [14].

Для уточнения многолетних прогнозов проводим текущую (ежегодную) оценку риска образования очагов. С этой целью используем элек-

тронные таблицы площадей очагов по регионам и построенные на их основе диаграммы изменения площадей очагов (рис. 10).

Многолетние данные о площадях очагов в Тамбовской, и особенно, в Саратовской обл. позволяют по наличию межочаговых периодов определить число (а следовательно, и частоту) массовых размножений непарного шелкопряда. Их было 6 за 1952-2011 гг., то есть средняя периодичность массового размножения составляет около 10 лет.

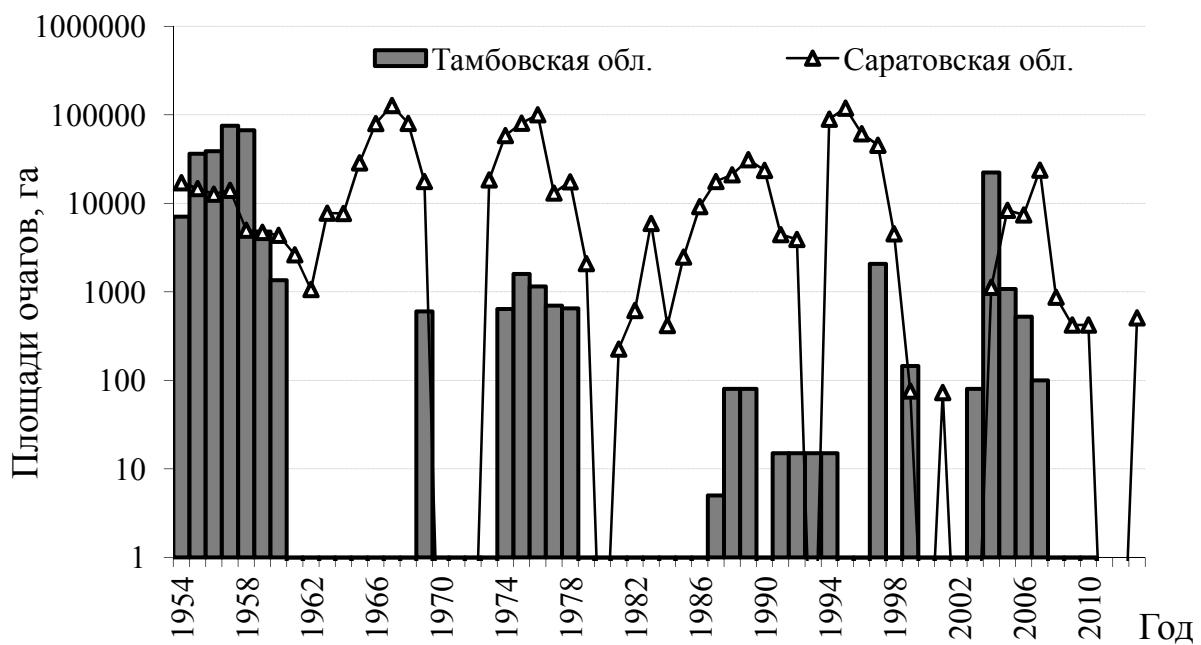


Рис. 10. Динамика площадей очагов непарного шелкопряда в Тамбовской и Саратовской областях

Данные по продолжительности межвспышечного периода (рис. 10) позволяют оценить изменение угрозы образования очагов во времени. Основой для прогноза является тот факт, что массовое размножение в насаждении может повториться не ранее чем через 3 года после завершения предыдущей вспышки.

Угрозу оцениваем, сравнивая продолжительность текущего межвспышечного (межочагового) периода со средней его продолжительностью. Например, прогноз осуществляем в 2013 г. на 2014 г. (рис. 10). Продолжительность текущего межочагового периода в Тамбовской обл. составляет 6 лет (2008-2013 гг.). Средняя продолжительность этого периода

– 5 лет (продолжительность предыдущих пяти периодов равна соответственно 8, 4, 8, 2, 3 года). Максимальная продолжительность межвспышечного периода – 8 лет (1961-1968 гг., 1979-1986 гг.). Таким образом, прогнозируемая угроза образования очагов в 2014 г. – средняя, а в 2016 г. – высокая, так как период без очагов к 2016 г. увеличится до 9 лет, а это больше не только средней, но и максимальной (8 лет) продолжительности межвспышечного периода. Следовательно, по этому показателю степень угрозы образования очагов высокая (период депрессии популяции непарного шелкопряда давно завершился, произошло восстановление стабильной численности, популяция готова к массовому размножению).

### **3.3. Краткосрочный прогноз угрозы образования очагов**

Приведенный выше алгоритм уточнения прогноза угрозы образования очагов по величине текущего межвспышечного периода начинаем с графического анализа данных. Построение диаграмм изменения площадей очагов на определенной территории является наиболее информативным (см. рис. 10). При этом осуществляются оценка и прогноз следующих параметров:

- частота массовых размножений;
- интенсивность (амплитуда) колебания площадей очагов;
- тренд в периодичности и интенсивности массовых размножений;

Графический анализ динамики очагов показывает те регионы, для которых трудно корректно оценить перечисленные выше параметры. Как правило, это большие территории, для которых объединение данных приводит к потере информации, скрытию особенностей массовых размножений насекомого. В этом случае необходимо использовать материалы инвентаризации очагов по лесничествам (рис. 11).

По изменению площадей очагов в Волгоградской обл. сложно говорить о периодичности их образования, так как четко просматриваются только 2 вспышки массового размножения: первая – 1964-1972 гг., вторая – 1974-1980 гг. Очаги третьего массового размножения образовались в 1982 г., однако, когда вспышка завершилась, сказать сложно. Только

данные по лесничествам, которые более точно отражают периодичность массовых размножений, а главное – время их начала, позволяют ответить на этот вопрос.

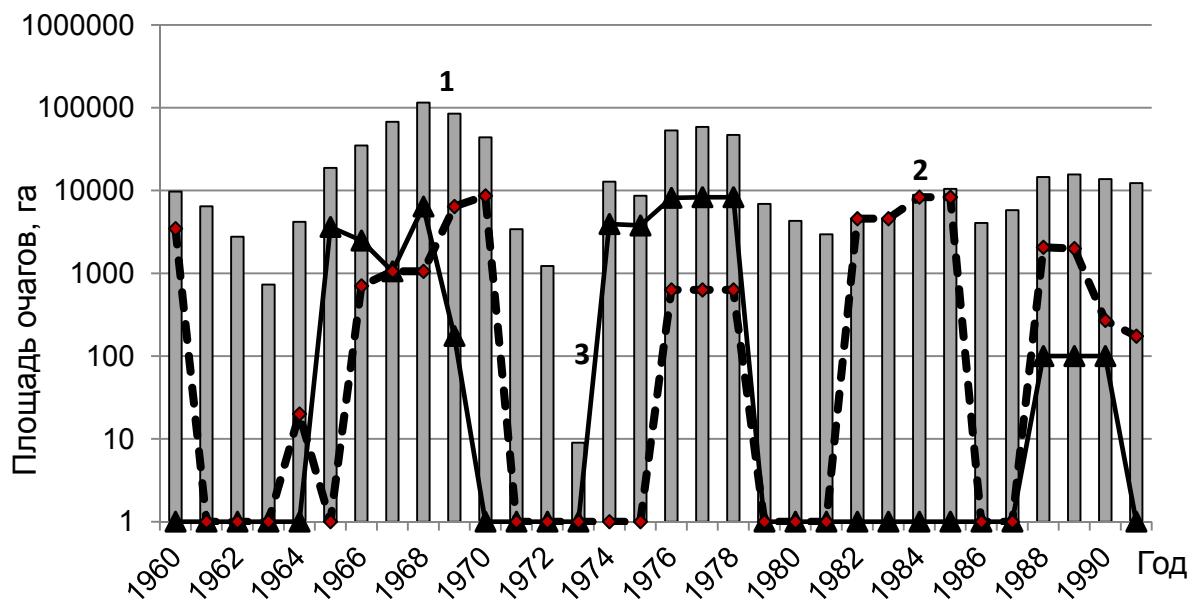


Рис. 11. Динамика площадей очагов непарного шелкопряда в Иловлинском (2) и Жерновском (3) лесничествах и в целом по Волгоградской обл. (1)

Анализ данных за 1982-1991 гг. показывает, что в это десятилетие также наблюдалось 1 массовое размножение, а не 2, как может показаться при беглом рассмотрении. В Иловлинском лесничестве очаги образовались в 1982 г. и существовали с перерывом до 1991 г. В Жерновском лесничестве они возникли на 5-6 лет позже, чем в Иловлинском, и на более короткий срок (3-4 года). Это и подтверждает, что очаги относятся к одному и тому же массовому размножению непарного шелкопряда. Таким образом, в течение 30 лет наблюдалось 3, а не 4 массовых размножения.

При прогнозировании угрозы образования очагов лучший результат дает анализ данных по лесничествам. Межвспышечные периоды здесь четко выражены, можно определить их среднюю и максимальную продолжительность и более точно судить о начале массового размножения. Для уточнения оценок периодичности массовых размножений по площа-

дям очагов необходимо использовать и другую дополнительную информацию.

База данных площадей очагов по лесничествам позволяет проанализировать их распространение по региону и определить территории, где появляются первые очаги. Для этого можно создавать схематические карты ежегодного наличия очагов в регионе, что обеспечивает раннюю диагностику угрозы массового размножения.

Нами проведен анализ очагов по 21 лесхозу Ульяновской обл. с 1960 по 1983 г. Установлено, что первые очаги размножения непарного шелкопряда (1974 г.) возникли на юге области (Старокулаткинский и Радищевский лесхозы). Затем они распространились на северо-западные районы и в 1978 г. охватили практически всю территорию. После окончания вспышки (1980, 1982 гг.) очаги сохранились на юге области. Многолетняя динамика очагов в отдельном лесхозе аналогична их изменению в целом по области.

Оценка степени запаздывания реализации вспышек в различных зонах дает возможность прогнозировать развитие очагов в пространстве. Распространение очагов по территории страны наиболее полно можно исследовать с помощью ГИС-технологий (например, программной среды ARC/VIEW и 8-миллионной электронной карты), путем совмещения базы данных по очагам с картографической основой административного деления России или границ лесничеств.

Сравнительный анализ асинхронности динамики очагов в разных регионах можно провести на основе оценок корреляции рядов площадей и солнечной активности, а также сопоставляя их графики. Анализ свидетельствует о том, что очаги возникают и развиваются не синхронно (рис. 12).

