

УДК: 630.453

## Моделирование рисков воздействия насекомых на лесные насаждения при возможных климатических изменениях

В. Г. Суховольский<sup>1,2,4, a</sup>, А. В. Ковалев<sup>2</sup>,  
Е. Н. Пальникова<sup>3</sup>, О. В. Тарасова<sup>4</sup>

<sup>1</sup>Институт леса им. В. Н. Сукачева СО РАН, лаборатория лесной зоологии,  
Россия, 660036, г. Красноярск, Академгородок, д. 50/28

<sup>2</sup>Международный научный центр исследования экстремальных состояний человека КНЦ СО РАН,  
Россия, 660036, г. Красноярск, Академгородок, д. 50

<sup>3</sup>Сибирский государственный технологический университет, кафедра экологии и защиты леса,  
Россия, 660049, г. Красноярск, пр. Мира, д. 82

<sup>4</sup>Сибирский федеральный университет, кафедра экологии и природопользования,  
Россия, 660041, г. Красноярск, пр. Свободный, д. 79

E-mail: <sup>a</sup>soukhovolsky@yandex.ru

Получено 14 февраля 2016 г.,  
после доработки 17 марта 2016 г.

Модель динамики численности популяций лесных насекомых использована для моделирования взаимодействий «лес–насекомые» и оценки возможных повреждений лесных насаждений насекомыми-вредителями. Согласно этой модели популяция рассматривалась как система автоматической регуляции, в которой входные переменные характеризуют влияние модифицирующих (прежде всего климатических) факторов, а цепи обратной связи описывают влияние регулирующих факторов (паразитов и хищников, внутривидовых взаимодействий). На основе этой модели популяционной динамики предложена методика *стресс-тестирования* — оценки рисков повреждений и гибели лесных насаждений по отношению к вспышкам массового размножения насекомых. Такой опасный вид лесных вредителей, как сосновая пяденица (*Bupalus piniarius* L.), рассматривался в качестве объекта анализа; проводились компьютерные эксперименты по оценке рисков возникновения вспышек массового размножения при возможных климатических изменениях на территории Средней Сибири. Модельные эксперименты показали, что при достаточно умеренном потеплении (не более 4 °С в летний период) риск воздействия насекомых на лес существенно не возрастает. Однако более сильное потепление на территории Средней Сибири в сочетании с уменьшением количества осадков в летний период может вызвать существенное увеличение частоты вспышек массового размножения основного вредителя сосновых лесов — сосновой пяденицы.

Ключевые слова: лесные насекомые, динамика численности, модели, модифицирующие факторы, климат, насаждения, воздействие, риски, стресс-тесты

Citation: *Computer Research and Modeling*, 2016, vol. 8, no. 2, pp. 241–253 (Russian).  
Работа выполнена при поддержке РФФИ (гранты №№ 15-04-01192 и 15-45-04034).

## Modelling the risk of insect impacts on forest stands after possible climate changes

V. G. Soukhovolsky<sup>1,2,4</sup>, A. V. Kovalev<sup>2</sup>, E. N. Palnikova<sup>3</sup>, O. V. Tarasova<sup>4</sup>

<sup>1</sup>*V. N. Sukachev Institute of Forest SB RAS, 50/28 Akademgorodok, Krasnoyarsk, 660036, Russia*

<sup>2</sup>*International Scientific Center for Study of Organism Extreme State, Krasnoyarsk Scientific Center of RAS, 50 Akademgorodok, Krasnoyarsk, 660036, Russia*

<sup>3</sup>*Siberian State Technological University, department of ecology and forest protection, 82 Mira Av., Krasnoyarsk, 660049, Russia*

<sup>4</sup>*Siberian Federal University, department of ecology and ecological management, 79 Svobodny Av., Krasnoyarsk, 660041, Russia*

**Abstract.** — A model of forest insect population dynamics used to simulate of “forest-insect” interactions and for estimation of possible damages of forest stand by pests. This model represented a population as control system where the input variables characterized the influence of modifier (climatic) factors and the feedback loop describes the effect of regulatory factors (parasites, predators and population interactions). The technique of stress testing on the basis of population dynamics model proposed for assessment of the risks of forest stand damage and destruction after insect impact. The dangerous forest pest pine looper *Bupalus piniarius* L. considered as the object of analysis. Computer experiments were conducted to assess of outbreak risks with possible climate change in the territory of Central Siberia. Model experiments have shown that risk of insect impact on the forest is not increased significantly in condition of sufficiently moderate warming (not more than 4 °C in summer period). However, a stronger warming in the territory of Central Siberia, combined with a dry summer condition could cause a significant increase in the risk of pine looper outbreaks.

Keywords: forest insect, population dynamics, models, modified factors, climate, stands, impact, risks, stress-testing

Citation: *Computer Research and Modeling*, 2016, vol. 8, no. 2, pp. 241–253 (Russian).  
Работа выполнена при поддержке РФФИ (гранты №№ 15-04-01192 и 15-45-04034).

## Введение

Лесные насекомые являются одним из основных факторов повреждений и гибели лесов бореальной зоны. Массовые повреждения деревьев происходят в ходе вспышек массового размножения насекомых, характеризующихся резким (в течение одного-трех сезонов) увеличением плотности популяций лесных насекомых и расширением ареала вредителей. Так, у такого опасного вредителя таежных лесов, как сибирский шелкопряд (*Dendrolimus superans sibiricus* Tschetv.), плотность популяции в период вспышки массового размножения возрастает на шесть порядков — от  $10^{-3}$  особи на дерево в стабильно-разреженном состоянии до  $10^3$  в фазе максимума вспышки [Кондаков, 1974; Исаев и др., 2001].

