

СЕЛЬСКОЕ И ЛЕСНОЕ ХОЗЯЙСТВО

УДК 630*453:582.475:595.768.24(571.16)

doi: 10.17223/19988591/44/7

Э.М. Бисирова^{1,2}, С.А. Кривец¹

¹Институт мониторинга климатических и экологических систем СО РАН, г. Томск, Россия

²Томский филиал Всероссийского центра карантина растений, г. Томск, Россия

Динамика состояния древостоев пихты сибирской, поврежденных уссурийским полиграфом *Polygraphus proximus* Blandf. в Томской области

Работа выполнена в рамках государственного задания Института мониторинга климатических и экологических систем СО РАН при частичной поддержке РФФИ и Томской области (проект № 16-44-700782).

Приведены результаты шестилетних мониторинговых исследований (2012–2017 гг.) пихтовых древостоев Томской области, поврежденных уссурийским полиграфом *Polygraphus proximus*, инвазионным короедом дальневосточного происхождения. Выявлена отрицательная динамика в их состоянии, обусловленная деятельностью инвайдера и заключающаяся в повсеместном уменьшении доли здоровых особей пихты, увеличении доли ослабленных, сильно ослабленных и погибших деревьев, а также в массовом образовании валежа. Показано, что различия в степени и темпах деградации древостоев обусловлены как особенностями насаждений, в первую очередь качественным и количественным состоянием кормовой базы полиграфа, так и локальных очагов его размножения. Обнаружена значимая корреляционная взаимосвязь гибели деревьев в 2012–2014 гг. со среднемесячной температурой воздуха в 2011–2013 гг. в период развития *P. proximus*. Полученные данные являются базой для экологического мониторинга пихтарников Томской области и прогнозирования регионального лесообразовательного процесса.

Ключевые слова: биологические инвазии; насекомые-дендрофаги; мониторинг состояния лесных экосистем; *Abies sibirica* Ledeb., Томская область, Западная Сибирь.

Введение

Проблема биологических инвазий в связи с наблюдаемым во многих странах мира интенсивным вселением чужеродных видов в аборигенные экосистемы приобрела статус одной из приоритетных и фундаментальных проблем в исследованиях экосистем [1].

Среди животных-вселенцев насекомые занимают лидирующую позицию по количеству видов [2], а насекомые-дендрофаги во вторичном ареале способны вызвать дестабилизацию лесных экосистем и наносить значительный ущерб экономике [3]. Инвазии дендрофильных видов приводят к разнообразным экологическим эффектам, в том числе к таким долгосрочным последствиям, как снижение биологического разнообразия, изменение состава, структуры, функций биотических сообществ, нарушение местообитаний, распространение патогенов, не свойственных местным древесным популяциям, трансформация циклов биогеоценозов, гидрологического и энергетического балансов, которые создают угрозу продуктивности фитоценозов и вызывают их необратимые изменения [4–7]. Наиболее впечатляющие примеры колоссального ущерба экономике и природе связаны со стволовыми дендрофагами [8].

В Сибири в последние десятилетия зафиксированы активные процессы деградации пихтовых лесов, вызванные агрессивным поведением инвазионного короеда дальневосточного происхождения – уссурийского полиграфа *Polygraphus proximus* Blandford, 1894 (Coleoptera: Curculionidae, Scolytinae). Широкомасштабное усыхание пихтарников в результате формирования очагов массового размножения инвайдера отмечено в Кемеровской, Новосибирской, Томской областях, Алтайском и Красноярском краях, в Республике Алтай [9].

В связи со скрыто проходившей инвазией в сибирские темнохвойные экосистемы после случайного заноса с лесоматериалами уссурийский полиграф идентифицирован на территории Западной и Средней Сибири лишь в конце первого десятилетия нынешнего века [10, 11]. Однако с помощью методов дендрохронологии удалось установить, что *P. proximus* проник в пихтовые леса Красноярского края уже в 70-х годах прошлого столетия. Первые 30–40 лет после появления полиграфа его популяция проходила адаптацию в новых условиях, и лишь в начале 2000-х гг. образовались очаги массового размножения [12].

В Томской области наиболее ранние случаи гибели деревьев *Abies sibirica* Ledeb. от уссурийского полиграфа датируются, по дендрохронологическим данным, значительно позднее – в 2000 г., предполагается, что проникновение инвайдера на территорию области произошло в середине 1990-х годов [13]. Необычно сильное усыхание пихты в южных районах области отмечалось лесопатологами Томского центра защиты леса начиная с 2010 г. [14], что потребовало организации детальных научных исследований, в том числе длительных стационарных наблюдений за этим явлением для разработки технологии комплексного экологического мониторинга и прогнозирования состояния пихтарников в зоне инвазии уссурийского полиграфа. Центральное место в этих исследованиях занимают наблюдения за состоянием основного компонента лесных экосистем – древостоя. Цель настоящего сообщения – выявление пространственно-временных особенностей динамики

состояния поврежденных полиграфом пихтовых древостоев на юге Томской области на основе анализа результатов наземного мониторинга за шестилетний период исследований (2012–2017 гг.).

Материалы и методика исследований

Оценку состояния древостоев пихты сибирской и наблюдения за происходящими в них динамическими процессами осуществляли на 7 постоянных пробных площадях (ППП), заложенных на 3 модельных полигонах, где в условиях особого режима пользования (ограничения рубок) возможно проведение длительного мониторинга.

Первый модельный полигон ($56^{\circ}12'34''\text{N}$ $85^{\circ}02'21''\text{E}$) – особо охраняемая природная территория (ООПТ) государственный ландшафтный заказник областного значения «Ларинский» (в составе Коларовского участкового лесничества Томского лесничества, урочище Коларовское). Заказник находится на расстоянии 30 км к югу от г. Томска, расположен в нижнем течении р. Тугояковки (правого притока р. Томи), включает в себя эталонный участок переходной зоны от равнинной южной тайги к горной тайге Кузнецкого Алатау с фрагментами коренных темнохвойных лесов, в которых преобладает *Abies sibirica*. В этой части территории заказника заложены 4 пробные площади в квартале 16: ППП 1-12 (в выделе 13), ППП 2-12 (в выделе 15), ППП 3-12 (в выделе 14) и ППП 4-12 (в выделе 12).

Второй полигон ($56^{\circ}17'32''\text{N}$ $85^{\circ}28'25''\text{E}$) – окрестности пос. Басандайка (Межениновское участковое лесничество Томского лесничества, квартал 31, выдел 14). Модельный полигон представляет собой особо защитный участок леса вокруг населенного пункта с высокой долей пихты в составе древостоев, на котором заложена пробная площадь ППП 5-12.

Третий полигон ($56^{\circ}27'59''\text{N}$ $85^{\circ}06'09''\text{E}$) – ООПТ местного значения муниципального образования «Город Томск» Заварзинская лесная дача, расположенная у с. Заварзино, юго-восточнее г. Томска, на правом берегу р. Ушайки; крупный массив пригородных зеленых насаждений, в основном природного происхождения, имеет важное значение для рекреации, защиты территории от неблагоприятных природно-климатических и антропогенных факторов, в том числе от эрозионных процессов. На этой территории заложены две пробные площади: ППП 6-12 и ППП 7-12.

Пробные площади заложены в 2012 г. в соответствии с ОСТ 56-69–83, имеют прямоугольную форму, размеры 0,15–0,35 га в зависимости от густоты, полноты древостоя и его породного состава, с числом деревьев от 102 до 190. Выбор участков для закладки пробных площадей осуществлялся исходя из разнообразия породного состава, возрастной структуры и с учетом поврежденности инвайдером, выявленной в результате предварительных рекогносцировочных обследований модельных полигонов. Таксационные показатели древостоев, определенные по стандартным методикам лесоводственных исследований [15], представлены в табл. 1.

Таблица 1 [Table 1]

Таксационные показатели древостоев пихты сибирской на пробных площадях
[Inventory data of Siberian fir stands on sample plots] ($M \pm m$)

№ ППП [No. of sample plot]	Состав древостоя [Stand composition]	Древостой пихтовых элементов леса [Tree stands of fir forest elements]	Средний диаметр пихты, см [Average fir tree diameter, cm]	Средняя высота пихты, м [Average fir tree height, m]	Средний возраст пихты, лет [Average fir tree age, year]	Плотность [Stand density]	Класс бонитета [Quality class]	Тип леса [Forest type]
1-12	8A1Pns1P+Pn		28,6±0,9	24,1±0,9	90	1,1	II	мтр [phb]
2-12	6A3Pns1P		18,6±0,8	17,6±0,7	55	0,9	II	мтр [phb]
3-12	5P3A _I A _{II} 1Pns+Pn	I поколение [I generation]	30,5±1,3	22,7±0,7	95	1,2	II	ртр [vhb]
		II поколение [II generation]	13,3±0,5	13,6±0,4	55			
4-12	6A _I A _{II} 2Pns1P+Pt	I поколение [I generation]	30,2±1,1	26,5±0,6	95	1,0	I	мтр [phb]
		II поколение [II generation]	12,7±0,5	13,3±0,6	50			
5-12	10A+P, single Pns, Pt, B		27,9±0,8	24,7±0,7	60	1,0	I	ртр [vhb]
6-12	5A3P2Pns		27,9±1,5	20,1±1,2	70	1,2	II	мш [ms]
7-12	5Pns3A2P+Pn		22,1±0,8	20,5±2,6	115	0,6	III	ртр [vhb]

Примечание. А – пихта сибирская *Abies sibirica* Ledeb., Pns – сосна кедровая сибирская (кедр сибирский) *Pinus sibirica* Du Tour, P – ель сибирская *Picea obovata* Ledeb., Pn – сосна обыкновенная *Pinus sylvestris* L., Pt – осина *Populus tremula* L.; B – береза повислая *Betula pendula* Roth. A_I и A_{II} – первое и второе поколение пихты. Типы леса: мтр – мелко-травный, ртр – разнотравный, мш – мшистый (указаны до возникновения очагов массового размножения *P. proximus*).