Солнечную активность характеризовали средними значениями чисел Вольфа за май-июль. Анализ рис. 12 показывает, что такой подход, при отсутствии мониторинга численности непарного шелкопряда, позволяет уточнять временные границы и периодичность его массовых раз-

множений в различных регионах России. Маркерами являются пики солнечной активности, так как после них образуются очаги.

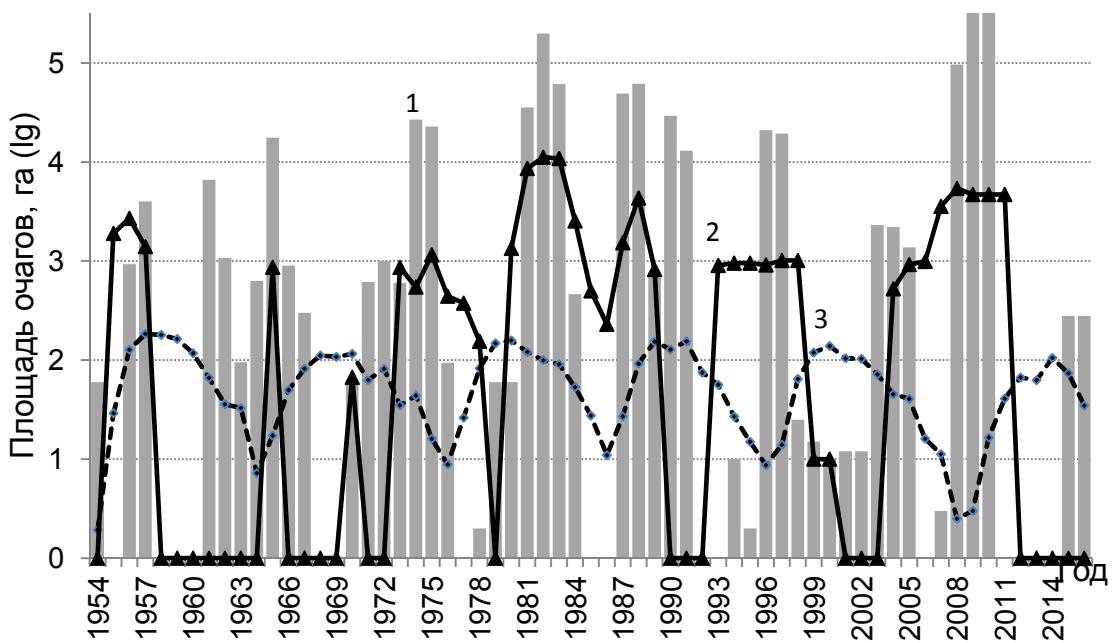


Рис. 12. Динамика логарифмов площадей очагов непарного шелкопряда в Краснодарском (1) и Ставропольском (2) краях и индекса солнечной активности (3)

Такие маркеры или анализ изменения площадей очагов по лесничествам необходимы, если очаги наблюдаются практически ежегодно (см. рис. 11). Трудно объективно отделить одну вспышку от другой при отсутствии периодов без очагов. Кроме того, такие маркеры необходимы и в случае, когда периоды без очагов встречаются часто, как в Краснодарском крае (рис. 12). При этом отсутствие очагов не является границей между двумя массовыми размножениями, а отражает появление вторичных и миграционных очагов, когда они завершились в одних лесничествах, но возникли в других. При этом массовое размножение – одно и тоже, что характерно для регионов с большой территорией и изменчивостью ландшафтов, как, например, в Краснодарском крае.

Решению задачи способствует также сравнительный анализ динамики очагов в соседнем экологически более однородном регионе, например Ставропольском крае. Из рис. 12 видно, что очаги 1979-1984 гг. и

1987-1991 гг. относятся к одной вспышке массового размножения, а не к разным. Так же, как и очаги 2002-2005 гг. и 2007-2010 гг.

Об обоснованности этих выводов свидетельствует то, что в Ставропольском крае в указанные периоды было 2 массовых размножения (1979-1990 гг. и 2003-2012 гг.), а не 4. В целом с учетом поправок за 60 лет было 6 массовых размножений, а не 8, что более точно и соответствует их 10-11-летней периодичности.

## **4. Методы анализа временных рядов**

Многолетняя динамика площадей очагов при отсутствии существенных изменений в структуре лесных насаждений рассматривается как случайный стационарный процесс, что позволяет использовать для прогноза методы анализа временных рядов. Типичный временной ряд представляется в виде суммы 4-х составляющих: тренда или долгосрочного движения, колебаний относительно тренда, сезонной компоненты, несистематического случайного эффекта.

Колебательное движение и случайная составляющая являются основными компонентами временных рядов площадей очагов. Они не имеют типичной (в пределах года) сезонной компоненты, но как сезонный эффект можно рассматривать изменения площадей в течение вспышки массового размножения.

Наиболее сложным вопросом является оценка тренда. Например, долговременное увеличение площадей очагов обусловлено необратимым ухудшением состояния насаждений или изменением их возрастной структуры, и наоборот. Тренд объясняется влиянием постоянных сил, однобразно действующих приблизительно в одном и том же направлении. Тренд в многолетней динамике площадей очагов может быть связан с изменением климата при этом необходимо учитывать, что распространение очагов ограничено насаждениями, пригодными для развития конкретных видов насекомых.

Описание или моделирование структуры временных рядов проводили при помощи специализированной компьютерной программы “Мезозавр” (версия 1.0, 1989, авторы С. Кузнецов, А. Халилеев и др.). Она позволяет рассчитывать параметры моделей, проводить их экспертизу и выбирать наиболее адекватную. Программная среда дает возможность в режиме реального времени корректировать модели при получении новых данных или рассчитывать различные прогнозные сценарии, то есть осуществлять адаптацию моделей и корректировку прогнозов в автоматическом режиме.

Программа обеспечивает представление исходных данных и результатов моделирования в графической форме в различных шкалах (абсолютной, логарифмической и других). Это особенно удобно для предварительного анализа специфики структуры рядов (наличия тренда, характера колебаний) и выбора соответствующей модели.

Для прогнозирования динамики площадей очагов оптимальным является следующий алгоритм анализа ретроспективных данных.

1. Графический анализ структуры временного ряда, визуальное определение его специфики: наличие колебаний и степень их регулярности, тренда.
2. Выбор метода трансформации данных и сглаживания временного ряда. Взвешивание исходных данных методом скользящих средних первого или второго порядка с 3 или 5-летним интервалом усреднения.
3. Определение статистических характеристик ряда: математического ожидания, дисперсии и др. Расчет периодограмм для оценки периодичности колебаний и возможности применения сезонной модели.
4. Расчет автокорреляционной функции для определения стационарности процесса, тесноты корреляции значений ряда, возможности использования модели авторегрессии и определения порядка авторегрессии.
5. Корреляционный анализ различных временных рядов для выявления взаимосвязанных переменных и оценки тесноты связи с целью определения показателей, имеющих наибольшее прогностическое значение.

6. Выбор вида модели и определение ее структуры: выбор переменных, расчет коэффициентов, анализ модели.

7. Оценка точности прогнозов, расчет прогнозных оценок по нескольким моделям или сценариям и сопоставление с результатами учета (мониторинга) очагов. Выбор наиболее точной модели и ее корректировка с учетом данных мониторинга. Анализ и определение факторов, наиболее сильно влияющих на точность (реалистичность) модели.

Расчет средних и дисперсий рядов площадей очагов позволяет судить об уровне распространения очагов, степени их стабильности, возможной максимальной площади. Интегральным критерием характера изменчивости очагов является автокорреляционная функция. Для ее оценки рассчитали корреляции между членами ряда, разделенными ( $k-1$ ) наблюдениями, которые называются сериальными, или автокорреляциями.

Последовательность таких коэффициентов корреляции ( $r$ ), как функция интервала (лага) между наблюдениями ( $k$ ), называется автокорреляционной функцией, а ее график – коррелограммой. Для повышения тесноты связи ( $r^*$ ) площади очагов прологарифмировали и провели сглаживание ряда. Например, для Воронежской обл. получена следующая функция:

лаг ( $k$ )	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$r$	0,465	0,223	0,024	-0,056	-0,119	-0,044	0,241	0,410	0,268
$r^*$	0,774	0,541	0,312	0,140	-0,009	-0,055	-0,034	-0,065	0,208

По форме коррелограмм можно судить о стационарности процесса, наличии и существенности тренда, а также колебаний относительно тренда и их периодичности. Медленное убывание автокорреляционной функции ряда площадей очагов свидетельствует о нестационарности процесса. Для большинства регионов (рядов площадей очагов) характерно быстрое убывание автокорреляционной функции, достаточно высокое и достоверное значение первой сериальной корреляции между оценками площадей очагов. Для части регионов достоверен также коэффициент

второй сериальной корреляции, поэтому для прогноза очагов можно использовать авторегрессионные модели первого или второго порядка.

Подбор типа модели проводим с учетом специфики имеющихся рядов площадей очагов. По диаграммам предварительно оцениваем структуру рядов площадей очагов, амплитуды их колебаний, выявляем периодичность и тренд. Например, временной ряд изменения площадей очагов в Саратовской области (см. рис. 10) имеет менее сложную структуру, что позволяет разрабатывать достаточно точный прогноз. В Тамбовской обл. все массовые размножения существенно отличаются, и трудно выявить закономерность в их динамике, а значит, и прогнозировать. Прогноз по таким рядам имеет большую неопределенность.

Анализируем следующие модели: авторегрессии и скользящего среднего, сезонных эффектов, экспоненциального сглаживания.

Метод скользящих средних позволяет аппроксимировать исходные данные полином заданного порядка с помощью критерия наименьших квадратов. Это эквивалентно нахождению средневзвешенной оценки по сумме значений ряда в определенном интервале. Сглаживание рядов площадей очагов методом скользящих средних и логарифмирование исходных данных приводят к увеличению тесноты связи между последовательными членами ряда (сериальных корреляций) и снижению несистематического случайного эффекта, что повышает точность авторегрессионных моделей.

Для краткосрочного прогнозирования нестационарных временных рядов, имеющих случайное изменение уровня и угла наклона (неправильно меняющийся тренд) применяется метод экспоненциального сглаживания. Выделение тренда носит разведочный характер. Последнее значение ряда считается наиболее значимым по сравнению с остальными, поэтому ему приписываются наибольший вес, что не позволяет подобрать подходящую параметрическую кривую для аппроксимации ряда на всей его длине. Последнее значение сглаженного ряда должно быть принято как прогноз на один шаг.