Среди факторов, определяющих динамику численности насекомых, одними из важнейших являются климатические. Возникновение вспышек массового размножения целого ряда видов в последние годы связывают с происходящими на данных территориях климатическими изменениями [Aukema et al., 2008; Harrington et al., 2001; Logan et al., 2003; Carroll et al., 2004; Vanhanen et al., 2007; Raffa et al., 2008; Kausrud et al., 2012; Preisler et al., 2012]. Климатические изменения оказывают прямое воздействие на физиологические процессы у насекомых [Bale et al., 2002; De Sassi et al., 2012] и косвенно влияют на популяционную динамику в связи с климатическими воздействиями на защитные системы древесных растений [Awmack, Leather, 2002; Raffa et al., 2008; Uniyal, Uniyal, 2009]. Предполагается, что в ближайшие десятилетия эффект воздействия климата на развитие вспышек массового размножения лесных насекомых будет усиливаться [Logan, Powell, 2001; Bentz et al., 2010].

В условиях Сибири климат оказывает существенное воздействие на характер динамики численности лесных насекомых. Это можно проследить на примере динамики численности такого вида, как сосновая пяденица (*Bupalus piniarius* L.). На территории Красноярского края сосновая пяденица как вид встречается в сосновых лесах на обширной территории, от долины Ангары ( $\sim 58^\circ$  с. ш.) до центральной части Тывы ( $\sim 52^\circ$  с. ш.), однако тип динамики численности вредителя различен в разных климатических зонах. Так, в сосновых лесах Приангарья вспышки массового размножения этого вида вообще не наблюдались в последние 100 лет; в сосновых лесах вблизи Красноярска вспышки массового размножения наблюдались два раза: в 1944 г. и в 2014 гг.; на юге Красноярского края с конца тридцатых годов прошлого века произошло пять вспышек массового размножения; наконец, в сосновых насаждениях на территории Тывы (Балгазынский бор) вспышка массового размножения сосновой пяденицы, возможно (точных документированных данных в нашем распоряжении нет), наблюдалась в 50-е годы прошлого столетия [Пальникова и др., 2002].

В таблице 1 приведены средние многолетние показатели для климатических зон на территории Красноярского края, расположенных на разных широтах вдоль 90-го меридиана.

Таблица 1. Климатические показатели в различных местообитаниях на территории Красноярского края и частота вспышек массового размножения сосновой пяденицы

Местоположение метеостанции	Географические координаты		Зима (ноябрь–февраль)*		Лето (июнь–август)**		Число вспышек за последние 70 лет/вероятность вспышки
	с. ш.	в. д.	$TW$	$\sigma(TW)$	$TS$	$\sigma(TS)$	
Богучаны	58.3836	97.4536	-21.5	10.5	16.9	3.8	0/0
Красноярск	56.0167	92.8706	-14.2	8.8	16.9	3.8	2/0.028
Минусинск	53.7098	91.7154	-9.7	7.8	25.4	4.7	5/0.071
Кызыл	51.7165	94.4366	-25.9	6.5	18.8	3.8	1/0.014***

\*  $TW$  — средняя температура зимы,  $\sigma(TW)$  — стандартное отклонение; \*\*  $TS$  — средняя температура лета,  $\sigma(TS)$  — стандартное отклонение. \*\*\* точные данные отсутствуют.

Исходя из таблицы 1, можно полагать, что отсутствие вспышек на севере и юге ареала сосновой пяденицы связано с низкими зимними температурами (отклонения от средней много-

летней температуры зимы в Приангарье могут достигать значения  $TW - 2\sigma(TW) \approx -40^\circ\text{C}$ ), а частые вспышки на юге Красноярского края сопряжены с достаточно умеренной температурой зимой и повышенной среднейлетней температурой.

Как известно, для насекомых витальная температурная область (примерно от  $+3$  до  $+40^\circ\text{C}$ ) характеризует климатическую нишу, в пределах которой существует популяция изучаемого вида насекомых, верхняя сублетальная температурная зона для насекомых находится в интервале от  $+40$  до  $+50^\circ\text{C}$ , нижняя сублетальная температурная зона — в интервале от  $+3$  до  $-10^\circ\text{C}$ , нижняя летальная температурная зона характеризуется температурой ниже  $-10^\circ\text{C}$  [Ушатинская, 1957]. Конечно, при оценке влияния пониженных температур на выживаемость насекомых следует учитывать, что зимой под слоем снега температура может быть существенно выше температуры воздуха [Коломиец, 1961]. Однако подобные оценки носят лишь качественный характер и неясно, какие именно количественные изменения климатических показателей будут приводить к существенным изменениям типа динамики численности лесных насекомых.

При разработке методики количественного стресс-тестирования влияния климатических изменений на динамику численности популяций лесных насекомых потенциально возможно рассматривать экологические стресс-тесты на основе данных прошлых лет (back-testing) и стресс-тесты на основе модельных сценариев изменений процессов в лесных экосистемах. Однако для многих видов насекомых невозможно найти достаточно большой объем исторических данных по динамике численности. В частности, для лесных насекомых в таежных лесах Сибири видом, максимальным по длительности непрерывных учетов плотности популяции на одной территории, является сосновая пяденица, учеты которой проводятся с 1979 г. [Исаев и др., 2015]. При проведении же тестов на основе стрессовых климатических сценариев возможно моделировать реакцию популяции на климатические воздействия, отличающиеся от наблюдаемых в настоящее время воздействий модифицирующих факторов. Однако в этом случае предварительно необходимо построить модель популяционной динамики изучаемого вида лесных насекомых.

В настоящей работе для моделирования динамики численности популяций лесных насекомых использовалось представление о существовании двух типов факторов: регулирующих и модифицирующих, влияющих на изменение плотности популяции [Исаев и др., 2001]. Влияние регулирующих факторов (конкуренции внутри популяции, паразитов, хищников) зависит от текущей плотности популяции, влияние модифицирующих факторов (прежде всего погодных) не зависит от текущей плотности популяции. Однако при натуральных наблюдениях за изучаемой популяцией насекомых обычно не удается оценить плотности популяций паразитов и хищников и тем более функции влияния этих регулирующих факторов, и потому верифицировать такие модели удается только в очень редких случаях.