[Note. A – *Abies sibirica* Ledeb., Pns – *Pinus sibirica* Du Tour, P – *Picea obovata* Ledeb., Pn – *Pinus sylvestris* L., Pt – *Populus tremula* L., B – *Betula pendula* Roth. Arabic numerals denote the percentage of species in the stand composition. A_I, A_{II} – first and second generation of fir. Forest type: phb – parviherbetum, vhb – variherbetum, ms – mosses (forest types are indicated before the emergence of *P. proximus* foci)].

Все деревья (особи с диаметром 8 см и выше) на пробной площади нумеровали белой масляной краской, что позволило проследить их индивидуальную судьбу в ходе ежегодных мониторинговых наблюдений. Каждое дерево

в древостое оценивали по комплексу визуальных признаков с использованием шкалы категорий жизненного состояния, разработанной с учетом взаимоотношений инвайдера и кормовой породы [16]. К I категории состояния относили здоровые деревья (без признаков ослабления, не атакованы полиграфом). II категория – ослабленные деревья (атакованы полиграфом, но не заселены, с единичными или умеренными потёками смолы из мест попыток поселения, с засмоленными входными отверстиями жуков). III категория – сильно ослабленные деревья (с обильными потёками смолы, атакованы полиграфом, на стволе имеются незасмоленные входные отверстия, без успешного поселения жуков на дереве). Деревья I, II и III категорий являются жизнеспособными. IV категория – усыхающие деревья (заселены полиграфом). V категория – деревья, погибшие в текущем году (свежий сухостой, отработанный полиграфом). VI категория – деревья, погибшие в прошлые годы (старый сухостой). При отсутствии жуков, по которым производится видовая идентификация, на деревьях V и VI категорий доказательством участия уссурийского полиграфа в их гибели являлось наличие старых потёков смолы на коре и специфических признаков развития *P. proximus* под корой (размеры и конфигурация маточных галерей, отпечатанных на заболони, и углубленные в заболонь куколочные колыбельки).

Долю деревьев каждой категории состояния в древостое рассчитывали по сумме квадратов площадей поперечного сечения стволов на высоте 1,3 м – показателю, коррелирующему с объемом стволов [17].

В качестве интегральных показателей состояния древостоя использованы индекс жизненного состояния и средневзвешенная категория состояния [18, 19]:

$$L = \frac{100 \sum g_i^2 + 70 \sum g_{II}^2 + 40 \sum g_{III}^2 + 5 \sum g_{IV}^2}{\sum G_i^2}, \quad (1)$$

$$AWC = \frac{\sum g_i^2 + 2 \sum g_{II}^2 + 3 \sum g_{III}^2 + 4 \sum g_{IV}^2 + 5 \sum g_{V}^2 + 6 \sum g_{VI}^2}{\sum G_i^2}, \quad (2)$$

где L – индекс жизненного состояния; $\sum g_1^2, \sum g_2^2, \sum g_3^2, \sum g_4^2, \sum g_5^2, \sum g_6^2$ – сумма квадратов площадей поперечного сечения деревьев здоровых, ослабленных, сильно ослабленных, усыхающих и сухостоя (свежего и старого) в исследуемом древостое; $\sum G_i^2$ – сумма квадратов площадей поперечного сечения деревьев всех категорий состояния; 100, 70, 40, 5 – коэффициенты, выражающие жизненное состояние здоровых, ослабленных, сильно поврежденных и отмирающих деревьев, %; AWC – средневзвешенная категория состояния деревьев в древостое.

Эти показатели характеризуют состояние древостоев в разных аспектах и дополняют друг друга: L отражает его «здоровье», AWC – так называемое «санитарное состояние», с акцентом на степень проявления патологическо-

го процесса [20].

По В.А. Алексееву [20], при показателе L 100–80% состояние древостоя оценивается как «здоровое», при 79–50% древостой считается ослабленным, при 49–20% – сильно ослабленным, при 19% и ниже – полностью разрушенным. С учетом средневзвешенной категории состояния выделено 5 степеней деградации древостоев: 1-я степень характеризуется отсутствием деградации (соответствует 1,0–1,5 балла AWC); 2-я степень – слабая деградация (AWC – 1,6–2,5); 3-я степень – средняя деградация (AWC – 2,6–3,5); 4-я степень – сильная деградация (AWC – 3,6–4,5) и 5-я степень – полная деградация (AWC – более 4,6).

Для отражения скорости образования ветровальных и буреломных деревьев в поврежденных полиграфом насаждениях за период наблюдений введена VII категория – «валеж».

Данные о погодных условиях в районе исследований получены с сайта https://gp5.ru/Архив_погоды_в_Томске

Корреляцию между долей усыхания пихты и ее средним возрастом и участием в составе древостоя, а также между величиной текущего усыхания древостоев и температурой воздуха в период исследований оценивали с помощью рангового коэффициента корреляции Спирмена [21].

Результаты исследования и обсуждение

Динамика состояния пихтовых древостоев в Ларинском заказнике

Первые признаки заметной гибели деревьев пихты в заказнике появились в начале 2000-х годов, что объясняли естественными процессами в наиболее сукцессионно зрелых древостоях, приводящими к их распаду, а в роли финального стресс-фактора ошибочно приняли усиление активности черного пихтового усача *Monochamus urussovi* (Fisch.) [22].

По данным дендрохронологического анализа, проведенного Д.А. Демидко [13], наиболее ранняя датировка отмирания деревьев пихты со следами развития уссурийского полиграфа в Ларинском заказнике приурочена к 2005 г. К настоящему времени в результате вспышки массового размножения *P. proximus* пихта усохла на 60% занимаемой ею площади на территории заказника.

В разных частях заказника деградация пихтового элемента леса в начале исследований проявлялась в различной степени (от слабой до полной). В дальнейшем она также имела разный характер погодичной динамики, что можно подробно рассмотреть на заложенных пробных площадях.

ППП 1-12. Исследованный темнохвойный древостой с преобладанием пихты сибирской (см. табл. 1) характеризуется широким распространением корневых и стволовых грибных патогенов (корневой губки *Heterobasidion annosum* (Fr.) Bref., опенка рода *Armillaria* spp., трутовика Гартига *Phellinus hartigii* (Allesch. & Schnabl) Pat., ржавчинного рака пихты *Melampsorella*

caryophyllacearum (DC.) J. Schröt.) как одного из важных природных факторов ослабления деревьев [23]. Следы развития полиграфа за весь период исследований обнаружены на 93,4% погибших деревьев пихты, которые составили 88,7% от их общего количества, при достаточно высокой плотности поселения *P. proximus* (в среднем 4,5 семьи/дм² поверхности ствола), что обусловило полную деградацию древостоя в период массового размножения инвайдера, выявленную уже в начале исследований (табл. 2). По-видимому, первичный очаг уссурийского полиграфа на территории заказника появился именно в данном насаждении.

Таблица 2 [Table 2]

Распределение деревьев пихты (%) по категориям состояния и динамика интегральных показателей состояния древостоя на ППП 1-12 [Distribution of fir trees (%) by categories of vitality on the sample plot 1-12]

Год обследования [Year of the survey]	Категории состояния [Category of vitality]							Средневзвешенная категория состояния, балл [Average weighted category of vitality, score]	Индекс жизненного состояния [Vitality index], %
	I	II	III	IV	V	VI	VII		
2012	0,0	0,2	0,0	2,4	0,3	97,1	0,0	5,9	0,2
2013	0,0	0,2	0,0	0,0	0,0	99,8	0,0	6,0	0,0
2014	0,0	0,03	0,02	0,0	0,0	92,95	7,0	6,0	0,0
2015	0,0	0,03	0,02	0,0	0,0	89,88	10,07	6,0	0,0
2016	0,0	0,03	0,02	0,0	0,0	79,52	20,43	6,0	0,0
2017	0,0	0,03	0,02	0,0	0,0	65,32	34,63	6,0	0,0

На момент обследования в 2012 г. общий отпад (суммарное количество деревьев IV–VI категорий состояния) составил 99,8% с абсолютным преобладанием старого сухостоя, что позволяет определить данный локальный очаг полиграфа как затухший. Текущий отпад (суммарное количество деревьев IV и V категорий состояния) составлял 2,7%, в том числе 2,4% – заселенные уссурийским полиграфом деревья IV категории. Немногочисленные живые деревья со следами попыток поселения инвайдера оценены как ослабленные.

В 2013 г. живые деревья не подвергались новым атакам жуков и не изменили своей категории состояния, а текущий отпад предыдущего года перешел в VI категорию.