## 4.1. Долгосрочный и краткосрочный прогноз площадей очагов. Верификация моделей

При выраженной периодичности в колебаниях площадей очагов для долгосрочного прогнозирования можно использовать модели авторегрессии и тренда. В аддитивной форме модель тренда и сезонности ряд представлена в виде:

$$Y(t) = T(t) + S(t) + err, \quad (4.1)$$

где:

$T(t)$  – тренд;  
 $err$  – ошибка;  
 $S(t)$  – сезонная составляющая, с периодом, равным средней продолжительности массового размножения или существования очагов.

Модель авторегрессии или комбинированная модель авторегрессии и скользящего среднего имеет вид:

$$P_n = A + b_1 P_{(n-1)} + b_2 P_{(n-2)}, \quad (4.2)$$

где:

$P$  – площадь очагов, га, в текущем ( $n$ ) и предыдущие ( $n-m$ ) годы;  
 $A$  и  $b$  – коэффициенты уравнения авторегрессии.

В качестве тест-объекта использовали временной ряд площадей очагов в Воронежской обл., как наиболее сложный по структуре. Динамика очагов до начала 1980-х гг. характеризовалась колебаниями с периодичностью 11 лет и быстро убывающей корреляционной функцией. Затем структура временного ряда изменилась: наметилось снижение амплитуды колебаний (уменьшение площади очагов) и их частоты (существенный рост межвспышечного периода до 5 лет в 1980-1984 гг.).

Разработанные в 1995 г. модели авторегрессии, а также тренда и сезонности учли эти тенденции лишь в незначительной степени. Коэффициент детерминации (вторая степень коэффициента корреляции) авторегрессии существенно вырос (с 0,541 до 0,890) в результате сглаживания исходных данных при помощи модели скользящего среднего первого порядка с 3-летним интервалом усреднения.

При составлении прогноза сезонную компоненту можно учесть как аддитивную составляющую или в виде индекса сезонности. Для этого опреде-

ляется структура сезонных изменений и период этих колебаний. Например, если данные собраны по месяцам, то сезонные колебания будут повторяться каждые 12 месяцев. Для оценки и исключения тренда используются 2 варианта: линии (кривые) тренда или метод скользящих средних.

Расчеты сезонной компоненты зависят от вида модели прогноза. Для аддитивной модели рассчитывается оценка сезонной компоненты как разность между фактическим значением и значением, определенным по трендовой модели (первый вариант оценки тренда). Используются фактические значения и оценки скользящей средней (центрированной средней при втором варианте оценки тренда). Если используем скользящие средние, то для прогнозирования выбирается трендовая модель с помощью метода наименьших квадратов или экспоненциальное сглаживание.

Разработанные модели авторегрессии, а также тренда и сезонности хорошо описывали изменение очагов непарного шелкопряда в Воронежской обл. с 1954 по 1994 г., но они оказались недостаточно реалистичными (рис. 13).

Это обусловлено существенным изменением динамики площадей очагов после 1994 г. Если продолжение роста межвспышечного периода до 7 лет в 1993-1997 гг. еще можно было предположить, то резкое снижение амплитуды колебания было непредсказуемым. Модели это не могли учитывать, и точность прогноза снизилась (рис. 13). Таким образом, модели, позволяющие получить наилучшую аппроксимацию данных и удовлетворяющие определённым статистическим критериям, не всегда дают наилучший прогноз динамики очагов.

При использовании сезонной модели для долгосрочного прогноза массовых размножений нужно обязательно учитывать изменения в характере колебания очагов. Так, точность сезонной модели увеличилась (коэффициент детерминации равен 0,498), когда оценку ее параметров в 1996 г. проводили не по всем наблюдениям (см. рис. 13), а использовали только две последние флюктуации (1973-1995 гг.), так как более «свежие» данные корректнее отражают ситуацию и, прежде всего, увеличение периода колебаний с 10 до 11 лет.

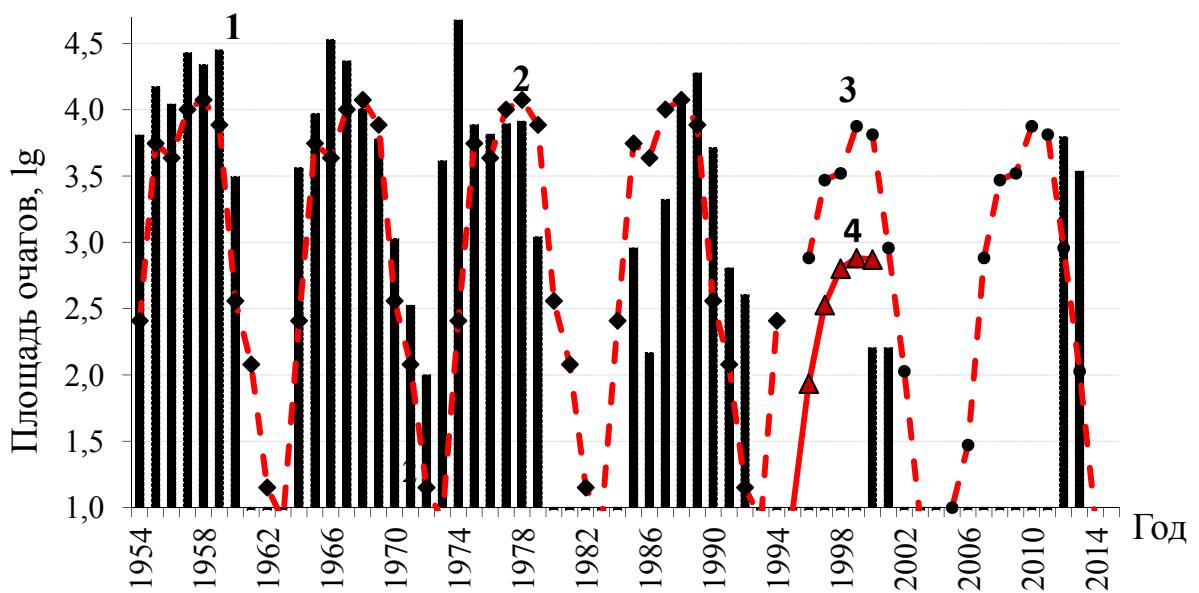


Рис. 13. Прогноз динамики площадей очагов непарного шелкопряда в Воронежской обл., разработанный в 1994 г., и его верификация: 1 – исходные данные; 2, 3 – прогноз по сезонной модели с периодом 10 и 11 лет соответственно, 4 – прогноз по модели авторегрессии (4.3)

Из рис. 13 видно, что сезонные эффекты меняются со временем и введение одних и тех же поправок по всей длине ряда оказывается неадекватным. Моделирование таких временных рядов можно осуществлять с применением сезонного варианта модели Бокса-Дженкинса [11, 12]. Исходя из приведенного выше понимания сезонности, полностью это пока не реализовано, так как требует большего числа наблюдений. В этой ситуации возможен только краткосрочный (в лучшем случае среднесрочный) прогноз. Для этого использовали модель авторегрессии и интегрированного скользящего среднего – одну из наиболее популярных моделей для построения краткосрочных прогнозов. Для описания временного ряда в основном достаточно авторегрессии первого или второго порядка. Авторегрессия первого порядка объясняет от 30 до 61,5% варьирования площадей очагов, второго порядка – до 89%. Большее количество параметров, как правило, не повышает точность модели.

По данным 1954-1994 гг. разработана следующая модель авторегрессии:

$$P_{n+1} = 0,99 + 0,952P_n - 0,307P_{n-1}, \quad R^2 = 0,517 \quad (4.3)$$

где:

$P$  – десятичный логарифм (lg) площадей очагов;  
 $n$  – год.

Модель объясняла 51,7% дисперсии площадей очагов, плохо прогнозировала начало следующего массового размножения, но точно предсказала, что очаги будут локальными (см. рис. 13).

Для уточнения прогноза учли, что очаги в 1995 г. не образовались, и провели сглаживания исходных данных при помощи модели скользящего среднего первого порядка с трехлетним интервалом усреднения. Коэффициент детерминации ( $R^2$ ) вырос с 0,541 до 0,890. Модель имеет вид:

$$P_{n+1} = 0,702 + 1,585 P_n - 0,845 P_{n-1}, \quad (4.4)$$

Однако это не привело к увеличению достоверности прогноза, что отмечается и другими исследователями [14]. Полученные в 1995-2001 гг. данные показали, что модель авторегрессии предсказала начало массового размножения намного раньше (1997 г.), чем это было в действительности. Более того, модель, полученная с использованием несглаженного ряда площадей очагов за 1954-1995 гг., несмотря на меньший коэффициент детерминации (0,573), оказалась более реалистичной. Она имеет вид:

$$P_{n+1} = 0,968 + 1,017 P_n - 0,348 P_{n-1}, \quad (4.5)$$

При нарушении стационарности процесса изменения очагов (тенденции значительного увеличения межвспышечного периода) использование модели авторегрессии корректно только при наступлении (выявлении) угрозы массового размножения. При увеличении интервала (рис. 13) ошибка прогноза увеличивается. В настоящее время нам неизвестны причины и устойчивость тенденции снижения амплитуды и частоты колебаний площади очагов непарного шелкопряда в Воронежской обл., поэтому для совершенствования модели использовали другие возможности.

Прежде всего использовали сглаживание исходных данных 3-точечной медианой, которое наиболее эффективно при наличии выбро-

сов (например, в 1974 г. площадь очагов составляла 47 155 га, что не характерно для ряда и, вероятно, завышено). В результате временной ряд был представлен в виде суммы достаточно гладкого тренда (рис. 14), сезонной и случайной компонент.

По данным за 1954-2011 гг. получено следующее уравнение авторегрессии:

$$P_{n+1} = 0,344 + 1,623P_n - 0,787P_{n-1}, \quad (4.6)$$

где:

$P$  – десятичный логарифм ( $\lg$ ) площадей очагов;

$n$  – год.

Результаты моделирования, представленные на рис. 14, свидетельствуют, что в этом случае прогноз по модели авторегрессии более корректный. Это обусловлено также тем, что в последний используемый для оценки параметров модели год зафиксированы очаги после длительного периода их отсутствия. Включение в анализ данных, характеризующих резкое изменение процесса, существенно увеличивает реалистичность модели. Таким образом, своевременное обнаружение и регистрация первых локальных очагов значительно упрощает разработку и повышает точность прогнозов.