Ранее на основе простой мультипликативной модели  $x(i) = x(i-1) \prod_{j=1}^{m_1} F_1(j) \prod_{j=1}^{m_2} F_2(j)$ , где  $x(i)$

и  $x(i-1)$  — плотности моделируемой популяции в сезоны  $i$  и  $(i-1)$ ,  $F_1(j)$  — функции влияния  $m_1$  регулирующих факторов,  $F_2(j)$  — функции влияния  $m_2$  модифицирующих факторов на особей в популяции соответственно, была предложена аддитивная модель динамики численности популяции лесных насекомых [Суховольский и др., 2015]. Предложенная модель популяционной динамики рассматривалась как система автоматического управления, в которой входные переменные характеризуют влияние модифицирующих факторов, а цепи обратной связи описывают влияние регулирующих факторов [Веремей, 2013; Гайдук и др., 2011; Ким, 2007]. В теории автоматического управления такую модель принято называть ARMA-моделью (AutoRegressive Moving Average) [Веремей, 2013, с. 92] (заметим, что такое определение отличается от определения ARMA-моделей в теории случайных процессов [Кендалл, Стьюарт, 1976]), в эконометрике — ARDL-моделью (AutoRegressive Distributed Lag) [Hendry et al., 1984; Pesaran, Shin, 1998].

Для расчетов характеристик ARMA-модели временной ряд плотности популяции  $\{x(i)\}$  трансформировался в ЛИН-ряд  $\{L(i)\}$  (линейный инвариантный во времени, Linear Time Invariant): производился «ремонт» данных (замена нулевых значений плотности на ненулевые малые

значения), осуществлялся переход к логарифмической шкале плотностей, производилось нормирование на среднее многолетнее значение плотности, детрендрование и регуляризация (фильтрация высокочастотной составляющей ряда) [Суховольский и др., 2015; Исаев и др., 2015]. После таких преобразований модель динамики численности популяции лесных насекомых записывается следующим образом:

$$L(i) = a_0 + \sum_{j=1}^n a_j L(i-j) + \sum_{k=0}^m b_k W(i-k), \quad (1)$$

где  $L(i)$  — ЛИВ-плотность популяции в сезон  $i$ ;  $W(i)$  — погодные характеристики сезонов;  $n$  — порядок авторегрессии;  $m$  — порядок МА-компонентов;  $a_0$  — случайная компонента со средним значением, равным нулю,  $a_j, b_k, c_1, c_2$  — коэффициенты.

## Объекты и методы

В качестве объектов для построения моделей динамики численности и стресс-тестов рассмотрены временные ряды динамики численности сосновой пяденицы *B. piniarius* L. в сосновых насаждениях на территории Красноярского края. Учеты численности сосновой пяденицы проводились авторами ежегодно с 1979 по 2015 г. на территории Краснотуранского соснового бора (юг Красноярского края) на различных пробных площадях — урочищах *Дюна*, *Плакор*, *Вершина сопки*. Детальные данные о популяциях сосновой пяденицы на этой территории, ландшафтных и таксационных характеристиках пробных площадей, динамике численности популяций и их взаимодействии с насекомыми-паразитами публиковались ранее [Тарасова, 1982; Пальникова и др., 2002; Пальникова и др., 2014; Исаев и др., 2014; Исаев и др., 2015; Пальникова, Суховольский, 2016].

Погодные условия в изученных местообитаниях характеризовались временными рядами *гидротермического коэффициента (ГТК)* — отношения количества осадков за определенный период к средней температуре воздуха за этот период. Для модели сосновой пяденицы в году  $i$  рассматривались показатели ГТК сентября  $(i-1)$ -го года и мая  $i$ -го года.

Так как данные многолетних учетов плотности популяции моделируемого вида и погодные характеристики в течение периода учетов известны, модель (1) можно рассматривать как множественное линейное регрессионное уравнение с  $(n+1)$  рядами независимых переменных  $\{L(i)\}$  и  $m$  рядами независимых переменных  $\{W(i)\}$  и с  $(n+m+1)$  зависимыми переменными — коэффициентами уравнения (1). Для оценки порядка  $n$  AR-компоненты модели (1) использовалась частная автокорреляционная функция (ЧАКФ) ряда  $\{L(i)\}$  [Бокс, Дженкинс, 1974]. Для оценки параметров множественной линейной регрессии использовалась МНК-процедура в пакете Statistica 6. Коэффициент детерминации  $R^2$  линейного регрессионного уравнения и кросс-корреляционная функция ЛИВ-ряда и вычисленного модельного ряда характеризуют уровень согласия между данными учетов и моделью.

На основе рассчитанных моделей популяционной динамики сосновой пяденицы и непарного шелкопряда проводились вычислительные эксперименты по оценке влияния климатических изменений на динамику численности этих видов лесных насекомых. Для расчетов ARMA-модели в отдельном вычислительном эксперименте произвольно выбиралось некоторое значение из имеющегося ряда  $\{L(i)\}$  многолетних данных учетов и в качестве начальных значений плотности популяции бралось выбранное и  $(n-1)$  следующих за выбранным значений плотностей популяций. Ранее было показано, что на территории Средней Сибири на численность популяции сосновой пяденицы на стадии гусеницы в текущем году может оказывать влияние погода мая текущего года и сентября прошлого года [Пальникова и др., 2002]. Учитывая это, по имеющимся метеоданным для территорий, на которых наблюдались изученные популяции насекомых, были вычислены среднее значение и дисперсии ГТК сентября и мая. Используя погодные данные метеостанций, ближайших к местообитаниям насекомых, оценивали функции

распределения, средние значения, дисперсию и частную автокорреляционную функцию ЧАКФ( $k$ ) рядов ГТК. Так как все значения ЧАКФ( $k$ ) при  $k \geq 1$  значимо (на уровне  $p = 0.95$ ) не отличались от нуля, можно полагать, что значения ГТК в разные годы независимы. Распределение же значений ГТК хорошо описывалось нормальной функцией распределения. В вычислительных экспериментах для построения ARMA-модели генерировали нормально распределенные случайные значения ГТК с заданными средними значениями и дисперсиями. Для ARMA-модели с фиксированными коэффициентами AR-компонентов и генерируемыми значениями ГТК с заданным средним значением и дисперсией проводили расчет 10000 прогнозных рядов длительностью 10 лет каждый. Для накопленных 100000 реализаций рассчитывали гистограммы распределения значений ЛИВ-плотностей популяций.