В 2014 г. также новых попыток поселения полиграфа на жизнеспособные деревья не отмечено. Одно дерево из II категории перешло в III категорию в связи с обширными механическими повреждениями ствола из-за падения находящегося рядом старого сухостойного дерева. В целом 7% деревьев в этот год перешло из древостоя в вывал. Изменения в последующие годы заключались в увеличении буреломных и ветровальных деревьев, которые к концу периода наблюдений составили третью часть от исходного количества

деревьев в древостое (см. табл. 2).

Интегральные показатели древостоя за весь период наблюдений практически не изменились (см. табл. 2). Их значения свидетельствуют о полном распаде древостоя. Дальнейшие его изменения при естественном ходе развития будут заключаться в ежегодном образовании валежа, предположительно в размере 8,8% в год (исходя из 35% за предыдущие 4 года), а при возникновении экстремальных погодных явлений в виде шквальных ветров – в непредсказуемо более высоких объемах.

ППП 2-12. По таксационным показателям древостой пихты является самым молодым из всех обследованных (см. табл. 1). В данном древостое в 2012 г. следы развития уссурийского полиграфа встречались на 34,2% деревьев пихты от их общего числа и на 77% погибших деревьев, в 2017 г. на 45,9 и 82,6% соответственно. Плотность поселения *P. proximus* составляла в среднем 3,5 семьи/дм² поверхности ствола. Изначально древостой имел среднюю степень деградации, в нем преобладали жизнеспособные особи пихты I–III категорий состояния, суммарно составившие 82% деревьев. Общий отпад представлен преимущественно сухостоем прошлых лет, а текущий отпад включал всего 2 тонкомерных дерева V категории состояния, отработанных полиграфом (табл. 3).

Таблица 3 [Table 3]

Распределение деревьев пихты (%) по категориям состояния и динамика интегральных показателей состояния древостоя на ППП 2-12
[Distribution of fir trees (%) by categories of vitality and dynamics of integrated indicators on sample plot 2-12]

Год обследования [Year of the survey]	Категории состояния [Category of vitality]							Средневзвешенная категория состояния, балл [Average weighted category of vitality, score]	Индекс жизненного состояния [Vitality index], %
	I	II	III	IV	V	VI	VII		
2012	25,1	38,4	18,5	0,0	0,04	17,96	0,0	2,7	59,4
2013	13,8	27,8	15,8	5,3	15,5	21,8	0,0	3,5	39,8
2014	12,2	24,2	15,7	0,0	10,6	32,7	4,6	3,7	37,1
2015	12,2	24,2	15,7	0,0	0,0	43,1	4,8	3,8	37,1
2016	12,2	24,2	15,7	0,0	0,0	43,1	4,8	3,8	37,1
2017	12,2	23,6	10,6	0,0	0,0	40,4	13,2	3,8	37,1

В 2013 г. на этом участке резко уменьшилось количество жизнеспособных деревьев, суммарно на 24,6% по сравнению с 2012 г., что обусловлено продолжением освоения полиграфом доступной кормовой базы, соответственно увеличился общий отпад. Текущий отпад составил 20,8% и характеризовал насаждение как действующий очаг полиграфа. Значительное снижение количества здоровых деревьев связано со свежими атаками полиграфа. Состояние древостоя в этом году оценено как пограничное между средней и сильной степенью деградации. С 2014 г. процесс массового от-

мирания пихты замедлился, в дальнейшем состояние древостоя оставалось стабильным, появился валеж, размер которого увеличился к 2017 г. в 3 раза.

ППП 3-12. Пихтовый элемент древостоя представлен двумя возрастными поколениями, которые суммарно составляют 40% (см. табл. 1). В 2012 г. развитие полиграфа отмечено на 67,1% деревьев пихты от их общего числа и на 95,9% погибших деревьев, в 2017 г. – на 77,1 и 96,4% соответственно. Плотность поселения уссурийского полиграфа – в среднем 4 семьи/дм² поверхности ствола.

Динамика состояния возрастных поколений пихты существенно различалась, что выразилось в величине общего и текущего отпада и изменении категорий жизнеспособных деревьев по годам (табл. 4). На момент первичного обследования второе поколение пихты повреждено уссурийским полиграфом сильнее, чем первое. Общий отпад в нем почти вдвое больше, а текущий отпад значительно меньше, чем в первом поколении, что объясняется сравнительно небольшим объемом кормовой базы полиграфа – живые деревья немногочисленны. Полная деградация второго поколения пихты обусловлена высокой долей деревьев, погибших в предыдущие годы существования очага полиграфа.

Таблица 4 [Table 4]

**Распределение деревьев пихты (%) по категориям состояния
и динамика интегральных показателей состояния древостоя на ППП 3-12**
[Distribution of fir trees (%) by categories of vitality
and dynamics of integrated indicators on the sample plot 3-12]

Год обследования [Year of the survey]	Возрастное поколение [Generation]	Категории состояния [Category of vitality]							Средневзвешенная категория состояния, балл [Average weighted category of vitality, score]	Индекс жизненного состояния [Vitality index], %
		I	II	III	IV	V	VI	VII		
2012	I	0,0	40,7	12,3	16,2	2,7	28,1	0,0	3,7	34,2
	II	9,2	9,2	1,8	8,2	0,0	71,6	0,0	5,0	16,7
2013	I	0,0	34,7	9,0	25,0	0,0	30,2	1,1	3,8	29,5
	II	9,2	9,2	0,0	0,0	10,1	67,0	4,5	5,0	16,4
2014	I	0,0	29,4	14,3	0,0	15,6	39,6	1,1	4,6	26,6
	II	9,2	9,2	0,0	0,0	0,0	76,1	5,5	5,1	16,7
2015	I	0,0	18,6	14,3	0,0	0,0	55,2	11,9	4,7	21,3
	II	9,2	9,2	0,0	0,0	0,0	67,9	13,7	5,0	18,1
2016	I	0,0	15,0	17,3	0,0	0,0	54,3	12,9	4,7	20,0
	II	9,2	9,2	0,0	0,0	0,0	67,9	13,7	5,0	18,1
2017	I	0,0	15,0	17,3	0,0	0,0	32,7	35,0	4,2	34,6
	II	9,2	3,7	0,0	0,0	0,0	65,7	21,4	5,0	25,8

Среди первого поколения в 2012 г. текущий отпад составил 18,9%, что свидетельствует о наличии действующего очага размножения полиграфа. Максимум текущего отпада (25%) зафиксирован в 2013 г. Вероятно, сначала *P. proximus*

наращивал плотность популяции на более мелких угнетенных и ослабленных деревьях второго поколения, а при увеличении численности стал осваивать деревья и старшего возраста. Начиная с 2015 г. темпы отмирания пихты снизились, но сохранилась тенденция ухудшения состояния живых деревьев первого поколения, что привело в конечном итоге к его полной деградации (см. табл. 4).

Разрушение древостоя за период исследований сопровождалось массовым образованием валежа, который в первом поколении составил 35%, а во втором – 21,4% деревьев, что формально привело к изменению интегральных показателей состояния древостоев в сторону улучшения, однако не повлияло на их качественную характеристику.

ППП 4-12. Пихтовый элемент также характеризуется наличием двух возрастных поколений, но отличается от предыдущего большим его участием в составе древостоя (см. табл. 1). Следы развития *P. proximus* отмечены в 2012 г. на 65,1% от общего числа деревьев пихты и на 93,1% погибших деревьев, в 2017 г. – на 81,6 и 95,5 % деревьев соответственно. Средняя плотность поселения уссурийского полиграфа – 4,9 семьи/дм² поверхности ствола.

Динамика состояния возрастных поколений пихты сходна с таковой на ППП 3-12. Общими чертами являются более сильная исходная поврежденность деревьев второго поколения и более низкие темпы изменения его состояния за период исследования (табл. 5).

Таблица 5 [Table 5]

**Распределение деревьев пихты (%) по категориям состояния
и динамика интегральных показателей состояния древостоя на ППП 4-12**
[Distribution of fir trees (%) by categories of vitality and dynamics of integrated indicators on the sample plot 4-12]

Год обследования [Year of the survey]	Возрастное поколение [Generation]	Категории состояния [Category of vitality]							Средне- взвешенная категория состояния, балл [Average weighted category of vitality, score]	Индекс жизненного состояния [Vitality index], %
		I	II	III	IV	V	VI	VII		
2012	I	0,0	27,5	25,1	0,0	5,7	41,7	0,0	4,1	29,2
	II	0,7	18,1	5,3	0,0	0,0	75,9	0,0	5,1	14,9
2013	I	0,0	11,1	4,5	14,6	7,1	62,7	0,0	5,1	10,4
	II	0,0	18,7	2,2	0,0	3,0	76,1	0,0	5,2	12,8
2014	I	0,0	10,8	3,3	0,0	7,2	77,9	0,8	5,4	9,0
	II	0,0	12,7	8,2	0,0	0,0	67,9	11,2	5,2	13,7
2015	I	0,0	10,8	3,3	0,0	0,0	79,4	6,5	5,4	9,5
	II	0,0	12,7	8,2	0,0	0,0	56,0	23,1	5,0	15,8
2016	I	0,0	10,8	3,3	0,0	0,0	72,0	13,9	5,4	10,3
	II	0,0	12,7	8,2	0,0	0,0	53,7	25,4	5,0	16,3
2017	I	0,0	10,8	3,3	0,0	0,0	63,2	22,7	5,3	11,5
	II	0,0	12,7	8,2	0,0	0,0	45,5	33,6	4,9	18,3

В 2012–2014 гг. на этом участке Ларинского заказника наблюдались самые высокие темпы отмирания пихты среди деревьев первого поколения. Максимальный текущий отпад зафиксирован в 2013 г. и составил 21,7%, что подтверждает наличие действующего очага массового размножения полиграфа в этот период. Столь стремительные темпы деградации обусловлены продолжением процесса заселения полиграфом ослабленных в предыдущие годы деревьев. В 2014 г. тенденция ухудшения состояния древостоя сохранилась, но темпы деградации по сравнению с прошлым годом невысоки, что связано, видимо, с истощением запасов кормовой породы и процессом затухания вспышки размножения *P. proximus*. В дальнейшем динамические процессы касались только сухостойных деревьев, активно накапливался валеж.