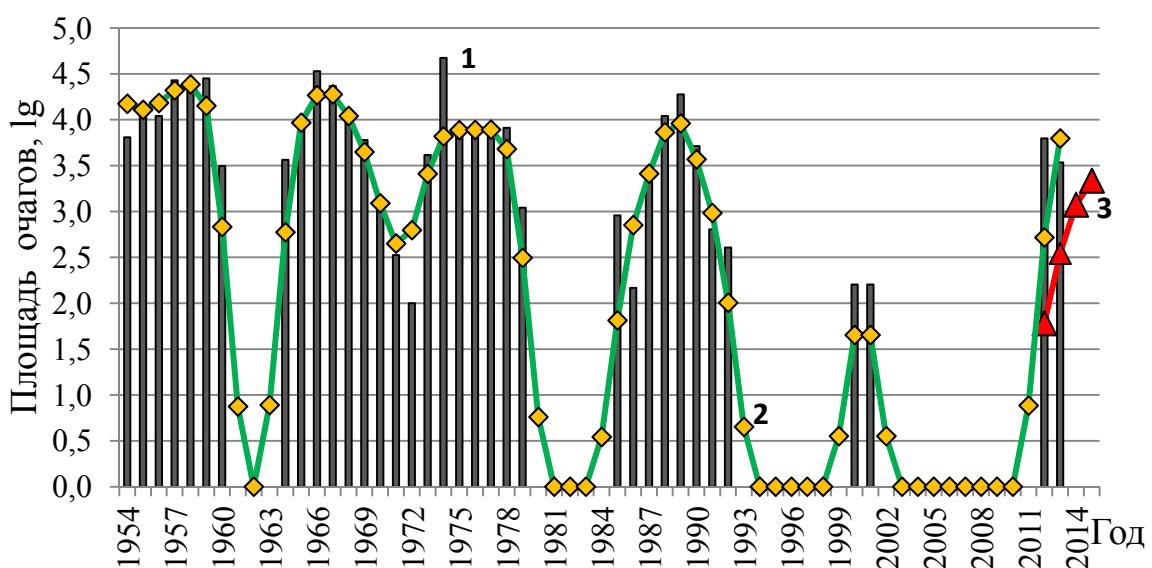


Рис. 14. Прогноз площади очагов непарного шелкопряда в Воронежской обл.: 1 – исходные данные за 1954-2013 гг., 2 – результаты медианного сглаживания, 3 – прогноз по модели авторегрессии

Используя метод авторегрессии и данные статистической отчетности по площадям очагов, для разных регионов рассчитали коэффициенты уравнений авторегрессий первого или второго порядка. Трансформация данных в логарифмы, как правило (за исключением некоторых регионов), увеличивает тесноту связи между площадями очагов. С учетом этого и проведена параметризация моделей. Коэффициенты регрессии достоверны для всех областей, кроме Астраханской. Авторегрессия первого порядка объясняет от 30 до 61,5% варьирования площадей очагов. Расчет авторегрессий второго порядка для части областей существенно не влияет на точность моделей.

Для прогнозирования очагов в Краснодарском крае по данным за 1954-2013 гг. получено уравнение авторегрессии второго порядка. Для этого данные преобразовали в логарифмы и провели их сглаживание с 3-летним интервалом усреднения, что привело к значительному росту коэффициента детерминации – с 0,313 до 0,772. Прогнозная модель имеет вид:

$$P_{n+1} = 1,4 + 1,226P_n - 0,840P_{n-1}, \quad (4.7)$$

где:

$P$  – десятичный логарифм (lg) площадей очагов;

$n$  – год.

Уравнение авторегрессии второго порядка для прогнозирования очагов в Саратовской обл. по данным за 1954-2013 гг. имеет вид:

$$P_{n+1} = 1,35 + 1,306P_n - 0,720P_{n-1}. \quad (4.8)$$

Коэффициент детерминации равен 0,766, при этом провели логарифмирование и сглаживание исходных данных методом скользящих средних с 5-летним интервалом усреднения полиномом второго порядка. Коэффициент детерминации для сезонной модели с 10-летним периодом оказался существенно меньше (0,466).

## 4.2. Множественная регрессионная модель динамики очагов

Для дальнейшего повышения точности прогнозных моделей необходима оценка дополнительных показателей и использование методов анализа многомерных временных рядов. При создании моделей множественной регрессии важным является поиск независимых переменных с минимальной корреляцией между ними. Для этого использовали такой показатель, как коэффициент изменения очагов (например, отношение площадей в году  $k$  и  $k-1$ ):

$$P_k = 0,538 + 0,735P_{k-1} + 0,235 (P_{k-1}/P_{k-2}), R^2 = 0,608, \quad (4.9)$$

где  $P$  – площади очагов в году  $k-n$  (lg).

Коэффициент корреляции между площадями очагов в году  $k$  и  $k-1$  равен 0,78, между  $P_k$  и  $(P_{k-1}/P_{k-2})$  –  $r = 0,37$ . То есть площадь очага в основном зависит от его величины в предыдущем году и в меньшей степени от интенсивности ее изменения. Наличие корреляции между показателями (независимыми переменными) не повышает существенно точность множественной регрессии. Такую же долю дисперсии независимой переменной объясняет и модель авторегрессии второго порядка.

Динамика популяции непарного шелкопряда определяется комплексом факторов, среди которых большое значение имеют метеорологические условия. Для их характеристики использовали показатели солнечной активности (среднее значение чисел Вольфа за май-июль) (рис. 15). Площадь очагов в году  $n$  наиболее тесно коррелирует с числами Вольфа в году  $n-2$ . Коэффициент корреляции оказался равным: Ульяновская обл. -  $r = -0,44$ , Саратовская обл. -  $r = -0,45$ , Воронежская обл. -  $r = -0,50$ , Пензенская обл. -  $r = -0,35$ , Челябинская обл. -  $r = -0,30$ , Татария -  $r = -0,41$ , Башкирия -  $r = -0,46$ . Для Пензенской и Волгоградской областей площадь очагов более тесно коррелировала с солнечной активностью в году  $n-4$ , коэффициенты корреляции равны соответственно -0,45 и -0,37. Связь между этими показателями достоверна для всех рассмотренных областей России. Включение индекса Вольфа в модель авторегрессии площадей очагов повышает ее точность. Для Воронежской обл. модель имеет вид:

$$P_k = 2,896 + 0,624P_{k-1} - 1,084W, \quad r = 0,738 \quad (4.10)$$

где:

$P$  – площади очагов в году  $k$  и  $k-1$  (lg);

$W$  – средний индекс Вольфа за май-июль (lg) в году  $k-2$ .

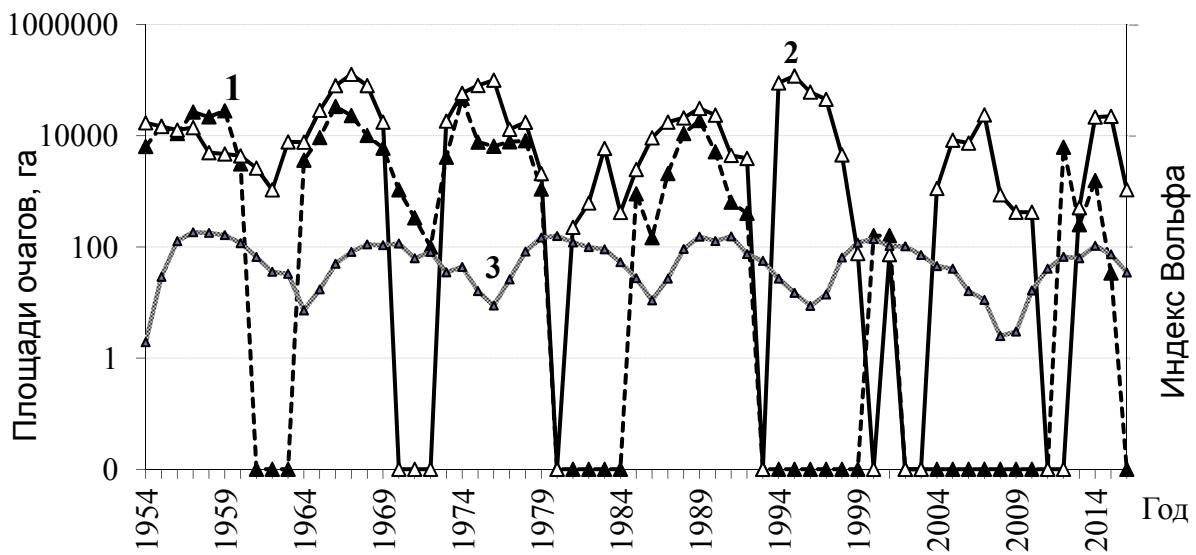


Рис. 15. Динамика площади очагов непарного шелкопряда в Воронежской (1), Саратовской (2) областях и солнечной активности (3)

Оценка точности прогнозов по разработанным моделям показывает, насколько важно учитывать такие изменения в структуре временных рядов площадей очагов, как возникновение тренда в амплитуде или в периодичности колебаний. Без этого существенно снижается эффективность средне- и долгосрочного прогнозирования очагов с применением рассмотренного нами метода анализа одномерных временных рядов. Рациональным решением задачи является ежегодная разработка и постоянная корректировка прогнозов. Возможно среднесрочное прогнозирование методом экспоненциального сглаживания.

Предлагаемая система простых моделей при последовательном их использовании позволяет существенно повысить эффективность прогнозирования. Причем это происходит в большей степени не за счет оценки дополнительных показателей, а благодаря ведению достаточно простых, но постоянных наблюдений (мониторинг), включению в действие более адекватных методов анализа и компьютерной обработки данных по про-

граммам, автоматизирующим построение и постоянную адаптацию моделей. Использование моделей для долгосрочного прогнозирования изменения площадей очагов адекватно при стационарности процесса (колебания с выраженной периодичностью или наличие устойчивой тенденции в динамике очагов).

Прогноз периода роста очагов, полученный по сезонной модели, корректируется по моделям регрессии. Последние становятся основным инструментом прогнозирования динамики площадей очагов во время вспышки массового размножения.

Модель авторегрессии более эффективна для среднесрочного (на 2-3 года вперед) прогнозирования. Существенное повышение точности прогнозов по простым моделям требует постоянного получения новой лесопатологической информации для корректировки их параметров, то есть адаптивного подхода.

#### **4.3. Авторегрессионная модель динамики численности**

Методы анализа временных рядов достаточно эффективны и для долгосрочного и среднесрочного прогноза численности насекомых. Модель многолетней динамики численности непарного шелкопряда основана на результатах учетов плотности популяции насекомого на стационарных участках в Базарно-Карабулакском лесхозе Саратовской обл. Ряд ежегодных средних оценок численности кладок непарного шелкопряда был преобразован в логарифмы. Затем провели сглаживание (взвешивание) исходных данных методом скользящих средних с 5-летним интервалом усреднения полиномом второго порядка (рис. 16).