## Результаты и обсуждение

На рис. 1 приведена частная автокорреляционная функция ЛИВ-ряда динамики численности сосновой пяденицы в урочище Дюна, а на рис. 2 — ЛИВ-ряд динамики численности сосновой пяденицы и модельный ряд динамики этой популяции.

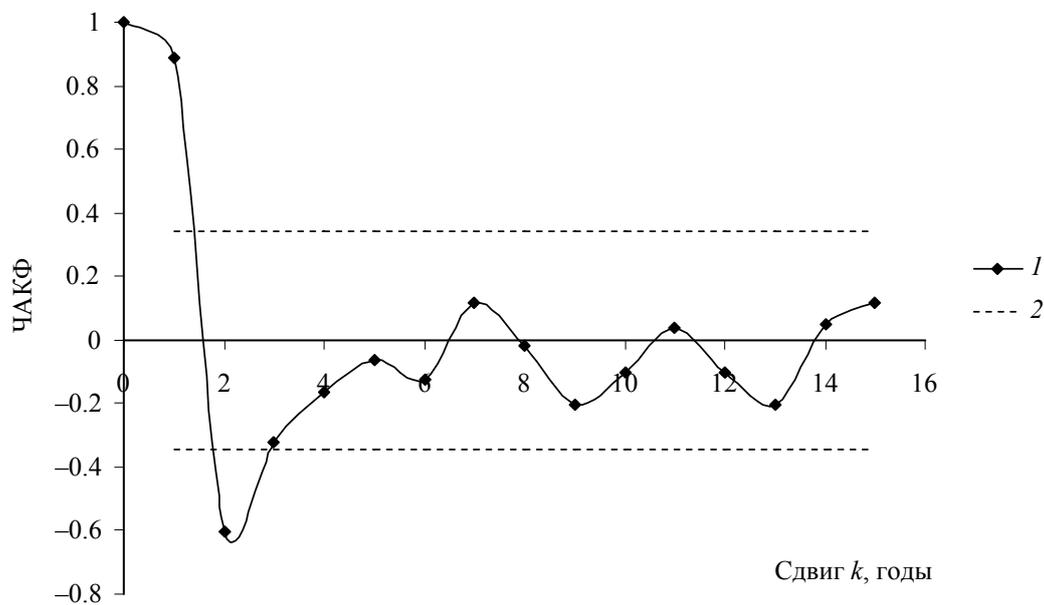


Рис. 1. Частная автокорреляционная функция (ЧАКФ) ЛИВ-ряда динамики численности сосновой пяденицы в урочище Дюна; 1 — ЧАКФ, 2 — границы  $\pm 2s$  ( $s = 1/\sqrt{n}$  — стандартная ошибка частной автокорреляции [Бокс, Дженкинс, 1974, с. 82–83])

Как видно из рис. 1, порядок  $n$  ARMA( $n, m$ )-модели для ЛИВ-ряда динамики численности сосновой пяденицы равен 2. В таблице 2 приведены значения коэффициентов моделей динамики численности сосновой пяденицы в различных местообитаниях (урочищах) на территории Краснотуранского бора.

Как следует из таблицы 2, коэффициент детерминации  $R^2$  для ARMA-моделей сосновой пяденицы в урочищах Дюна и Вершина сопки превышает значение 0.9, то есть модель позволяет учесть более 90 % дисперсии данных учетов. Несколько менее точна ARMA-модель для урочища Плакор ( $R^2 = 0.855$ ).

В качестве дополнительного критерия точности модели использовали условие синхронности изменений во времени ЛИВ-ряда данных и модельного ряда. Для оценки синхронности использовали кросс-корреляционную функцию  $r(k)$  между ЛИВ-рядом данных учетов и модель-

ным рядом. В синхронных рядах максимум кросс-корреляционной функции  $r(k)$  должен достигаться при сдвиге  $k = 0$  и значение кросс-корреляционной функции  $r(0)$  должно быть близко к 1 [Дженкинс, Ваттс, 1972]. Именно такой вид имеют кросс-корреляционные функции между ЛИВ-рядами плотностей популяций сосновой пяденицы и модельными рядами (рис. 3).

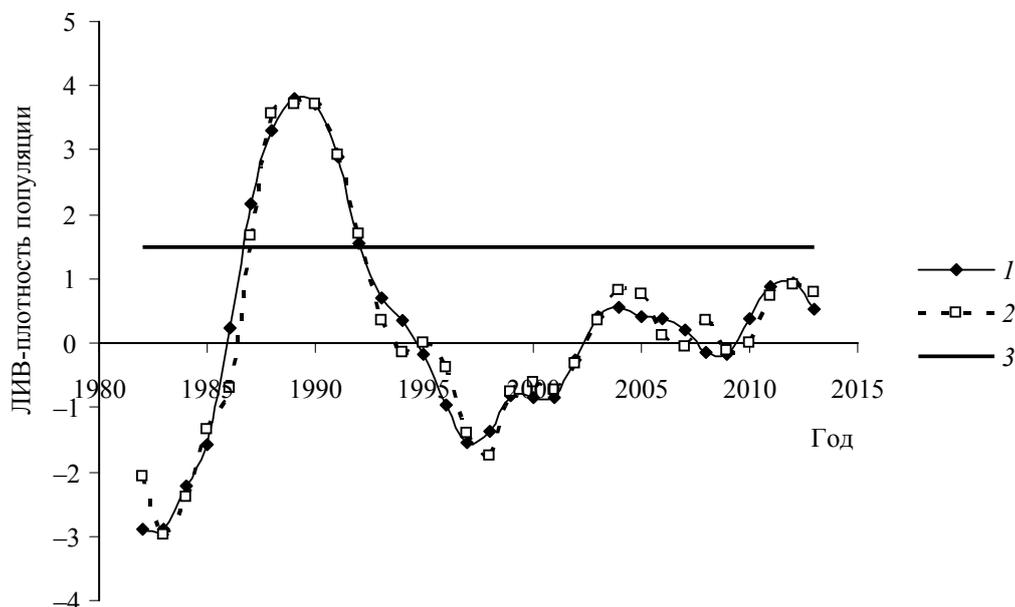


Рис. 2. Динамика численности популяции сосновой пяденицы в урочище Дюна; 1 — ЛИВ-ряд учетов численности; 2 — ARMA(2, 2)-модель динамики; 3 — критическая плотность  $L_r$  популяции

Таблица 2. Оценки параметров моделей динамики численности сосновой пяденицы в различных местообитаниях на территории Краснотуранского бора на протяжении 1979–2014 гг.