Изменения во втором поколении пихты также более выражены в первые три года исследований, когда ранее ослабленные деревья вновь подвергались атакам *P. proximus*, единичные здоровые деревья перешли в категорию «ослабленные», часть сильно ослабленных особей заселилась инвайдером и усохла. С 2015 г. наблюдались лишь процессы образования валежа.

Динамика состояния пихтового древостоя в окр. пос. Басандайка

В породном составе древостоя на ППП 5-12 пихта сибирская является абсолютным доминантом и представлена одним поколением (см. табл. 1). По дендрохронологическим данным, гибель первых деревьев от уссурийского полиграфа в этом насаждении датируется 2001 г. [13]. Следы развития *P. proximus* в 2012 г. отмечены на 31,9% от общего числа деревьев пихты, в 2017 г. – на 43,8% деревьев и за весь период исследования встречались на 100% погибших деревьев. Плотность поселения в среднем составила 3,7 семьи/дм² поверхности ствола.

Оценка состояния древостоя проведена в 2012, 2016 и 2017 гг. Динамика состояния в этом древостое выражена слабо, по интегральным показателям он изначально относился к «сильно ослабленным» со средней степенью деградации и оставался таковым в течение всего периода исследования (табл. 6).

Таблица 6 [Table 6]

Распределение деревьев пихты (%) по категориям состояния и динамика интегральных показателей состояния древостоя на ППП 5-12
[Distribution of fir trees (%) by categories of vitality and dynamics of tree stand integrated indicators on the sample plot 5-12]

Год обследования [Year of the survey]	Категории состояния [Category of vitality]							Средневзвешенная категория состояния, балл [Average weighted category of vitality, score]	Индекс жизненного состояния [Vitality index], %
	I	II	III	IV	V	VI	VII		
2012	15,8	57,3	5,3	0,2	0,1	21,3	0,0	2,8	58,1
2016	15,8	44,5	4,0	0,0	1,7	28,5	5,5	3,2	51,4
2017	15,3	40,2	6,9	0,0	1,5	30,2	5,9	3,3	48,9

Распределение деревьев разных категорий состояния по годам достаточно равномерное, жизнеспособные деревья преобладали во все годы наблюдений. За 6 лет от полиграфа погибло 16% деревьев, что не выходит за рамки естественного отпада (2,7% в год). Вместе с тем гибель деревьев с 2012 до 2016 г. составила 14,1% (4,7% в год), а за 2017 г. всего 1,9%. Это позволяет предположить, что, как и в Ларинском заказнике, наибольшие темпы отмирания деревьев в данном насаждении приурочены к 2013–2014 гг.

Динамика состояния пихтовых древостоев в Заварзинской лесной даче

По дендрохронологическим данным наиболее раннее датирование гибели деревьев пихты от уссурийского полиграфа в районе Заварзино относится к 2004 г. [13].

ППП 6-12. Исследованный древостой высокополнотный, одновозрастный, с преобладанием пихты (см. табл. 1). Насаждение находится в непосредственной близости от линии электропередач, проложенной в 2006 г. и явившейся основной причиной его ослабления. Число отработанных стволовыми насекомыми с участием *P. proximus* деревьев к началу исследований в 2012 г. составляло 34,6 % от общего числа деревьев пихты и 73% от числа погибших деревьев, в 2017 г. – 47,4 и 77,1% соответственно. Плотность поселения полиграфа на большинстве отработанных деревьев – от 3,1 до 4,9 семьи/дм² поверхности ствола.

К началу исследований пихтовый древостой сильно ослаблен, общий отпад составлял 43,4%, количество текущего отпада (11,9%) характеризовало его как патологический (табл. 7). Наибольшая гибель деревьев произошла в 2013 г. (14,4%). Показатели текущего отпада в 2012–2013 гг. свидетельствуют о наличии в насаждении действующего очага массового размножения полиграфа с затуханием в последующие годы.

Таблица 7 [Table 7]

Распределение деревьев пихты (%) по категориям состояния и динамика интегральных показателей состояния древостоя на ППП 6-12
[Distribution of fir trees (%) by categories of vitality and dynamics of integrated indicators on the sample plot 6-12]

Год обследования [Year of the survey]	Категории состояния [Category of vitality]							Средневзвешенная категория состояния, балл [Average weighted category of vitality, score]	Индекс жизненного состояния [Vitality index], %
	I	II	III	IV	V	VI	VII		
2012	13,4	36,5	6,7	7,8	4,1	31,5	0,0	3,5	42,0
2013	11,3	32,7	2,3	3,8	10,6	38,6	0,7	3,9	35,6
2014	10,1	30,7	1,8	0,0	1,4	55,3	0,7	4,2	32,5
2015	10,0	27,2	1,8	0,0	0,0	46,8	14,2	4,1	34,7
2016	10,0	23,9	5,1	0,0	0,0	43,5	17,5	4,1	34,9
2017	10,0	23,9	1,8	0,0	3,3	42,3	18,6	4,1	33,9

За годы наблюдений древостой трансформировался из сильно ослабленного в отмирающий, степень его деградации изменилась со средней на сильную. С 2015 г. резко (в 20 раз по сравнению предшествующими годами) выросли темпы образования валежа, который к 2017 г. составил почти пятую часть исходного количества деревьев (см. табл. 7).

ППП 7-12. Древостой характеризуется самой низкой полнотой и долей пихты в составе по сравнению с другими обследованными участками (см. табл. 1). В 2012 г. число погибших от полиграфа деревьев пихты составило 22,6% от общего их числа, в 2017 г. – 33,3%. Плотность поселения на большинстве деревьев низкая (2,1–3,2 семьи/дм²).

За весь период исследований максимальный общий отпад составил 5,1% и приходился на 2013 и 2015 гг. (табл. 8). Текущий отпад не превышал 1,7%. Основные процессы в этом насаждении, в которых участвовал *P. proximus*, происходили среди жизнеспособных деревьев. За 6 лет доля здоровых деревьев уменьшилась на 21,5%, увеличилось количество деревьев, ослабленных в разной степени. С 2014 г. наблюдался переход сухостоя в валеж (0,2%), который в последующие годы увеличился до 4,6%. Состояние древостоя в 2012–2013 гг. оценено как здоровое, в дальнейшем проявились признаки начального ослабления и слабой деградации (табл. 8).

Таблица 8 [Table 8]

**Распределение деревьев пихты (%) по категориям состояния
и динамика интегральных показателей состояния древостоя на ППП 7-12**
[Distribution of fir trees (%) by categories of vitality
and dynamics of integrated indicators on the sample plot 7-12]

Год обследования [Year of the survey]	Категории состояния [Category of vitality]							Средневзвешенная категория состояния, балл [Average weighted category of vitality, score]	Индекс жизненного состояния [Vitality index], %
	I	II	III	IV	V	VI	VII		
2012	73,7	20,8	1,8	0,2	0,2	3,3	0,0	1,4	89,0
2013	65,6	28,3	1,0	0,0	1,5	3,6	0,0	1,5	85,8
2014	53,5	34,3	7,0	0,1	0,0	4,9	0,2	1,7	80,4
2015	53,4	34,3	5,6	0,0	1,7	3,4	1,6	1,7	81,0
2016	53,2	34,3	5,7	0,1	0,0	5,0	1,7	1,7	80,9
2017	52,2	32,1	7,7	0,1	0,0	3,3	4,6	1,7	81,5

Анализ полученных данных показал, что динамические процессы в исследованных древостоях на юге Томской области протекали сходным образом. Состояние древостоев было неудовлетворительным уже к началу исследований в 2012 г. (за исключением древостоя на ППП 7-12) вследствие усыхания деревьев в предшествовавшие годы, с активным участием в этом процессе уссурийского полиграфа и в дальнейшем характеризовалось отрицательной динамикой, связанной с деятельностью инвайдера. Общие тенденции проявились в повсеместном уменьшении доли здоровых особей

пихты, увеличении доли ослабленных, сильно ослабленных и погибших деревьев, а также в массовом образовании валежа в последние 3 года, главным образом, за счет слома и вывала сухостоя. Отсутствует значимая связь степени и скорости процессов усыхания (т.е. количества усохших деревьев за 6-летний период и среднего текущего отпада) с долей пихты в составе древостоя ($p=0,40$) и средним возрастом пихтового элемента ($p=0,50$). Формирование отпада первоначально происходило за счет угнетенных и ослабленных тонкомерных деревьев второго поколения, более подверженных атакам *P. proximus*. Тенденция заселения уссурийским полиграфом сначала деревьев с меньшим диаметром также отмечена в работе Ю.Н. Баранчикова с соавт. [12].