Для характеристики внутренней структуры ряда (1975-2000 гг.) рассчитали сериальные корреляции (автокорреляции) между членами ряда, разделенными (k-1) наблюдениями:

$k$	1	2	3	4	5	6	7	8
$r_k$	0,774	0,324	-0,145	-0,458	-0,534	-0,374	-0,106	-0,087

Изменение плотности популяции подчиняется определенной закономерности. Положительные значение коэффициентов автокорреляции свидетельствуют о колебательном процессе с преобладанием длинных волн.

После анализа и корректировки выборочных оценок плотности популяции за 1975-1998 гг. провели подбор типа модели. Наиболее адекватной оказалась авторегрессия второго порядка. Используя компьютерную программу, рассчитали коэффициенты модели:

$$Y = -0,265 + 1,595x_1 - 0,935x_2; \quad R^2 = 0,771 \quad (4.11)$$

где:

$Y$  – число кладок на дерево (lg) осенью года  $n+1$ ;

$x_1$  – число кладок на дерево (lg) в году  $n$ ;

$x_2$  – число кладок на дерево (lg) в году  $n-1$ .

По модели (4.11) рост плотности популяции начался в 2001 г. в действительности и в этот, и в следующий год численность еще снижалась (рис. 16). Поэтому после учета кладок яиц непарного шелкопряда в 2002 г. модель и прогноз скорректировали.

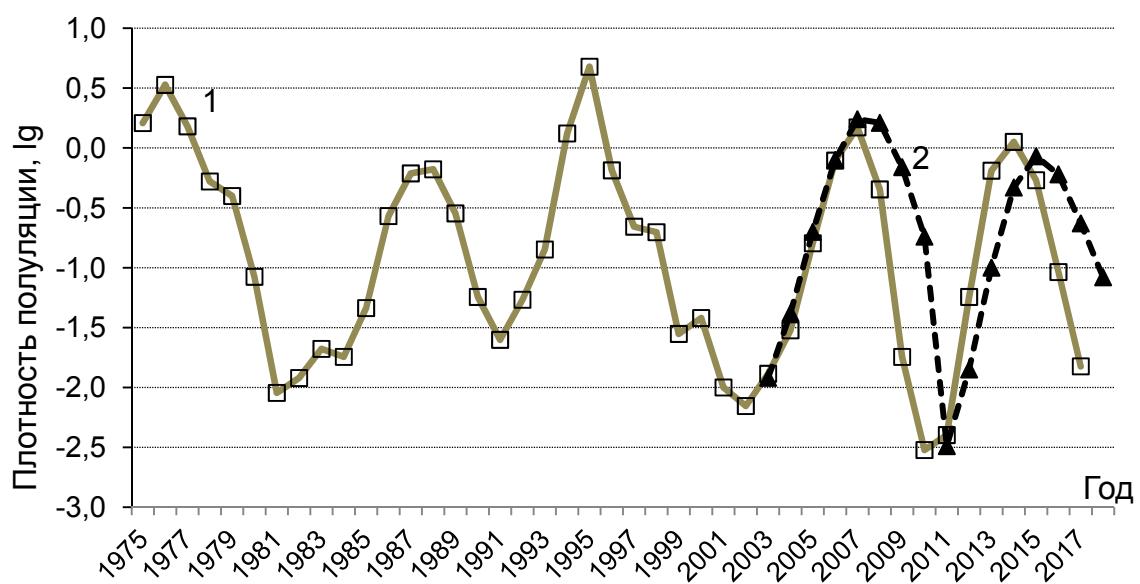


Рис. 16. Прогноз динамики плотности популяции непарного шелкопряда в Саратовской обл. по модели авторегрессии: среднее число кладок на дерево осенью 1975-2017 гг. (1); прогноз числа кладок, разработанный в 2002 и 2011 гг. (2)

На 2003-2010 гг. адекватной является следующая модель:

$$Y = -0,277 + 1,65x_1 - 0,966 x_2; \quad R^2 = 0,796 \quad (4.12)$$

Она более точная (объясняет 79,6 % дисперсии плотности популяции). Прогнозные оценки в течение 5 лет (2003-2007 гг.) практически совпадают с реальными (рис. 16).

На этапе снижения численности непарного шелкопряда (2008-2010 гг.) ошибка прогноза существенно увеличилась. Поэтому вновь провели уточнение прогнозной модели на следующий период (2011-2017 гг.):

$$Y = -0,332 + 1,365x_1 - 0,766 x_2; \quad R^2 = 0,741 \quad (4.13)$$

Эта модель достаточно точно прогнозирует нарастание численности непарного шелкопряда. Однако заметно существенное запаздывание прогнозируемой динамики численности насекомого относительно реального ее изменения. Это обусловлено сокращением длительности двух последних массовых размножений примерно на 2 года. Чтобы учесть эту тенденцию и уточнить прогноз, будем определять параметры модели, включая в анализ только данные 2001-2017 гг. а не весь временной ряд.

## 5. Краткосрочный прогноз дефолиации деревьев

Методы краткосрочного прогнозирования повреждения ассимиляционного аппарата основаны на использовании соотношения между плотностью популяции вредителя и обусловленной ею (наблюдаемой) дефолиацией. Значения определяются экспериментально для насаждений разного возраста. Также дефолиацию можно оценить, зная запас корма в насаждении, численность насекомых и кормовую норму, т.е. количество листвы, уничтожаемое одной особью в течение фазы гусеницы при избытке корма.

## 5.1. Оценка дефолиации с использованием критических чисел

Для прогноза степени объедания насаждений по данным учета непарного шелкопряда определяем среднее количество яиц на дерево. Затем по таблице А. И. Ильинского [16] для данного возраста насаждений устанавливаем количество яиц вредителя, при котором наиболее вероятно полное объедание насаждений (критические числа):

Возраст дерева, лет	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
Яйца, шт.	150	350	550	800	1 000	1 300	1 700	2 200	2 800	3 300

Степень объедания насаждений в следующем году определяем, разделив учтенную численность яиц на табличную. Например, средняя численность непарного шелкопряда на 1 дерево в 50-летней дубраве 500 яиц. Следовательно, дефолиация будет около 50 % (500/1000).

Для краткосрочного прогнозирования степени объедания непарным шелкопрядом порослевых дубрав [6, 12] рекомендуем уравнение, которое имеет вид:

$$\lg d = 0,989 + 0,492 \lg x; \quad (5.1)$$

где:

$d$  – степень объедания, %;

$x$  – количество яиц на 100 точек роста.

Прогнозная модель составлена по экспериментальным данным в развитие метода критических чисел. Использование экологической плотности популяции (универсальной единицы учета) позволяет учесть различия в биомассе листвы насаждений разного возраста, что повышает точность прогноза. По модели (5.1) рассчитаны прогнозные оценки дефолиации дубрав при разной численности вредителя:

Число яиц на 100 точек роста, шт.	1,1	4,3	9,8	17,6	27,7	40,2	55,0	72,1	91,6	113,5
Дефолиация, %	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100

Методика составления уравнений основывается на сравнении плотности популяции насекомых осенью и последующей дефолиации на-

саждений в широком диапазоне варьирования. Эти уравнения отражают реальные зависимости и имеют криволинейную форму связи между численностью насекомых и степенью обедания листьев деревьев.

Приведем некоторые коэффициенты для перевода количества зеленой массы, выраженной в одних единицах, в другие. При оценке численности на унифицированную единицу 100 точек роста ( побегов текущего года) учитывали диаметр дерева и использовали уравнение, полученное по эмпирическим данным:

$$y = 38,9d + 7,2d^2, \quad (5.2)$$

где:

у – количество побегов в кроне дерева, шт.;  
d – средний диаметр деревьев на участке, см.

Для порослевых дубрав Европейской России установили следующее соотношение между возрастом, диаметром дерева и количеством побегов текущего года:

Диаметр, см	3,6	7	10,4	14,1	17,1	21,1	24,2	26,8	28,9	30,6
Возраст, лет	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
Точки роста, шт.	233	625	1 183	1 979	2 770	4 026	5 158	6 213	7 138	7 932

По результатам расчетов, на 100 точек роста приходится в среднем 460 листьев. Масса листа в среднем равна 0,34 г (по данным Ф. Н. Семевского [23] – 0,4 г), фитомасса 100 точек роста равна 157,1 г (по данным Ф. Н. Семевского – 184 г) сырого веса листьев.

## 5.2. Метод кормовых норм

Методика производственного прогнозирования дает возможность приблизенно оценить количество зеленой массы, уничтоженной средней гусеницей в условиях нормальной смертности при избытке корма [23]. Реальная кормовая норма ( $r_m$ ) определяется выражением:

$$r_m = 1,35 t_{cp} (r_k W + r_o), \quad (5.3)$$

где:

$t_{cp}$  – половина периода развития гусеницы (число возрастов, деленное пополам);

$r_k$  – кормовая норма вредителя в сырой массе листвы или хвои, г;

$W$  – выживаемость гусениц, доли единицы;

$r_o$  – пищевой эквивалент биомассы отродившейся гусеницы, г.

Выживаемость гусениц можно получить приближенно на основе модели [17]:

$$\lg W = (0,89 - \lg P) + \lg \sqrt{N/N_{n-1}} \text{ – для особей, не мигрирующих в фазе гусеницы}$$

$$\lg W = (0,43 - \lg P) + \lg \sqrt{N/N_{n-1}} \text{ – для особей, мигрирующих в фазе гусеницы}$$

где:

$W$  – выживаемость гусениц;

$P$  – плодовитость;

$N/N_{n-1}$  – отношение плотностей гусениц данной и предыдущей генерации.

Плодовитость насекомых можно получить прямым подсчетом либо косвенно, на основе литературных данных. Кормовая норма ( $r_k$ ) непарного шелкопряда, полученная расчетным путем, составляет 6,86. Количество возрастов гусениц, дающих самцов и самок, равно 6 и 5 соответственно.

Наиболее вероятная степень повреждения ассимиляционного аппарата определяется выражением:

$$f = r_m \times N_0, \quad (5.4)$$

где:

$f$  – степень повреждения кроны, %;

$r_m$  – реальная кормовая норма;

$N_0$  – плотность гусениц 1-го возраста на 100 г. листвы.