Урочище	Переменные модели*					$R^2$
	$a_0$	ГТК сентябрь	ГТК май	$L(i-2)$	$L(i-1)$	
Вершина сопки	0.17 (0.32)	0.13 (0.21)	-0.27 (0.20)	-0.81 (0.11)	1.60 (0.11)	0.937
Дюна	0.19 (0.23)	0.18 (0.15)	-0.36 (0.15)	-0.90 (0.10)	1.72 (0.10)	0.958
Плакор	0.06 (0.36)	-0.17 (0.23)	0.15 (0.23)	-0.65 (0.15)	1.41 (0.14)	0.855

\* В скобках показаны значения ошибок в оценках параметров модели; курсивом выделены оценки, значимые на уровне, меньшем 0.05.

Вычисленные значения коэффициентов ARMA-моделей были использованы для выполнения стресс-тестов по оценке возможного влияния климатических изменений на возникновение вспышек массового размножения насекомых. Риски воздействия лесных насекомых на лес могут быть связаны как с увеличением частоты вспышек, так и с ростом плотности популяции в фазе максимума вспышки. При неизменных значениях коэффициентов AR(2)-компонентов  $L(i-1)$  и  $L(i-2)$  спектральная плотность ЛИВ-плотности популяции  $L(i)$  зависит от значений этих коэффициентов [Андерсон, 1976; Кендалл, Стьюарт, 1976]. Поэтому можно полагать, что при изменении погодных условий частота вспышек не изменится, хотя, конечно, абсолютные значения плотности популяции могут существенно измениться. Тогда риск вспышек массового размножения будет зависеть от значений локальных максимумов плотности популяции. В связи с этим для оценки плотности популяций сосновой пяденицы проводили имитационные экспе-

рименты с использованием модели (1) с представленными в таблице 2 значениями коэффициентов AR-части модели и изменяющимися значениями ГТК в диапазоне от сдвига  $S = -0.7$  до сдвига  $S = +2$  по отношению к значению ГТК<sub>0</sub> в настоящее время.

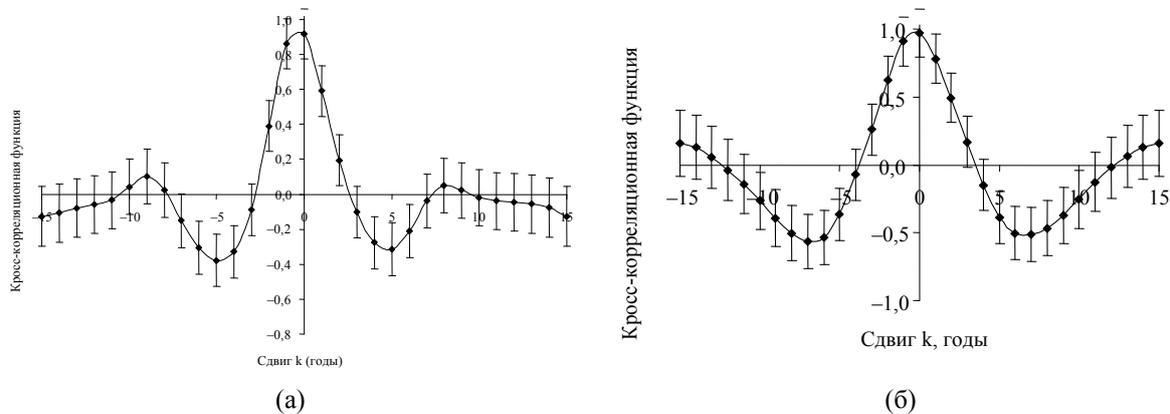


Рис. 3. Кросс-корреляционные функции ЛИВ-рядов и модельных рядов динамики численности сосновой пяденицы: (а) — Вершина сопки; (б) — Дюна

На рис. 4 приведены функции распределения  $F(L)$  ЛИВ-плотности популяции, полученные в имитационных экспериментах с моделью сосновой пяденицы в урочище Дюна при разных средних значениях ГТК и при дисперсии ГТК, характерной для последних 40 лет. Эти функции распределения сопоставляются с прямой критической ЛИВ-плотности  $L_r$ , характеризующей такую плотность популяции, при достижении которой реализуется вспышка массового размножения [Исаев и др., 2001]. Для сосновой пяденицы на стадии гусеницы перерасчет величины критической плотности вида, используемой в Российской службе защиты леса [Надзор..., 1965], дает значение  $L_r = 1.5$ .