На рис. 1 приведены виталитетные спектры исследованных древостоев [24], являющиеся удобным интегральным индикатором состояния насаждений, в наглядной графической форме демонстрирующие закономерности выявленных динамических процессов и позволяющие прогнозировать качественные перестройки в древесном ярусе, заключающиеся в изменении породной, возрастной и виталитетной структуры. Обращают на себя внимание стремительные темпы накопления больших объемов мертвых деревьев в поврежденных насаждениях, что в будущем может привести к значительному изменению углерододепонирующей функции и увеличению пожарной опасности в таких лесах.

Ранее исследованиями на этих же пробных площадях показано, что резкое повышение уровня освещенности в поврежденных лесах из-за разрушения материнского полога пихтовых лесов сопровождается изменением микроклимата, состава и структуры подлеска, травяного и мохового ярусов и как следствие доминирующих экологических групп в растительных сообществах [16]. Последствием вызванной уссурийским полиграфом деградации древостоев также является трансформация микрозональной организации сообществ в направлении увеличения площади подкроновых участков сухостоя, а в дальнейшем бурелома, с перспективой восстановления куртинно-разновозрастных древостоев за счет среднего и мелкого подроста предварительного возобновления [25].

Наряду с особенностями динамики состояния в каждом из изученных древостоев для большинства из них общим явилось увеличение текущего отпада деревьев в 2012–2014 гг. и максимальное его образование в 2013 г., что, по-видимому, обусловлено погодными условиями в районе исследований, имеющими большое значение как в жизни короедов, так и физиологии их кормовых растений [26, 27].

Обнаружена значимая корреляционная взаимосвязь ($r_s=0,5$, $p=0,040$) гибели деревьев от полиграфа в 2012–2014 гг. со среднемесячной температурой воздуха в 2011–2013 гг. в период развития *P. proximus*. Повышенная температура теплого сезона в 2011–2012 гг., особенно жаркая и сухая погода 2012 г., с одной стороны, способствовала успешному развитию двух поколений уссурийского полиграфа и росту его активности, с другой стороны, вызвала ослабление деревьев из-за водного стресса, что в 2013 г. реализовалось в резком увеличении их гибели (рис. 2).

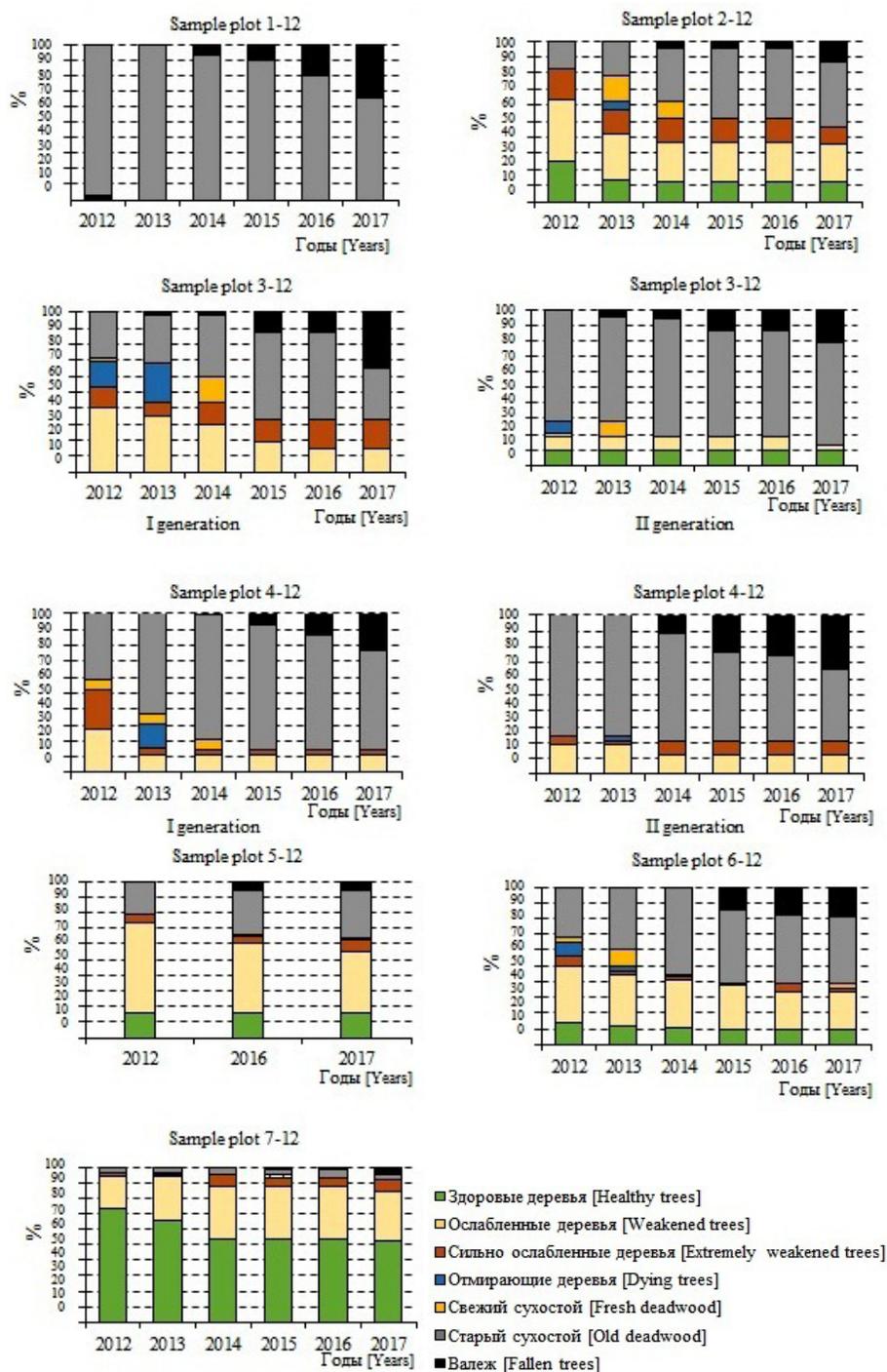


Рис. 1. Виталитетные спектры исследованных древостоев пихты
 [Fig. 1. Vitality spectra of the studied fir stands]

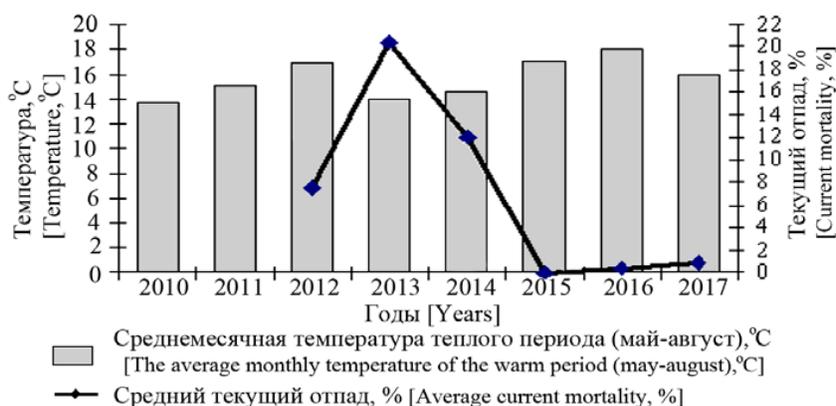


Рис. 2. Динамика текущего отпада деревьев пихты сибирской и температура воздуха в Томском районе в период развития *Polygraphus proximus*
[Fig. 2. Dynamics of the current mortality of Siberian fir trees and air temperature in Tomsk district during *Polygraphus proximus* development]

Снижение текущего отпада в последующие годы, по-видимому, обусловлено исчерпанием доступной кормовой базы и затуханием очагов полиграфа.

Сходная динамика состояния древостоев выявлена на пробных площадях в еловых лесах Подмосковья после засухи 2010 г., которая усугубила начавшееся ранее массовое размножение короеда типографа, благоприятствовала росту его численности и привела в 2012 г. к резкому увеличению заселенности деревьев, текущего и общего отпада деревьев и масштабному усыханию ельников [28].

Заключение

К началу исследований в 2012 г. все изученные пихтовые древостои оказались в большей или меньшей степени поврежденными уссурийским полиграфом, что подтверждает его негативное воздействие в течение более или менее длительного предшествующего периода. Различия в нарушенности древостоев обусловлены локальным проявлением факторов ослабления пихты: внутривидовых (конкурентное подавление второго поколения в разновозрастных древостоях на ППП 3-12 и 4-12), межвидовых (корневых и стволовых грибных патогенов на ППП 1-12, 2-12, 3-12) и антропогенных (резко осветление при прокладке ЛЭП, ППП 6-12), что определило качественное и количественное состояние кормовой базы *P. proximus* и его численность.

Последующие стационарные наблюдения выявили повсеместное усиление деградации древостоев, выразившееся в снижении доли жизнеспособных деревьев и активном накоплении валежа. В простых однопорodных и смешанных древостоях характер динамических процессов в целом сходен

независимо от типа леса и среднего возраста пихтового элемента. В сложных разновозрастных древостоях раньше усыхали угнетенные особи с наименьшим диаметром.