Достоверность предложенного метода зависит от точности определения выживаемость гусениц (параметр  $W$  в уравнении 5.3) при различном уровне плотности популяции. Ожидаемая степень повреждения крон в зависимости от численности гусениц первого возраста на 100 г листвы составляет:

Число гусениц, шт.	1,97	3,94	5,91	7,87	9,84	11,81	13,78	15,75	17,72	19,69
Дефолиация, %	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100

Полное обедание (75 % и более) дубовых насаждений происходит при 14,8 гусениц 1-го возраста непарного шелкопряда на 100 г листвы.

С учетом снижение кормовой нормы в результате конкуренции за пищу А. В. Голубев [15, 17] установил следующее соотношение для прогнозирования повреждения деревьев по плотность гусениц первого возраста непарного шелкопряда на 100 г листвы:

Число гусениц, шт.	1,53	3,37	5,2	7,45	10,1	13,35	17,55	23,46	33,56	67,12
Дефолиация, %	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100

Полное обедание (75% и более) дубовых насаждений происходит при 20,5 гусениц первого возраста непарного шелкопряда на 100 г листвы.

После оценки количества зеленой массы, которое может уничтожить популяция вредного насекомого, необходимо оценить зеленую массу насаждения или дерева. Определить это напрямую зачастую невозможно. Для этого используются средние величины массы листьев в насаждениях разного возраста (диаметра). В зависимости от диаметра на 1,3 м масса листьев дуба меняется от 1,93 до 12,14 кг [15], число листьев – от 5,67 тыс. до 35,7 тыс. шт. [23]. Полученные оценки приведены в табл. 15.

Таблица 15. Число листьев и их масса на деревьях разного диаметра

Диаметр, см	Число листьев	Масса, г	Диаметр, см	Число листьев	Масса, г
10	5 670	1 930	22	18 900	6 430
12	7 350	2 500	24	23 100	7 850
14	9 070	3 080	26	27 300	9 280
16	11 130	3 780	28	31 500	10 710
18	13 440	4 570	30	35 700	12 140
20	16 170	5 500			

Используются также таблицы фитомасс, составленные для насаждений разного возраста основных лесных формаций России [15]. Для дуба в широколиственных лесах Русской равнины масса листьев изменяется от 0,378 до 21,261 кг соответственно в насаждениях 10 и 260 лет (табл. 16). Зная массу листьев в насаждениях разного возраста, и что для дефолиации 75% и более достаточно 14,8 (20,5) гусениц первого возраста на 100 г листвы, определяем количество гусениц на дерево. Например,

для 40-летней дубравы (табл. 16) оно равно:  $(4 \ 227,7 \times 14,8) / 100 = 625,7$  гусениц. Для определения количества яиц на дерево считаем, что только из 75% яиц выходят гусеницы. Разделив 625,7 на 0,75, получаем 834,3 яйца; этой численности достаточно для сильной дефолиации 40-летних деревьев (табл. 16).

**Таблица 16. Количество непарного шелкопряда на дереве, достаточное для полного объедания (75% и более) дубовых насаждений 10–260-летнего возраста**

Возраст, лет	Фитомас-са, г	А. В. Голубев [15]		Ф. Н. Семёвский [23]		Методы, [15] гусениц
		яиц	гусениц	яиц	гусениц	
10	378,3	103,4	77,6	74,7	56,0	55,1
20	1 324,4	362,0	271,5	261,3	196,0	193,1
40	4 227,7	1 155,6	866,7	834,3	625,7	616,3
60	7 182,7	1 963,3	1 472,5	1 417,4	1 063,0	1 047
80	10 177,1	2 781,7	2 086,3	2 008,3	1 506,2	1 483,5
100	12 477,1	3 410,4	2 557,8	2 462,1	1 846,6	1 818,8
120	14 773,8	4 038,2	3 028,6	2 915,4	2 186,5	2 153,6
140	16 355,2	4 470,4	3 352,8	3 227,4	2 420,6	2 384,1
160	17 991,3	4 917,6	3 688,2	3 550,3	2 662,7	2 622,6
180	18 721,8	5 117,3	3 838,0	3 694,4	2 770,8	2 729,1
200	19 811,2	5 415,1	4 061,3	3 909,4	2 932,1	2 887,9
220	20 285,9	5 544,8	4 158,6	4 003,1	3 002,3	2 957,1
240	21 087,9	5 764,0	4 323,0	4 161,3	3 121,0	3 074
260	21 261,1	5 811,4	4 358,5	4 195,5	3 146,6	3 099,3

## 6. Прогноз необходимости защитных мероприятий

Борьба с вредными насекомыми должна назначаться, когда экономические потери в результате повреждения ассимиляционного аппарата превышают стоимость борьбы. Для прогноза целесообразности назначения защитных мероприятий рекомендуем использовать в качестве основных критериев оценку предстоящего усыхания в насаждениях (отпада деревьев) и потерь прироста.

Кроме того, необходимо учитывать фазы массового размножения. Обработка насаждений инсектицидами является своевременной и эффективной, если она запланирована на последний год (последнее поко-

ление) второй фазы (роста численности) или в первый год (первое поколение) третьей фазы (максимума, эруптивной, кульминации) вспышки массового размножения непарного шелкопряда. На фазе кризиса применять инсектициды для ликвидации очагов, как правило, нецелесообразно. Вопросы прогнозирования фаз массового размножения изложены в разделе 2.2. Рассмотрим алгоритмы и модели прогноза потерь прироста и усыхания насаждений.

## 6.1. Прогнозирование потерь прироста деревьев

Потери прироста лиственных пород не обнаруживают различий, связанных с видом насекомых, и близки к отношению расхода органического вещества на построение листьев к расходам на построение древесины, которое составляет около 67%. Так, средняя величина потерь прироста дуба волях текущего прироста при сильном (90%) обедении равна 0,586 [15, 23]. Для прогноза потери прироста по степени дефолиации используем уравнение А. В. Голубева [15, 17]:

$$Y = K \frac{X}{100}, \quad (6.1)$$

где:

Y – потери прироста по объему волях единицы;

X – потери листвы или хвои, %;

K – коэффициент (средняя потеря прироста) в очагах непарного шелкопряда равен 0,42.

Используя уравнение, можно подсчитать потери прироста дуба при любой степени повреждения кроны. На следующий год, если снова имело место обедение насаждения, потери прироста вычисляются аналогично.

Приведенную модель потерь прироста в целом подтверждают данные, полученные нами в комплексных очагах листогрызущих вредителей в порослевых дубравах Саратовской обл. Коэффициент K (средняя потеря прироста) при сильной дефолиации достигает 0,52 (52%), а при дефолиации в течение 2 лет происходит потеря полного годичного прироста. Совместное массовое размножение насекомых разных фенологиче-

ских групп наиболее опасно для дубрав, так как до максимума увеличивается период, в течение которого ежегодно наблюдается дефицит асимиляционной поверхности, и возрастает кратность повреждений.

## 6.2. Прогнозирование усыхания дубрав в очагах

Для прогноза усыхания древостоев используется модель А. В. Голубева [15, 17], описывающая зависимость отпада деревьев от запаса пластических веществ. По модели, полная потеря запаса пластических веществ в насаждении приводит к гибели 50 % деревьев. Это происходит при суммарной степени дефолиации 300 % (насекомые летней фенологической группы). Уравнение в измененной нами форме позволяет прогнозировать отпад в насаждениях, поврежденных насекомыми весенне-летней фенологической группы:

$$Y_{DH} = \mu_\beta 100(0,03D_1^3 + 0,09D_2^2 + 0,38D_3^{1,5}) \quad (6.2)$$

где:

$Y_{DH}$  – степень усыхания дубовых насаждений, %;

$D_i$  – дефолиация в текущем и предыдущие ( $D_2, D_3$ ) годы повреждения, доли единицы;

$\mu_\beta$  – возрастной коэффициент (= 1).

Весенне-летняя группа включает насекомых, повреждающих деревья весной и в первую половину лета (непарный шелкопряд, кольчатый шелкопряд, дубовая хохлатка). В комплексных очагах при комбинированном объединении (и весной, и летом) отпад деревьев наиболее сильный. Для его оценки по экспериментальным данным нами разработана модель. Связь между оценками степени дефолиации ( $X$ ) средневозрастных порослевых дубрав и величиной патологического отпада ( $Y$ ) в очагах зеленой дубовой листовертки и непарного шелкопряда адекватно описывается степенная функция:

$$Y = 0,001X^{1,8642} \quad (6.3)$$

Используя модели, рассчитали прогнозные величины отпада в очагах листогрызущих насекомых (табл. 17).

**Таблица 17. Усыхание деревьев дуба в насаждении в зависимости от суммарной степени обедания листьев, %**

Суммарная дефолиация	Доля усыхающих и усохших деревьев		Суммарная дефолиация	Доля усыхающих и усохших деревьев	
	модель (6.3)	модель (6.2)		модель (6.3)	модель (6.2)
40	0	0	180	16,0	9
60	2,1	0	200	19,5	12
80	3,5	2	220	23,3	15
100	5,4	3	240	27,4	22
120	7,5	4	260	31,8	29
140	10,0	5	280	36,5	38
160	12,9	7	300	41,5	50

Разработанная нами модель (6.3) более реалистично описывает патологический отпад при суммарной дефолиации 200-240%, так как модель (6.2) с запаздыванием фиксирует качественный скачок в усилении интенсивности отпада и занижает его величину.

### 6.3. Пороги вредоносности

При повреждении дубрав непарным шелкопрядом и другими насекомыми весенне-летней группы массовое усыхание наиболее вероятно при сильной дефолиации в течение 2-3 лет. Патологический отпад начинает превышать естественный (3-5%) при однократной сильной дефолиации дубрав. Поэтому дефолиация 75% и более является пороговой.

Сильное обедание (75% и более) дубовых насаждений происходит при 14,8 [23] или 20,5 [15] гусениц первого возраста непарного шелкопряда на 100 г листвы. Так как прогноз дефолиации осуществляется по данным учета яиц, то соответствующее их количество определяется как частное от деления числа гусениц на величину выживаемости яиц ( $14,8/0,75 = 19,73$  и  $20,5/0,75 = 27,33$ ). Средняя оценка выживаемости яиц – 75%. Количество яиц или гусениц первого возраста непарного шелкопряда на дереве, достаточное для полного обедания дубовых насажде-

ний разного возраста (см. табл. 16), определяем как произведение фитомассы соответственно на 0,148 и 0,1973 (модель Ф. Н. Семевского [23]) или на 0,205 и 0,2733 (модель А. В. Голубева [15, 17]). Критическая численность непарного шелкопряда по первой модели на 27,8% меньше, чем по второй. В Методах мониторинга вредителей и болезней леса [15] предложены наименьшие оценки критической численности (см. табл. 16). Это свидетельствует о том, что в указанном справочнике рекомендуется использовать более низкий порог для назначения мероприятий по локализации и ликвидации очагов.