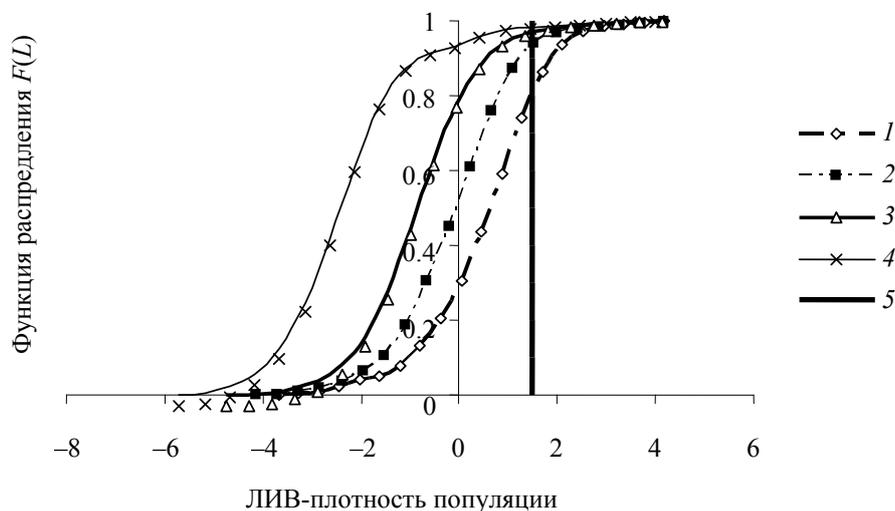


Рис. 4. Функции распределения ЛИВ-плотности модельных популяций сосновой пяденицы в урочище Дюна при различных значениях ГТК: 1 — (ГТК<sub>0</sub> - 0.7); 2 — ГТК<sub>0</sub>, 3 — (ГТК<sub>0</sub> + 1), 4 — (ГТК<sub>0</sub> + 2); критическая плотность  $L_r = 1.5$

На рис. 4 значение  $F_S(L_r)$  функции распределения в точке ее пересечения с прямой критической плотности  $L_r = 1.5$  есть вероятность того, что при заданном значении  $S$  сдвига ГТК ЛИВ-плотность популяции не будет превосходить критического значения  $L_r$ . Однако более удобно ввести в качестве показателя риска воздействия сосновой пяденицы на лес при климатических изменениях показатель вероятности риска  $PaR$  (Probability at Risk) реализации вспышек массо-

вого размножения:

$$PaR(S) = 1 - F_S(L_r). \tag{2}$$

В табл. 3 приведены значения PaR, полученные в результате имитационных экспериментов для модельных популяций сосновой пяденицы.

Таблица 3. Значения PaR для популяций сосновой пяденицы в различных имитационных экспериментах

Местообитание	Сдвиг $S$ по отношению к текущему значению ГТК					
	-0.5	0*	0.5	1	1.5	2
Вершина сопки	0.14	<b>0.03</b>	0.02	0.01	0.01	0.01
Плакор	0.06	<b>0.03</b>	0.01	0.01	0.01	0.01
Дюна	0.15	<b>0.06</b>	0.02	0.02	0.01	0.01

\*  $S = 0$  соответствует среднему многолетнему значению ГТК с 1975 по 2010 г.

В вычислительных экспериментах, в которых использовались значения ГТК, меньшие значений ГТК, наблюдаемых в настоящее время, получено, что при уменьшении значения  $S$  (то есть при более сухой и жаркой погоде) величина PaR вспышки массового размножения возрастает (рис. 5).

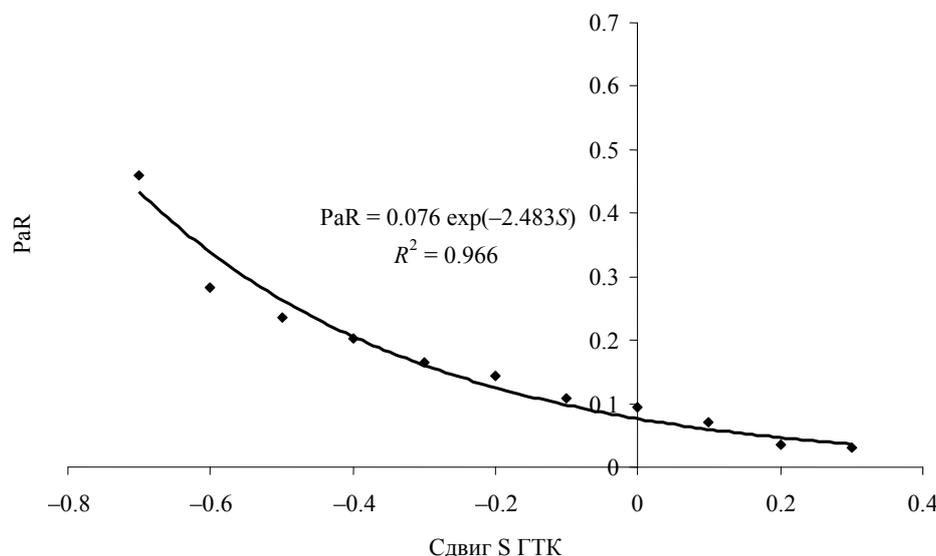


Рис. 5. Связь между значениями PaR и величиной сдвига  $S$  по отношению к значению ГТК в настоящее время для популяций сосновой пяденицы на пробной площадке Дюна

Как видно из рис. 5, уменьшение среднего многолетнего значения ГТК приводит к достаточно большому (примерно в три-четыре раза) увеличению значений PaR. Для экспериментов с положительными значениями  $S$  (то есть в условиях уже не потепления, а похолодания) расчетные значения PaR обычно не превосходили 0.05, то есть при подобных климатических условиях риск развития вспышек массовых размножений минимален.

Предполагается, что при потеплении климата на территории Средней Сибири к 2050 г. средняя температура летних месяцев может вырасти на 2 °С, а количество осадков летом может увеличиться на 20 % [Чебакова и др., 2002]. Однако надежность этих оценок неясна. Кроме того, изменения типа динамики численности лесных насекомых-филлофагов и значений PaR могут зависеть не столько от сдвигов средних значений, сколько от изменений дисперсии среднего значения [Суховольский и др., 1996; Исаев и др., 1997]. Действительно, к развитию вспышки массового размножения может привести «выброс» значений летней температуры в сочетании с уменьшением количества осадков в течение всего одного сезона.

Учитывая объективно существующую неопределенность в прогнозах климатических моделей, для оценки возможных сдвигов значений PaR для сосновой пяденицы на территории Средней Сибири рассматривали различные сценарии климатических изменений, выраженные в абсолютном сдвиге средней температуры, относительном сдвиге количества осадков и дисперсии показателей осадков и температуры по отношению к наблюдаемым в течение последних 40 лет климатическим показателям. Для каждого из сценариев проводились имитационные эксперименты, подобные описанным выше, и вычислялись значения PaR для каждого сценария (таблица 4).