Темпы деградации различались по годам, наиболее высокие их значения отмечены после лет с жаркой и сухой погодой, вызвавшей ослабление пихты и повышение численности уссурийского полиграфа.

Достигнутый к настоящему времени уровень деградации пихтовых древостоев является одним из важных предикторов краткосрочного прогноза ухудшения их состояния. Наибольшее опасение вызывают древостои на ООПТ: в Ларинском ландшафтном заказнике количество жизнеспособных деревьев, по данным пробных площадей, составляет от 14,1 до 46,4%, а валеж – более 35%, в Заварзинской лесной даче в древостоях с преобладанием пихты количество жизнеспособных деревьев 35,7%, валежа 18,6%.

Полученные данные являются базой для экологического мониторинга пихтарников Томской области и прогнозирования регионального лесообразовательного процесса.

Литература

1. Sutherland W.J., Freckleton R.P., Godfray H.C.J., Beissinger S.R., Benton T., Cameron D.D., Carmel Y., Coomes D.A., Coulson T., Emmerson M.C., Hails R.S., Hays G.C., Hodgson D.J., Hutchings M.J., Johnson D., Jones J.P.G., Keeling M.J., Kokko H., Kunin W.E., Lambin X., Lewis O.T., Malhi Y., Mieszkowska N., Milner-Gulland E. J., Norris K., Phillimore A.B., Purves D.W., Reid J.M., Reuman D.C., Thompson K., Travis J.M.J., Turnbull L.A., Wardle D.A., Wiegand T. Identification of 100 fundamental ecological questions // *Journal of Ecology*. 2013. Vol. 101. PP. 58–67. doi: [10.1111/1365-2745.12025](https://doi.org/10.1111/1365-2745.12025)
2. Roques A., Lees D. Introductory notes to factsheets. Chapter 14 // *BioRisk*. 2010. Vol. 4, Iss. 2. PP. 855–1021. doi: [10.3897/biorisk.4.69](https://doi.org/10.3897/biorisk.4.69)
3. Pimentel D., Zuniga R., Morrison D. Update on the environmental and economic costs associated with alien-invasive species in the United States // *Ecological Economics*. 2005. Vol. 52. PP. 273–288. doi: [10.1016/j.ecolecon.2004.10.002](https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2004.10.002)
4. Lovett G.M., Canham C.D., Arthur M.A., Weathers K.C., Fitzhugh R.D. Forest ecosystems responses to exotic pests and pathogens in eastern North America // *BioScience*. 2006. Vol. 56, № 5. PP. 395–405.
5. Kenis M., Auger-Rosenberg M.-A., Roques A., Timms L., Péré C., Cock M.J.W., Setelle J., Augustin S., Lopez-Vaamonde C. Ecological effects of invasive alien insects // *Biological Invasions*. 2008. Vol. 11, Iss. 1. PP. 21–45. doi: [10.1007/978-1-4020-9680-8_3](https://doi.org/10.1007/978-1-4020-9680-8_3)
6. Økland B., Erbilgin N., Scarpaas O., Christiansen E., Långström B. Inter-species interactions and ecosystems effects of non-indigenous invasive and native tree-killing bark beetles // *Biological Invasions*. 2011. Vol. 13, iss. 5. PP. 1151–1164. <https://doi.org/10.1007/s10530-011-9957-2>
7. Баранчиков Ю.Н. Инвазии дендрофильных насекомых – источник хозяйственных проблем и полигон для эколого-эволюционных исследований // *Экологические и экономические последствия инвазий дендрофильных насекомых: мат. Всеросс. конф., Красноярск, 25–27 сентября 2012 г. / отв. ред. Ю.Н. Баранчиков. Красноярск : ИЛ СО РАН, 2012. С. 6–11.*

8. Aukema J.E., Leung B., Kovacs K., Chivers C., Britton K.O., Englin J., Frankel S.J., Haight R.G., Holmes T.P., Liebhold A.M., McCullough D.G., Von Holle B. Economic impacts of non-native forest insects in the continental United States. PLoS ONE. 2011. Vol. 6, iss. 9. PP. 1–7. doi:[10.1371/journal.pone.0024587](https://doi.org/10.1371/journal.pone.0024587)
9. Кривец С.А., Керчев И.А., Бисирова Э.М., Демидко Д.А., Петько В.М., Баранчиков Ю.Н. Распространение уссурийского полиграфа *Polygraphus proximus* Blandf. (Coleoptera, Curculionidae: Scolytinae) в Сибири // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2015. Вып. 211. С. 33–45.
10. Баранчиков Ю.Н. Козволюционные аспекты инвазийности лесных дендрофильных насекомых // Известия Санкт-Петербургской государственной лесотехнической академии. 2010. Вып. 192. С. 30–39.
11. Баранчиков Ю.Н., Петько В.М., Астапенко С.А., Акулов Е.Н., Кривец С.А. Уссурийский полиграф – новый агрессивный вредитель пихтовых лесов Сибири // Лесной вестник. Вестник Московского государственного университета леса. 2011. Вып. 4. С. 78–81.
12. Баранчиков Ю.Н., Демидко Д.А., Лаптев А.В., Петько В.М. Динамика отмирания деревьев пихты сибирской в очаге уссурийского полиграфа // Лесной вестник. Вестник Московского государственного университета леса. 2014. Т. 18, вып. 6. С. 132–138.
13. Демидко Д.А. Датировка инвазии полиграфа уссурийского *Polygraphus proximus* Blandford (Coleoptera: Curculionidae, Scolytinae) на территорию Томской области // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. 2014. Вып. 207. С. 225–234.
14. Кривец С.А., Керчев И.А., Кизеев Ю.М., Кожурин М.А., Козак Р.Г., Филимонов М.Н., Чемоданов А.В., Чугин В.С. Уссурийский полиграф *Polygraphus proximus* Blandf. (Coleoptera, Scolytidae) в пихтовых лесах Томской области // Материалы Всероссийской конференции с международным участием «Болезни и вредители в лесах России: XXI век» и V ежегодных чтений памяти О.А. Катаева. Екатеринбург, 20–24 сентября 2011 г. Красноярск : ИЛ СО РАН, 2011. С. 53–55.
15. Чмыр А.Ф., Маркова И.А., Сеннов С.Н. Методология лесоводственных исследований : учеб. пособие. СПб. : ЛТА, 2001. 96 с.
16. Krivets S.A., Bisirova E.M., Kerchev I.A., Pats E.N., Chernova N.A. Transformation of Taiga ecosystems in the Western Siberian invasion focus of four-eyed fir bark beetle *Polygraphus proximus* Blandford (Coleoptera: Curculionidae, Scolytinae) // Russian Journal of Biological Invasions. 2015. Vol. 6, № 2. PP. 94–108. doi: [10.1134/S2075111715020058](https://doi.org/10.1134/S2075111715020058)
17. Демидко Д.А. Состояние кедровых древостоев Северо-Восточного Алтая и методы его оценки // Лесоведение. 2011. № 1. С. 19–27.
18. Alexeyev V. Forest health diagnosis and its application in air pollution impact studies // Air pollution effects on vegetation including forest ecosystems. Proceedings of the Second US-USSR Symposium. 1989. PP. 135–140.
19. Методы мониторинга вредителей и болезней леса: справочник «Болезни и вредители в лесах России» / под общ. ред. В.К. Тузова. М. : ВНИИЛМ, 2004. Т. III. 200 с.
20. Алексеев В.А. Определение жизненного состояния древостоев // Труды Санкт-Петербургского научно-исследовательского института лесного хозяйства. Вып. 2 (12). СПб., 2004. С. 24–33.
21. Кендалл М., Стьюарт А. Статистические выводы и связи. М. : Наука, 1973. 899 с.
22. Лойко С.В., Герасько Л.И., Куликова О.Р. Сукцессии растительности на дерново-подзолистых почвах подтайги Томь-Яйского междуречья // Вестник Томского государственного университета. Биология. 2010. № 4. С. 32–40.
23. Фалалеев Э.Н. Пихта. М. : Лесная промышленность, 1982. 86 с.
24. Ярмишко В.Т., Горшков В.В., Ставрова Н.И. Виталитетная структура *Pinus sylvestris* L. в лесных сообществах с разной степенью и типом антропогенной нарушенности (Кольский полуостров) // Растительные ресурсы. 2003. Т. 39, вып. 4. С. 1–18.

25. Дебков Н.М. Особенности возобновительных процессов пихтовых лесов в связи с трансформацией их микро мозаичной организации под воздействием уссурийского полиграфа // Вестник Поволжского государственного технологического университета. Серия: Лес. Экология. Природопользование. 2017. № 1 (33). С. 5–16. doi: [10.15350/2306-2827.2017.1.5](https://doi.org/10.15350/2306-2827.2017.1.5)
26. Bark and wood boring insects in living trees in Europe, a synthesis / ed. by F. Lieutier, K.R. Day, A. Battisti, J.-C. Grégoire and H.F. Evans. Springer, 2004. 569 p. doi: [10.1007/978-1-4020-2241-8](https://doi.org/10.1007/978-1-4020-2241-8)
27. Bark beetles. Biology and ecology of native and invasive species / ed. by F.E. Vega and R.W. Hofstetter. Academic Press of Elsevier, 2015. 620 p. doi: [10.1016/C2013-0-04752-4](https://doi.org/10.1016/C2013-0-04752-4)
28. Лямцев Н.И., Малахова Е.Г. Динамика санитарного состояния еловых лесов Подмосквья после засухи 2010 г. // Лесной вестник. Вестник Московского государственного университета леса. 2013. Т. 18, вып. 6. С. 82–89.