Для сравнительного анализа пороговые значения плотности популяции непарного шелкопряда, установленные по 4-м моделям, приведены в табл. 18.

**Таблица 18. Количество яиц непарного шелкопряда на дерево, достаточное для сильного объедания (75 % и более) дубовых насаждений**

Возраст дерева, лет	Критическая численность по модели		Возраст дерева, лет	Критическая численность по модели	
	А. И. Ильинский [16]	В. С. Знаменский [6, 12]		Ф. Н. Семевский	А. В. Голубев
10	112,5	192	10	75	103
20	262,5	375	20	261	362
30	412,5	564	40	834	1 156
40	600	864	60	1 417	1 963
50	750	1 233	80	2 008	2 782
60	975	1 662	100	2 462	3 410
70	1 275	2 214	120	2 915	4 038
80	1 650	2 727	140	3 227	4 470
90	2 100	3 141	160	3 550	4 918
100	2 475	3 537	180	3 694	5 117
			200	3 909	5 415

		220	4 003	5 545
--	--	-----	-------	-------

Оценки критической численности непарного шелкопряда довольно сильно отличаются. Рекомендовать конкретный способ корректировки моделей можно по результатам более широкой опытно-производственной проверки. Для назначения работ по локализации и ликвидации очагов в настоящее время рекомендуем использовать справочник [15] и таблицу «критических чисел» А. И. Ильинского [16]. Они являются базовыми, так как включены в нормативные документы. Однако предлагаем использовать не численность гусениц [15], а количество яиц непарного шелкопряда, так как они учитываются непосредственно (табл. 19).

**Таблица 19. Количество яиц непарного шелкопряда на дерево, достаточное для сильного объедания (75 % и более) дубовых насаждений различных формаций**

Возраст, лет	Количество яиц на дерево, шт., для основных дубовых формаций						
	1	2	3	4	5	6	7
10	35,7	55,9	73,5	66,4	74,7	36,1	70,8
20	127,7	186,0	257,5	239,6	263,9	114,1	265,3
40	377,7	578,3	821,7	741,6	779,1	328,7	822,3
60	654,3	1 006,9	1396,0	1 279,1	1 342,3	550,7	1 421,2
80	918,3	1 356,5	1978,0	1 767,7	1 819,7	749,2	1 976,4
100	1 151,6	1 731,9	2425,1	2 206,3	2 293,3	927,7	2 505,3
120	1 332,4	2 002,9	2871,5	2 558,4	2 648,3	1 059,1	2 887,3
140	1 453,5	2 251,1	3178,8	2 870,9	2 957,2	1 181,1	3 256,7
160	1 599,2	2 410,3	3496,8	3 102,4	3 144,7	1 278,8	3 566,9
180	1 665,9	2 589,1	3638,8	3 308,7	3 382,1	1 332,8	3 735,9
200	1 765,6	2 677,2	3850,5	3 461,7	3 516,7	1 408,1	3 938,3

Формации: 1 – хвойно-широколиственные леса Среднеевропейской провинции; 2 – широколиственные леса Среднеевропейской провинции; 3 – широколиственные леса Скандинавско-Русской провинции; 4 – лесостепь Скандинавско-Русской провинции; 5 – степь Скандинавско-Русской провинции; 6 – дубравы Причерноморья; 7 – хвойно-широколиственные леса Дальнего Востока (даны в редакции Справочника [15]).

Приведенные в табл. 18 и 19 оценки критической численности непарного шелкопряда являются экономическими порогами вредоносности. При такой численности целесообразно применять инсектициды, так как стоимость работ не будет превышать общий ущерб от повреждения насажде-

ний насекомым. Исходя из закономерностей распределения кладок яиц непарного шелкопряда и приведенных в табл. 18 порогов вредоносности [6], составлен последовательный план их учета при обследовании очагов и выделении участков для назначения защитных мероприятий (применение инсектицидов). Этот план в 2 раза экономичнее других способов учета. Он позволяет выделять участки с высокой плотностью популяции вредителя с необходимой точностью и достоверностью по результатам учета кладок яиц на минимально допустимом количестве деревьев (табл. 20).

**Таблица 20. План последовательного учета кладок яиц непарного шелкопряда при обследовании насаждений**

Кол-во деревьев, шт.	Количество кладок, шт., при возрасте насаждений, лет									
	30		40		50		60		70	
	$d_B$	$d_H$	$d_B$	$d_H$	$d_B$	$d_H$	$d_B$	$d_H$	$d_B$	$d_H$
10	19	2	26	6	34	11	44	18	57	26
15	25	7	34	14	46	23	60	34	78	46
20	30	13	42	22	58	34	75	49	98	67
25	35	18	50	30	69	46	91	64	119	88
30	41	23	58	38	81	58	106	80	139	108
35	46	28	66	46	92	69	122	95	160	129
40	51	34	74	54	104	81	138	110	181	150
45	56	38	82	62	115	92	153	126	202	170
50	62	44	91	70	126	104	168	142	222	191

Примечание.  $d_B$  – минимальное количество кладок яиц непарного шелкопряда на осмотренных деревьях, соответствующее высокой численности и требующее применения инсектицидов.

$d_H$  – максимальное количество кладок яиц на осмотренных деревьях, соответствующее низкой численности.

Например, после осмотра 10 деревьев в 60-летнем насаждении III класса бонитета обнаружено 39 кладок непарного шелкопряда. Эта оценка попадает в зону неопределенности (больше 18, но меньше 44 кладок). Осмотр необходимо продолжить дальше. Если на следующих 5 деревьях учтено 18 кладок, а в сумме 57, то эта оценка также находится в зоне неопределенности. Осматриваем еще 5 деревьев, обнаруживаем 18 кладок. Учет прекращаем, так как 75 кладок яиц на 20 деревьях в 60-летнем на-

саждении достоверно свидетельствует о высокой численности непарного шелкопряда и необходимости защитных мероприятий.

## 6.4. Прогноз сроков защитных обработок

Гусеницы выходят из состояния диапаузы и начинают развиваться, когда среднесуточная температура достигает 6 °С и выше. Сумма эффективных температур, необходимая для весеннего дозревания яиц непарного шелкопряда, равна 110 °С. Продолжительность доразвития (Д) определяем по формуле:

$$Д = 110 / \sum(T_n - T_0), \quad (6.4)$$

где:

$T$  – среднесуточная температура;

$T_0$  – порог развития (биологический минимум), равный 6°С.

Для определения даты выхода гусениц из яиц используем среднесуточные температуры – средние многолетние и (или) из прогноза погоды и корректируем по данным метеонаблюдений. Ежедневно суммируем эффективные температуры ( $T_n - 6$ ), пока сумма не достигнет 110°С.

Оптимальный срок применения инсектицидов наступает в среднем через 10 суток после отрождения гусениц, когда они будут переходить во 2-й возраст. Сумма эффективных температур для их развития составляет около 120°С. Продолжительность развития гусениц корректируем по ежедневным оценкам среднесуточной температуры, уменьшенным на порог развития (6°С). В табл. 20 приведен расчет сроков опрыскивания дубрав по сумме эффективных температур для района Саратова весной 2012 г.

Таблица 20. Расчет сроков опрыскивания дубрав по сумме эффективных температур

Число апреля	Среднесуточная температура, °С	Сумма эффективных температур, °С	Число апреля	Среднесуточная температура, °С	Сумма эффективных температур, °С
--------------	--------------------------------	----------------------------------	--------------	--------------------------------	----------------------------------

8	7,5	1,5	19	19,2	102,6
9	10	5,5	20	19,3	115,9
10	13	12,5	21	19,2	129,1
11	14,8	21,3	22	18,8	141,9
12	13,1	28,4	23	17,3	153,2
13	12,8	35,2	24	16,9	164,1
14	13,5	42,7	25	18,8	176,9
15	14,8	51,5	26	19,7	190,6
16	16,8	62,3	27	20,6	205,2
17	20,1	76,4	28	18,4	217,6
18	19	89,4	29	21,5	233,1

В этот год апрель был рекордно теплым (средняя месячная температура 13,6°С), поэтому гусеницы стали выходить из яиц уже в начале 3-й декады. Расчетный и реальный сроки отрождения гусениц совпали. В этом случае требуется проводить обработки оперативно уже в начале мая.

Используя электронные таблицы и несложные компьютерные программы, можно автоматизировать процесс краткосрочного прогноза, рассчитывать несколько сценариев и более обоснованно планировать сроки проведения защитных мероприятий.

## Заключение

Для повышения эффективности прогнозирования предложена адаптивная система алгоритмов и прогнозных моделей, включающая набор таблиц, диаграмм, классификационных критериев и формул, оценивающих угрозу возникновения очагов, повреждения и усыхания деревьев.

Разработка лесозащитных прогнозов невозможна без получения информации, ее накопления в базах данных и полноценного анализа. Основными источниками ретроспективной лесопатологической информации являются статистическая и ведомственная отчетность по защите леса и материалы стационарных научных исследований.

Многолетние материалы учета очагов насекомых достаточно информативны для пространственно-временного анализа их распространения и прогноза динамики площадей очагов по всем регионам России. Для классификации территории по степени лесопатологической угрозы получены оценки встречаемости (доли лет с очагами).

Площадь очагов и плотность популяции непарного шелкопряда коррелируют между собой. Поэтому данные инвентаризации очагов можно использовать как информационную основу прогнозирования с учетом погрешности, связанной с субъективной оценкой площадей.

Многие временные ряды площадей очагов имеют сложную структуру, тренд (устойчивую тенденцию) не только в амплитуде колебаний, но и их периодичности. Эти нарушения стационарности процесса должны учитываться при выборе прогнозирующих моделей в первую очередь.

Требуется повышать точность (объективность) оценки площадей очагов при ведении лесопатологического мониторинга и создавать (расширять) базу данных площадей очагов по лесничествам. Разработана система методов корректировки этих данных при их анализе.

Для прогноза массовых размножений наиболее эффективны фазо-

вые портреты многолетней динамики численности насекомого. Их можно использовать тремя способами. Первый и более универсальный - определять положение текущих популяционных параметров (численность и коэффициент размножения) относительно существующей фазовой траектории. Второй – по фазовой траектории (см. рис. 5) определять пороговую линию и пороговые значения численности и коэффициента размножения, превышение которых указывает на наличие и степень угрозы массового размножения насекомого. Третий – для прогноза интенсивности вспышек сопоставлять фазовые портреты различных массовых размножений или для разных регионов.