Таблица 4. Риски вспышек массовых размножений сосновой пяденицы при различных сценариях климатических изменений на территории Средней Сибири

Климатические сценарии			PaR		
сдвиг средней температуры, °C	сдвиг по осадкам, %	множитель сдвига по дисперсии	вершина сопки	плакор	дюна
<b>0</b>	<b>0</b>	<b>1</b>	<b>0.041</b>	<b>0.037</b>	<b>0.071</b>
2	0	1	0.038	0.038	0.079
4	0	1	0.039	0.039	0.069
0	-10	1	0.041	0.039	0.070
2	-10	1	0.047	0.039	0.071
4	-10	1	0.042	0.039	0.074
0	10	1	0.040	0.037	0.082
2	10	1	0.044	0.038	0.078
4	10	1	0.037	0.037	0.073
0	0	1.25	0.045	0.041	0.072
2	0	1.25	0.043	0.040	<b>0.090</b>
4	0	1.25	0.047	0.039	0.059
0	-10	1.25	0.053	0.041	0.064
2	-10	1.25	0.057	0.040	<b>0.089</b>
4	-10	1.25	0.056	0.039	0.077
0	10	1.25	0.041	0.038	0.070
2	10	1.25	0.041	0.038	0.058
4	10	1.25	0.039	0.041	0.084
5	-20	1.25	0.053	-	0.115

Данные, приведенные в таблице 4, указывают на то, что при различных сценариях климатических изменений (при увеличении средней температуры, изменении на 10 % количества осадков, увеличении на 25 % дисперсии значений температуры и осадков) в одном из местообитаний (Плакор) сильного возрастания значения PaR не происходит. В другом местообитании (Дюна) при уменьшении ГТК, связанном с повышением температуры и уменьшением количества осадков, PaR возрастает примерно на 30 %: от значения 0.07 до значения 0.09. Таким образом, при температурных сдвигах до +4 °C и изменениях осадков в пределах 10 % от текущих значений не следует ожидать значительного увеличения риска воздействия насекомых на лес. Однако, когда для пробной площади Дюна рассматривается сценарий с температурным сдвигом более +5, уменьшенным на 20 % от текущего среднего значения количеством осадков и увеличенной на 25 % дисперсией температуры и осадков, риск вспышек возрастает более чем на 60 % — до значения PaR = 0.115.

Такой уровень риска указывает на возможность существенного воздействия насекомых на лес, однако столь значительные изменения климата на территории Средней Сибири не прогнозируются.

## Заключение

Описанные модельные эксперименты показывают, что при достаточно умеренном потеплении (не более 4 °C в летний период) риск воздействия насекомых на лес существенно не воз-

растает, однако более сильное потепление на территории Средней Сибири в сочетании с уменьшением количества осадков может вызвать существенное возрастание риска вспышек массового размножения основного вредителя сосновых лесов — сосновой пяденицы.

Безусловно, описанные модельные эксперименты требуют дальнейшего уточнения. Так, желательно рассмотреть влияние на величину PaR возможных изменений коэффициентов при авторегрессионных членах в (1), что может привести к изменению спектра ЛИВ-рядов и изменению частоты возникновения вспышек. В этом случае вместо величины PaR для оценки риска повреждения леса отдельным видом вредителей следовало бы ввести произведение PaR на частоту вспышек.

Тем не менее представляется, что предложенные подходы и показатели риска воздействия насекомых на лесные насаждения можно использовать для оценки вероятности вспышек массового размножения отдельных видов насекомых в лесу при изменении климата и для районирования рисков воздействий насекомых при климатических изменениях на различных территориях.

## Благодарности

Авторы благодарят Р. Г. Хлебопроста и анонимного рецензента за интерес, проявленный к работе, и полезные замечания.

## Список литературы

- Андерсон Т.* Статистический анализ временных рядов. — М.: Мир, 1976.
- Бокс Дж., Дженкинс Г.* Анализ временных рядов. Прогноз и управление. — Вып. 1. — М.: Мир, 1974.
- Веремей Е. И.* Линейные системы с обратной связью. — СПб.: Лань, 2013.
- Гайдук А. Р., Беляев В. Е., Пьявченко Т. А.* Теория автоматического управления в примерах и задачах с решениями в MATLAB. — СПб.: Лань, 2011.
- Дженкинс Г., Ваттс Д.* Спектральный анализ и его приложения. — Т. 2. — М.: Мир, 1972.
- Исаев А. С., Суховольский В. Г., Овчинникова Т. М., Пальникова Е. Н.* Имитационное моделирование динамики численности сосновой пяденицы при различных климатических сценариях // Лесоведение. — 1997. — № 4. — С. 40–48.
- Исаев А. С., Хлебопрос Р. Г., Кондаков Ю. П., Недорезов Л. В., Киселев В. В., Суховольский В. Г.* Популяционная динамика лесных насекомых. — М.: Наука, 2001.
- Исаев А. С., Овчинникова Т. М., Пальникова Е. Н., Суховольский В. Г., Тарасова О. В., Хлебопрос Р. Г.* Динамика численности и устойчивость популяций лесных насекомых на низком уровне плотности // Лесоведение. — 2014. — № 4. — С. 3–11.
- Исаев А. С., Пальникова Е. Н., Суховольский В. Г., Тарасова О. В.* Динамика численности лесных насекомых-филлофагов: модели и прогнозы. — М.: Товарищество научных изданий КМК, 2015.
- Кендалл М. Дж., Стьюарт А.* Многомерный статистический анализ и временные ряды. — М.: Наука, 1976.
- Ким Д. П.* Теория автоматического управления. — Т. 1. — М.: ФИЗМАТЛИТ, 2007.
- Коломиец Н. Г.* Холодостойкость гусениц сибирского шелкопряда и температурный режим в местах их зимовки // Изв. СО АН СССР. — 1961. — № 1. — С. 113–120.
- Кондаков Ю. П.* Закономерности массовых размножений сибирского шелкопряда // Экология популяций лесных животных Сибири. — Новосибирск: Наука, 1974. — С. 206–265.
- Надзор, учет и прогноз размножений хвое- и листогрызущих насекомых в лесах СССР.* — М.: Лесная промышленность, 1965.