Поступила в редакцию 26.08.2018 г.; повторно 17.10.2018 г.;
принята 05.12.2018 г.; опубликована 27.12.2018 г.

Авторский коллектив:

Бисирова Эльвина Михайловна – н.с. лаборатории мониторинга лесных экосистем Института мониторинга климатических и экологических систем СО РАН (Россия, 634055, г. Томск, пр-т Академический, 10/3); н.с. Томского филиала Всероссийского центра карантина растений (Россия, 634069, г. Томск, пр-т Фрунзе, 109А).

Е-mail: bisirovaem@mail.ru

Кривец Светлана Арнольдовна – канд. биол. наук, в.н.с. лаборатории мониторинга лесных экосистем Института мониторинга климатических и экологических систем СО РАН (Россия, 634055, г. Томск, пр-т Академический, 10/3).

Е-mail: krivec_sa@mail.ru

For citation: Bisirova EM, Krivets SA. Dynamics of the state of Siberian fir tree stands damaged by the four-eyed fir bark beetle *Polygraphus proximus* Blandf. in Tomsk Oblast. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Biologiya = Tomsk State University Journal of Biology*. 2018;44:118-140. doi: [10.17223/19988591/44/7](https://doi.org/10.17223/19988591/44/7) In Russian, English Summary

Elvina M. Bisirova^{1,2}, Svetlana A. Krivets¹

¹ *Institute of Monitoring of Climatic and Ecological Systems, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, Tomsk, Russian Federation*

² *Tomsk Branch of the All-Russian Plant Quarantine Center, Russian Federation*

**Dynamics of the state of Siberian fir tree stands damaged
by the four-eyed fir bark beetle *Polygraphus proximus* Blandf. in Tomsk Oblast**

In connection with the hidden invasion into Siberian dark-coniferous ecosystems after an accidental drift with timber, the four-eyed fir bark beetle was identified in the territory of Southern Siberia only at the end of the first decade of this century (Baranchikov YuN, 2010; Baranchikov YuN et al, 2011). The first 30-40 years after emergence of the four-eyed fir bark beetle, its population underwent adaptation in new conditions, and only at the beginning of the 2000s the outbreak foci were formed (Baranchikov YuN et al, 2014). In Tomsk Oblast, the earliest cases of death of *Abies sibirica* Ledeb trees. from *Polygraphus proximus* were registered in 2000, according to dendrochronological data. It is supposed that the invader penetrated the territory of Tomsk Oblast in the mid 1990s (Demidko DA, 2014). Forest pathologists of Tomsk Forest Health Centre (Krivets SA et al, 2011) have noted unusually strong drying of fir

trees in the south of Tomsk Oblast since 2010. The aim of the research was to analyze spatial and temporal characteristics of *Polygraphus proximus* Blandf., an aggressive invasive bark beetle of the Far Eastern origin, impact on Siberian fir forest stands.

In 2012-2017, we carried out studies in the southern taiga forests of Tomsk Oblast (southeast of the West Siberian Plain) suffering from invasion of the four-eyed fir bark beetle. We analyzed state dynamics of damaged stands on seven sample plots at three model sites for the purpose of long-term monitoring. The first model site (56°12'34"N 85°02'21"E) is the state landscape reserve "Larinskiy", which includes the reference site of a transitional zone from the plain southern taiga to the mountain taiga of the Kuznetsk Alatau with fragments of aboriginal dark-coniferous forests where *Abies sibirica* prevails. The second site (56°17'32"N 85°28'25"E) is located in the neighborhood of the settlement of Basandayka, which is an especially protective forest area with a high proportion of fir trees as a part of forest stands. The third site (56°27'59"N 85°06'09"E) is especially protected natural territory of local significance "Zavarzinskiy forest district", presenting a large massif of suburban green stands, generally, of natural origin, and having an important nature protection value. We selected sites for creating sample plots on the basis of the variety of species composition, age structure and taking into account the damage by the invader revealed as a result of preliminary reconnaissance surveys of model sites. To assess the state of trees, we used a scale of state categories. This scale was developed taking into consideration the interaction of the Siberian fir and the four-eyed fir bark beetle. Healthy trees (without signs of weakening, not attacked by the four-eyed fir bark beetle) are referred to the 1st category of state. The 2nd category is weakened trees (attacked by the four-eyed fir bark beetle, but not colonized, with single or moderate drips of resin from places of attack, with resin-soaked entrances of beetles). The 3rd category is extremely weakened trees (with abundant drips of resin, attacked by the four-eyed fir bark beetle, there are non resin-soaked entrances on the trunk, without successful colonization of beetles on the tree). Trees of the 1st, the 2nd and the 3rd categories are viable. The 4th category is drying trees (colonized by the four-eyed fir bark beetle). The 5th category is trees which have died in the current year (fresh deadwood killed by the four-eyed fir bark beetle). The 6th category is trees which died in previous years (old deadwood). Average weighted categories of tree state, stand vitality index, degradation level, and vitality structure of a stand were used as integral indicators (Methods of monitoring..., 2004; Alexeev V, 2004; Yarmishko VT et al, 2003). The 7th category, "fallen trees", is introduced to refer to the formation speed of wind-thrown and wind-broken trees in the stands damaged by the four-eyed fir bark beetle over the period of observation. The initial state of fir stands in 2012 varied on different sample plots as a result of extension of the four-eyed fir bark beetle invasion in previous years under specific stand conditions. Differences in disturbance of forest stands are due to various factors of the Siberian fir weakening: intraspecific (competitive suppression of the second generation in multiple-aged stands), interspecific (root and stem fungal pathogens) and anthropogenic (change in illumination when laying power lines), which determined the qualitative and quantitative state of the host plants of *P. proximus* and its numbers.

We revealed changes in distribution of trees by state categories and in integral indicators of the stand state on sample plots during the six-year studies (See Tables 2-8). All stands were characterized by negative dynamics of vitality index due to activities of the four-eyed fir bark beetles. General trends for the studied stands are as follows: a consistent decrease in healthy fir trees, an increase in weakened, extremely weakened and dead trees, and a massive number of fallen trees in 2015-2017 (See Fig. 1). Differences in degree and speed of degradation of tree stands are caused by peculiarities of stands (mainly, vitality of the Siberian fir) and by the development stage of local

outbreak foci of *P. proximus*. The maximum mortality of trees was observed in 2013 after an air temperature increase in summer 2011 and, especially, in 2012, which led to physiological weakening of trees and an increase in the quantity and harmfulness of the invader. The current level of degradation of fir forest stands is one of important predictors of the short-term forecast of deterioration in their state. The greatest concern is caused by forest stands in especially protected natural areas: in the “Larinskiy landscape reserve”, the quantity of viable trees according to the data on sample plots is from 14.1 to 46.4%, and there are more than 35% of fallen trees. In the “Zavarzinskiy forest district”, in the stands with the prevalence of fir, the quantity of viable trees is 35.7% and that of fallen trees is 18.6%. As massive quantities of dead wood and fallen trees appear at fast rate in the stands damaged by the four-eyed fir bark beetles, there will be an increase in forest fires and changes in the carbon deposition function. The obtained data are the basis for the environmental monitoring of fir forests in Tomsk Oblast and the forecasting of regional forest formation process.

The paper contains 8 Table, 2 Figures and 28 References.

Key words: biological invasions; dendrophagous insects; monitoring the state of forest ecosystems; *Abies sibirica* Ledeb., Tomsk oblast, Western Siberia.

Funding: The research was financially supported by the Russian Foundation for Basic Research (Grant No 16-44-700782).