Необходимо использовать специализированные компьютерные программы, например анализа временных рядов. Это позволяет рассчитывать параметры прогнозных моделей, проводить их экспертизу и выбирать наиболее адекватные варианты. Программа дает возможность в режиме реального времени корректировать модели при получении новых данных или рассчитывать различные прогнозные сценарии. Это позволяет автоматизировать процесс и ежегодно уточнять прогнозы, используя простые модели и минимальное количество информации.

Для автоматизации процесса краткосрочного прогноза степени дефолиации и необходимости применения инсектицидов также нужна компьютерная программа. Это позволит рассчитывать несколько сценариев и более обоснованно планировать объемы и сроки проведения защитных мероприятий.

## Список использованных источников

1. **Берриман, А.** Защита леса от насекомых-вредителей : [пер. с англ.] / А. Берриман. – М. : Агропромиздат, 1990. – 288 с.
2. **Воронцов, А. И.** Технология защиты леса / А. И. Воронцов, Е. Г. Мозолевская, Э. С. Соколова. – М. : Экология, 1991. - 304 с.
3. **Демаков, Ю. П.** Защита растений. Жизнеспособность и жизнестойкость древесных растений : учеб. пособ. – Йошкар-Ола : МарГТУ, 2002. – 76 с.
4. **Знаменский, В. С.** Прогноз целесообразности борьбы с вредными лесными насекомыми : экспресс-информ. / В. С. Знаменский, А. Н. Белов. – М. : ЦБНТИлесхоз – 1980. – Вып. I. – 17 с.
5. **Знаменский, В. С.** Метод учета численности непарного шелкопряда в разреженных популяциях / В. С. Знаменский, Н. И. Лямцев, Л. А. Полякова // Лесн. хоз-во. – 1981. – № 6. – С. 49–51.
6. **Знаменский, В. С.** Рекомендации по надзору за непарным шелкопрядом / В. С. Знаменский, Н. И. Лямцев, Е. Н. Новикова. – М. : ВНИИЛМ, 1982. – 46 с.
7. **Знаменский, В. С.** Индикаторы массового размножения непарного шелкопряда / В. С. Знаменский, Н. И. Лямцев // Лесн. хоз-во. – 1985. – № 2. – С. 60–62.
8. **Знаменский, В. С.** Особенности динамики численности непарного шелкопряда в комплексных очагах листогрызущих насекомых / В. С. Знаменский, Н. И. Лямцев // Защита леса от вредных насекомых и болезней : сб. науч. тр. – М.: ВНИИЛМ, 1990. – С. 11–21.
9. **Ильинский, А. И.** Организация надзора за хвое- и листогрызущими вредителями в лесах и прогнозирование их массовых размножений / А. И. Ильинский // Защита леса от вредителей и болезней. – М. : Сельхозгиз, 1961. – С. 57–96.
10. Популяционная динамика лесных насекомых / А. С. Исаев, Р. Г. Хлебопрос, Л. В. Недорезов [и др.]. – М. : Наука, 2001. - 374 с.
11. **Кендэл, М.** Временные ряды : [пер. с англ.] / М. Кендэл. – М. : Финансы и статистика, 1981. – 199 с.
12. **Лямцев, Н. И.** Прогноз динамики численности основных видов фитофагов // Методы мониторинга вредителей и болезней леса : справоч. – Т. 3. – М. : ВНИИЛМ, 2004. – С. 121–141.
13. **Лямцев, Н. И.** Динамика численности непарного шелкопряда в лесостепных дубравах Европейской России. – Пушкино : ВНИИЛМ, 2013. – 98 с.

14. **Лямцев, Н. И.** Влияние климата и погоды на динамику численности непарного шелкопряда в европейской России / Н. И. Лямцев, А. С. Исаев, Н. В. Зукерт // Лесоведение. – 2000. – № 1. – С. 62–67.
15. Методы мониторинга вредителей и болезней леса : справоч. – Т. 3 / под. общ. ред. В. К. Тузова. – М. : ВНИИЛМ, 2004. – 200 с.
16. Надзор, учет и прогноз массовых размножений хвое- и листогрызущих насекомых в лесах СССР / А. И. Ильинский [ред.]. – М. : Лесн. пром-сть, 1965. – 525 с.
17. Наставление по надзору, учету и прогнозу хвое- и листогрызущих насекомых в европейской части РСФСР. – М. : 1988. – 85 с.
18. Обзор санитарного состояния лесов России за 1993 год / составители А. Н. Бобринский, Т. Е. Гендель, В. В. Караваев [и др.]. – М. : Росагросервис, 1994. – 130 с.
19. Обзор санитарного и лесопатологического состояния лесов Российской Федерации в 2008 г. и прогноз лесопатологической ситуации на 2009 г. – М. : ФГУ «Рослесозащита», 2009. – 179 с.
20. **Распопов, П. М.** Динамика популяций растительноядных лесных насекомых как причина и как следствие изменений среды обитания / П. М. Распопов, П. М. Рафес // Биологические методы оценки состояния природной среды человека. – М. : Наука, 1978. – С. 36–57.
21. Рекомендации по мониторингу и мерам контроля численности непарного шелкопряда на Дальнем Востоке. – ФГУ ДальНИИЛХ, 2007. – 46 с.
22. **Рубцов, В. В.** Анализ взаимодействия листогрызущих насекомых с дубом / В. В. Рубцов, Н. И. Рубцова. – М.: Наука, 1984. – 184 с.
23. **Семевский Ф. Н.** Прогноз в защите леса. – М.: Лесн. пром-сть. 1971. – 72 с.

Приложение 1

**Распространение и встречаемость очагов непарного шелкопряда по регионам Европейской России**

№	Регион	Период наблюдений, лет	Площадь очагов, га			Встречаемость, %
			средняя многолетняя	средняя*	максимальная	
1	Адыгея	37	17	159	335	10,8
2	Астраханская обл.	51	314	391	3 887	80,4
3	Башкортостан	60	157 441	160 110	1 378 000	98,3
4	Белгородская обл.	60	1 526	3 052	27 447	50,0
5	Брянская обл.	60	181	1805	9 835	10,0
6	Владимирская обл.	37	3	35	80	8,1
7	Волгоградская обл.	60	14 119	14 119	115 425	100
8	Воронежская обл.	60	5 476	9 387	47 155	58,3
9	Дагестан	60	3 924	6 038	24 797	65,0
10	Кабардино-Балкарская	60	200	999	3 100	20,0
11	Калининградская обл.	37	177	547	1 731	32,4
12	Калмыкия	37	142	1310	1 771	10,8
13	Кировская обл.	37	550	10170	10 340	5,4
14	Краснодарский край	60	27 385	36514	486 448	75,0
15	Курская обл.	57	395	2499	10 270	15,8
16	Липецкая обл.	60	2 819	5639	60 196	50,0
17	Мордовия	60	6 161	20536	115 668	30,0
18	Московская обл.	60	5 355	35702	219 700	15,0
19	Нижегородская обл.	37	893	2202	7 590	40,5
20	Оренбургская обл.	60	12 542	13935	91 770	90,0
21	Орловская обл.	60	1 230	14762	45 650	8,3
22	Пензенская обл.	60	18 767	20473	190 727	91,7
23	Пермская обл.	37	352	6506	7 171	5,4
24	Ростовская обл.	60	3 669	4 003	13 162	91,7
25	Рязанская обл.	60	8 830	21 192	242 232	41,7
26	Самарская обл.	60	25 771	27 128	212 816	95,0
27	Саратовская обл.	60	20 005	24 006	127 795	83,3
28	Свердловская обл.	37	335	952	3 500	35,1
29	Северная Осетия	37	18	656	656	2,7
30	Ставропольский край	60	1 395	2 263	11 190	61,7
31	Тамбовская обл.	60	4 371	9 714	75 206	45,0
32	Татарстан	60	59 470	68 620	484 732	86,7
33	Тульская обл.	60	4 566	27 395	150 926	16,7
34	Удмуртия	37	1 041	2 964	15 800	35,1
35	Ульяновская обл.	60	25 735	31 512	279 494	81,7
36	Челябинская обл.	60	31 997	42 662	285 242	75,0
37	Чеченская	60	3 961	6 990	33 448	56,7
38	Чувашия	60	5 625	11 639	77 138	48,3

\* Средняя площадь очагов только за те годы, когда они зарегистрировались.

Приложение 2

**Распространение и встречаемость очагов непарного шелкопряда по регионам в азиатской части России**

№	Регион	Период наблюдений, лет	Площадь очагов, га			Встречаемость, %
			средняя многолетняя	средняя*	максимальная	
1	Алтайский край	37	18 003	21 488	129 289	83,8
2	Амурская обл.	37	6 937	21 390	126 830	32,4
3	Бурятия	37	5744	9 660	41 549	59,5
4	Иркутская обл.	37	268	1 652	3 227	16,2
5	Красноярский край	37	638	3 934	7 000	16,2
6	Курганская обл.	37	43 798	62 327	165 049	70,3
7	Приморский край	37	65 608	220 683	1202 640	29,7
8	Тыва	37	57 523	118 241	593 326	48,6
9	Тюменская обл.	37	60 912	86 683	378 226	70,3
10	Хабаровский край	37	13 444	45 220	303 101	29,7
11	Хакасия	37	1 740	5 851	17 885	29,7
12	Читинская обл.	37	23 481	34 752	240 124	67,6

\* Средняя площадь очагов только за те годы, когда они регистрировались.

ПРОГНОЗИРОВАНИЕ МАССОВЫХ РАЗМНОЖЕНИЙ  
НЕПАРНОГО ШЕЛКОПРЯДА, УГРОЗЫ ПОВРЕЖДЕНИЯ ДУБРАВ  
И НЕОБХОДИМОСТИ ЗАЩИТНЫХ МЕРОПРИЯТИЙ

Научное издание

Редактор *М. Ф. Нежлукто*

Компьютерная верстка С.А. Трушенкова

Оформление обложки Л. М. Харина

Формат 60x90 <sup>1</sup>/<sub>16</sub>      Объем 5.25 печ. л.      Тираж 300 экз.

Отпечатано в ФБУ ВНИИЛМ

141200, г. Пушкино Московской обл., ул. Институтская, д.15

Тел.: (495) 993-30-54 факс: (495) 993-41-91