- Пальникова Е. Н., Свидерская И. В., Суховольский В. Г. Сосновая пяденица в лесах Сибири. Экология, динамика численности, влияние на насаждения. — Новосибирск: Наука, 2002.
- Пальникова Е. Н., Суховольский В. Г., Тарасова О. В. Пространственно-временная когерентность популяционной динамики лесных насекомых-филлофагов // Евразийский энтомологический журнал. — 2014. — Т. 13, № 3. — С. 228–236.
- Пальникова В. Н., Суховольский В. Г. Взаимодействие «фитофаг–энтомофаг» на разных фазах массового размножения лесных насекомых // Лесоведение. — 2016. — № 1. — С. 15–24.
- Суховольский В. Г., Пальникова Е. Н., Артемьева Н. В. Учащаются ли вспышки массового размножения лесных насекомых Сибири при глобальных изменениях климата? // Сибирский экологический журнал. — 1996. — № 6. — С. 567–571.
- Суховольский В. Г., Пономарев В. И., Соколов Г. И., Тарасова О. В., Красноперова П. А. Непарный шелкопряд *Lymantria dispar* L. на Южном Урале: особенности популяционной динамики и моделирование // Журнал общей биологии. — 2015. — № 3. — С. 179–194.
- Тарасова О. В. Ландшафтно-экологическая специфика вредной лесной энтомофауны Минусинских ленточных боров // Насекомые лесостепных боров Сибири. — Новосибирск: Наука, 1982. — С. 18–34.
- Ушатинская Р. С. Основы холодостойкости насекомых. М.: Изд-во Академии наук СССР, 1957.
- Чебакова Н. М., Рейнфельдт Дж., Парфенова Е. И. Перераспределение растительных зон и популяций лиственницы сибирской и сосны обыкновенной в Средней Сибири при потеплении климата // Сибирский экологический журнал. — 2003. — № 6. — С. 677–686.
- Aukema B. H., Carroll A. L., Zheng Y., Zhu J., Raffa K. F., Moore R. D., Stahl K., Taylor S. W. Movement of outbreak populations of mountain pine beetle: influences of spatiotemporal patterns and climate // *Ecography*. — 2008. — Vol. 31. — P. 348–358.
- Awmack C. S., Leather S. R. Host plant quality and fecundity in herbivorous insects // *Ann. Rev. Entom.* — 2002. — Vol. 47. — P. 817–844.
- Bale J. S., Masters G. J., Hodkinson I. D., Awmack C., Bezemer T. M. Herbivory in global climate change research: direct effects of rising temperature on insect herbivores // *Global Change Biol.* — 2002. — Vol. 8. — P. 1–16.
- Bentz B. J., Regniere J., Fettig C. J., Hansen E. M., Hayes J. L., Hicke J. A., Kelsey R. G., Negron J. F., Seybold S. J. Climate change and bark beetles of the western United States and Canada: direct and indirect effects // *BioScience*. — 2010. — Vol. 60. — P. 602–613.
- Carroll A. L., Taylor S. W., Regniere J., Safranyik L. Effect of climate change on range expansion by the mountain pine beetle in British Columbia // *Mountain pine beetle Symposium: Challenges and Solution*. Natural Resources Canada British Columbia. — 2004. — P. 223–232.
- De Sassi C., Lewis O. T., Tylianakis J. M. Plant-mediated and nonadditive effects of two global change drivers on an insect herbivore community // *Ecology*. — 2012. — Vol. 93. — P. 1892–1901.
- Harrington R., Fleming R. A., Woiwod I. P. Climate change impacts on insect management and conservation in temperate regions: can they be predicted? // *Agr. Forest Entomol.* — 2001. — Vol. 3. — P. 233–240.
- Hendry D. F., Pagan A., Sargan J. D. Dynamic specification // *Handbook of Econometrics, II* (Z. Griliches, M. D. Intriligator, eds.). Amsterdam: North-Holland, 1984. — P. 1023–1100.
- Kausrud K., Økland B., Skarpaas O., Gregoire J.-C., Erbilgin N., Stenseth N. C. Population dynamics in changing environments: the case of an eruptive forest pest species // *Biol. Rev.* — 2012. — Vol. 87. — P. 34–51.
- Logan J. A., Powell J. A., Ghost forests, global warming and mountain pine beetle (Coleoptera: Scolytidae) // *American Entomologist*. — 2001. — Vol. 47. — P. 160–173.

- Logan J. A., Régnière J., Powel J. A.* Assessing the impacts of global warming on forest pest dynamics // *Front. Ecol. Environ.* — 2003. — Vol. 1. — P. 130–137.
- Pesaran H. M., Shin Y.* An Autoregressive Distributed Lag Modelling Approach to Cointegration Analysis // *Econometrics and Economic Theory in the 20th Century: The Ragnar Frisch Centennial Symposium* / S. Strom (ed.). Cambridge: Cambridge University Press. — 1998. — P. 371–413.
- Preisler H. K., Hicke J. A., Ager A. A., Hayes J. L.* Climate and weather influence on spatial temporal patterns of mountain pine beetle population in Washington and Oregon // *Ecology.* — 2012. — Vol. 93. — P. 2421–2434.
- Raffa K. F., Aukema B. H., Bentz B. J., Carroll A. L., Hicke J. A., Turner M. G., Romme W. H.* Cross-scale drivers of natural disturbance prone to anthropogenic amplification: the dynamics of bark beetle eruption // *BioScience.* — 2008. — Vol. 58. — P. 501–517.
- Uniyal S. K., Uniyal A.* Climate change and large-scale degradation of spruce: common pattern across the globe // *Climate Research.* — 2009. — Vol. 38. — P. 261–263.
- Vanhanen H., Veteli T. O., Päivinen S., Kellomäki S., Niemelä P.* Climate change and range shifts in two insect defoliators: gypsy moth and nun moth — a model study // *Silva Fennica.* — 2007. — Vol. 41. — P. 621–638.