References

1. Sutherland WJ, Freckleton RP, Godfray HCJ, Beissinger SR, Benton T, Cameron DD, Carmel Y, Coomes DA, Coulson T, Emmerson MC, Hails RS, Hays GC, Hodgson DJ, Hutchings MJ, Johnson D, Jones JPG, Keeling MJ, Kokko H, Kunin WE, Lambin X, Lewis OT, Malhi Y, Mieszkowska N, Milner-Gulland EJ, Norris K, Phillimore AB, Purves DW, Reid JM, Reuman DC, Thompson K, Travis JMJ, Turnbull LA, Wardle DA, Wiegand T. Identification of 100 fundamental ecological questions. *Journal of Ecology*. 2013;101:58-67. doi: [10.1111/1365-2745.12025](https://doi.org/10.1111/1365-2745.12025)
2. Roques A, Lees D. Introductory notes to factsheets. Chapter 14. *BioRisk*. 2010;4(2):855-1021. doi: [10.3897/biorisk.4.69](https://doi.org/10.3897/biorisk.4.69)
3. Pimentel D, Zuniga R, Morrison D. Update on the environmental and economic costs associated with alien-invasive species in the United States. *Ecological Economics*. 2005;52:273-288. doi: [10.1016/j.ecolecon.2004.10.002](https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2004.10.002)
4. Lovett GM, Canham CD, Arthur MA, Weathers KC, Fitzhugh RD. Forest ecosystems responses to exotic pests and pathogens in eastern North America. *Bioscience*. 2006;56(5):395-405. doi: [10.1641/0006-3568\(2006\)056\[0395:FERTEP\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1641/0006-3568(2006)056[0395:FERTEP]2.0.CO;2)
5. Kenis M, Auger-Rosenberg M-A, Roques A, Timms L, Péré C, Cock MJW, Setelle J, Augustin S, Lopez-Vaamonde C. Ecological effects of invasive alien insects. *Biological Invasions*. 2008;11(1):21-45. doi: [10.1007/978-1-4020-9680-8_3](https://doi.org/10.1007/978-1-4020-9680-8_3)
6. Økland B, Erbilgin N, Scarpaas O, Christiansen E, Långström B. Inter-species interactions and ecosystems effects of non-indigenous invasive and native tree-killing bark beetles. *Biological Invasions*. 2011;13(5):1151-1164. doi: [10.1007/s10530-011-9957-2](https://doi.org/10.1007/s10530-011-9957-2)
7. Baranchikov YuN. Invazii dendrofil'nykh nasekomykh - istochnik khozyaystvennykh problem i poligon dlya ekologo-evolyutsionnykh issledovaniy [Invasions of dendrophilic insects, a source of economic problems and a testing ground for ecological and evolutionary research]. In: *Ekologicheskie i ekonomicheskie posledstviya invaziy dendrofil'nykh nasekomykh: materialy Vseross. konf.* [Ecological and economic consequences of invasions of dendrophilous insects. Proc. of the All-Russian Conf. (Krasnoyarsk, Russia, 25-27 September, 2012)]. Baranchikov YuN, editor. Krasnoyarsk: Sukachev Institute of Forest SB RAS Publ.: 2012. pp. 6-11. In Russian

8. Aukema JE, Leung B, Kovacs K, Chivers C, Britton KO, Englin J, Frankel SJ, Haight RG, Holmes TP, Liebhold AM, McCullough DG, Von Holle B. Economic impacts of non-native forest insects in the continental United States. *PLoS ONE*. 2011;6(9):1-7. doi: [10.1371/journal.pone.0024587](https://doi.org/10.1371/journal.pone.0024587)
9. Krivets SA, Kerchev IA, Bisirova EM, Demidko DA, Pet'ko VM, Baranchikov YuN. Distribution of four-eyed fir bark beetle *Polygraphus proximus* Blandf. (Coleoptera, Curculionidae: Scolytinae) in Siberia. *Izvestia Sankt-Peterburgskoj Lesotekhnicheskoy Akademii*. 2015;211:33-45. In Russian
10. Baranchikov YuN. Coevolutional aspects of invasion ability of forest dendrophilous insects. *Izvestia Sankt-Peterburgskoj Lesotekhnicheskoy Akademii*. 2010;192:30-39. In Russian
11. Baranchikov YuN, Pet'ko VM, Astapenko SA, Akulov EN, Krivets SA. Ussuriyskiy poligraf - novyy agressivnyy vreditel' pikhtovykh lesov Sibiri [Four-eyed fir bark beetle - a new aggressive pest of Siberian fir forests]. *Forestry Bulletin*. 2011;4:78-81. In Russian
12. Baranchikov YuN, Demidko DA, Laptev AV, Pet'ko VM. Dynamics of Siberian fir dieback in the outbreak area of the four-eyed fir bark beetle. *Forestry Bulletin*. 2014;18(6):132-138. In Russian, English Summary
13. Demidko DA. Dating of four-eyed fir bark beetle *Polygraphus proximus* Blandford (Coleoptera, Curculionidae, Scolytinae) invasion into Tomsk region. *Izvestia Sankt-Peterburgskoj Lesotekhnicheskoy Akademii*. 2014;207:225-234. In Russian
14. Krivets SA, Kerchev IA, Kizeev YuM, Kozhurin MA, Kozak RG, Filimonov MN, Chemozanov AV, Chugin VS. Ussuriyskiy poligraf *Polygraphus proximus* Blandf. (Coleoptera, Scolytidae) v pikhtovykh lesakh Tomskoy oblasti [Four-eyed fir bark beetle *Polygraphus proximus* Blandf. (Coleoptera, Scolytidae) in fir forests of Tomsk Oblast]. In: *Bolezni i vrediteli v lesakh Rossii: XXI vek*. Materialy Vseros. konf. [Diseases and Pests in the forests of Russia: XXI century. Proc. of the All-Russian conf. (Yekaterinburg, Russia, 20-24 September, 2011)]. Krasnoyarsk: IL SO RAN Publ.; 2011. pp. 53-55. In Russian
15. Chmyr AF, Markova IA, Sennov SN. Metodologiya lesovodstvennykh issledovaniy [Silvicultural research methodology: Tutorial]. St. Petersburg: FTU Publ.; 2001. 96 p. In Russian
16. Krivets SA, Bisirova EM, Kerchev IA, Pats EN, Chernova NA. Transformation of Taiga ecosystems in the Western Siberian invasion focus of four-eyed fir bark beetle *Polygraphus proximus* Blandford (Coleoptera: Curculionidae, Scolytinae). *Russian Journal of Biological Invasions*. 2015;6(2):94-108. doi: [10.1134/S2075111715020058](https://doi.org/10.1134/S2075111715020058)
17. Demidko DA. The state of Siberian Stone Pine forests in Northeastern Altai and methods for its assessment. *Lesovedenie = Russian Journal of Forest Science*. 2011;1:19-27. In Russian, English Summary
18. Alexeyev V. Forest health diagnosis and its application in air pollution impact studies. In: *Air pollution effects on vegetation including forest ecosystems*. Proc. of the Second US-USSR Symposium. 1989:135-140.
19. *Metody monitoringa vreditel'ey i bolezney lesa* [Methods for monitoring forest pests and diseases]. Vol. 3. Tuzov VK, editor. Moscow: All-Russian Research Institute for Silviculture and Forest Mechanization Publ.; 2004. 200 p. In Russian
20. Alekseev VA. Estimation of tree stands health condition. *Proc. of the Saint-Petersburg Forestry Research Institute*. 2004;2(12):24-33. In Russian, English Summary
21. Kendall MG, Stuart A. The advanced theory of statistics. Gal'chuk LI and Terekhin AT, translated from English; Kolmogorova AN, editor. London: Charles Griffin & Company Limited Publ.; 1973. 899 p. In Russian
22. Loyko SV, Gerasko LI, Kylikova OR. Succession vegetation on sod-podzol soils of a subtaiga of the Tom-Yaysky interfluvium. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Biologiya = Tomsk State University Journal of Biology*. 2010;4(12):32-40. In Russian

23. Falaleev EN. Pikhta [Fir]. Moscow: Lesnaya promyshlennost' Publ.; 1982. 86 p. In Russian
24. Yarmishko VT, Gorshkov VV, Stavrova NI. *Pinus sylvestris* L. vital state structure in the tree layer of pine forest with different degree and type of anthropogenic disturbance (Kola Peninsula). *Rastitelnye Resursy*. 2003;4(39):1-18. In Russian
25. Debkov NM. Peculiarities of forest regeneration processes in fir forest caused by transformation of their micro mosaic organization by *Polygraphus proximus* Bland. *Vestnik of Volga State University of Technology. Series: Forest. Ecology. Nature Management*. 2017;1(33):5-16. doi: [10.15350/2306-2827.2017.1.5](https://doi.org/10.15350/2306-2827.2017.1.5)
26. *Bark and wood boring insects in living trees in Europe, a synthesis*. Lieutier F, Day KR, Battisti A, Grégoire J-C and Evans HF, editors. Netherlands: Springer Publ.; 2004. 569 p. doi: [10.1007/978-1-4020-2241-8](https://doi.org/10.1007/978-1-4020-2241-8)
27. *Bark beetles. Biology and ecology of native and invasive species*. Vega FE and Hofstetter RW, editors. Academic Press of Elsevier; 2015. 620 p. doi: [10.1016/C2013-0-04752-4](https://doi.org/10.1016/C2013-0-04752-4)
28. Lyamtsev NI, Malakhova EG. Dinamika sanitarnogo sostoyaniya elovykh lesov Podmoskov'ya posle zasukhi 2010 g. [Dynamics of the sanitary state of spruce forests in the Moscow region after a drought in 2010]. *Lesnoy vestnik. Vestnik Moskovskogo gosudarstvennogo universiteta lesa = Forestry Bulletin*. 2013;18(6):82-89. In Russian

*Received 26 August 2018; Revised 17 October 2018;
Accepted 05 December 2018; Published 27 December 2018*

Author info:

Bisirova Elvina M, Researcher, Laboratory of Monitoring of Forest Ecosystems, Institute of Monitoring of Climatic and Ecological Systems, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 10/3 Academicheskoy Ave., Tomsk 634055, Russian Federation; Researcher, Tomsk Branch of the All-Russian Plant Quarantine Center, 109 A Frunze Ave., Tomsk 634069, Russian Federation.

E-mail: bisirovaem@mail.ru

Krivets Svetlana A, Cand. Sci. (Biol.), Leading Researcher, Laboratory of Monitoring of Forest Ecosystems, Institute of Monitoring of Climatic and Ecological Systems, Siberian Branch of the Russian Academy of Sciences, 10/3 Academicheskoy Ave., Tomsk 634055, Russian Federation.

E-mail: krivec_sa@mail.ru