

Пространственно-временная динамика вспышки массового размножения сибирского шелкопряда в темнохвойных древостоях Алтая

В. И. ХАРУК^{1,2}, Д. А. ДЕМИДКО¹, Е. В. ФЕДОТОВА^{1,2}, М. Л. ДВИНСКАЯ¹, У. А. БУДНИК²

¹ Институт леса им. В. Н. Сукачева СО РАН
660036, Красноярск, Академгородок, 50/28
E-mail: institute_forest@ksc.krasn.ru

² Сибирский федеральный университет
660041, Красноярск, просп. Свободный, 79

Статья поступила 02.03.16

Принята к печати 11.04.16

АННОТАЦИЯ

На основе методов дистанционного зондирования и ГИС-технологий исследована пространственно-временная динамика повреждения пихтовых древостоев в результате вспышки массового размножения сибирского шелкопряда (*Dendrolimus sibiricus* Tschetv.) в горах Алтая. Установлено, что повреждения древостоев неоднородны относительно рельефа территории. Начало вспышки приурочено к юго-западным склонам со средней крутизной 10° и высотам 400 м. В дальнейшем повреждения распространялись вверх и вниз по высоте, охватывая склоны с большей крутизной, а также склоны восточной экспозиции. Общая площадь погибших древостоев составила 6 тыс. га, 45 % которых погибли под воздействием вторичных вредителей (ксилофагов). Показано, что использование дистанционного зондирования позволяет определять время начала вспышки с точностью до декады. Массовое размножение сибирского шелкопряда реализовалось на фоне повышения температуры воздуха, снижения количества осадков и уменьшения количества поздних заморозков. Ослабленные сибирским шелкопрядом и водным стрессом древесные растения подверглись воздействию ксилофагов. Наблюдаемое и прогнозируемое потепление и возрастание засушливости климата будет стимулировать возникновение вспышек массового размножения сибирского шелкопряда как в пределах его ареала очагового распространения, так и севернее текущей границы ареала.

Ключевые слова: сибирский шелкопряд, вспышки размножения насекомых, ксилофаги, мониторинг лесов, изменения климата, темнохвойная тайга, усыхание хвойных.

Таежные леса Алтае-Саянского региона сформированы преимущественно пихтой сибирской (*Abies sibirica* Ledeb.) и сосной кедровой сибирской (*Pinus sibirica* Du Tour.) – видами, являющимися кормовой базой сибирского шелкопряда (*Dendrolimus sibiricus*

Tschetv.), одного из самых опасных вредителей таежных лесов. Массовые размножения сибирского шелкопряда наблюдались на территориях от Урала до Тихого океана с запада на восток, и от среднего течения Лены до Корейского полуострова, Малого Хинга-

на и Хангая с севера на юг [Рожков, 1965]. Дефолиация пихты и кедра сибирским шелкопрядом нередко приводит к гибели древостоев на площадях, исчисляемых миллионами гектаров [Рожков, 1965; Кондаков, 1974]. Так, вспышка сибирского шелкопряда в Кеть-Чулымском междуречье (1954–1957 гг.) привела к гибели древостоев на территории более 1,5 млн га [Kharuk et al., 2003]. Последняя катастрофическая вспышка, произошедшая в таежных лесах Приангарья, охватила территорию порядка 1 млн га, что привело к гибели древостоев на площади более 300 тыс. га [Kharuk et al., 2003, 2004].

Факторы, влияющие на плотность популяций насекомых, принято разделять на регулирующие (зависимые от плотности) и модифицирующие (независимые от плотности). Погодные условия считаются одним из ведущих модифицирующих факторов для дендрофильных насекомых. Возрастание температуры и засушливости климата рассматриваются в качестве причин, способствующих возрастанию численности короедов и их способности преодолевать защитные механизмы деревьев [Raffa et al., 2015]. В частности, засухи неоднократно провоцировали усыхание европейских ельников под воздействием короеда *Ips typographus* Linnaeus, 1758 [Маслов, 2010; Kharuk et al., 2015]. Связь массовых размножений с температурой и влагообеспеченностью, хотя и осложненная влиянием других факторов, существует и для филлофагов. Показано, что засушливая погода, наряду с внутривидовыми процессами, является причиной формирования очагов массового размножения сибирского шелкопряда [Кондаков, 1974]. Аналогичная связь между недостатком влаги и инициацией массового размножения установлена для листовертки *Choristoneura occidentalis* (Walsingham, 1891) [Flower et al., 2014]. Наблюдаемые и предсказанные изменения климата повлекут, согласно прогнозным сценариям, расширение ареала вспышек массовых размножений филлофагов и увеличение частоты их возникновения [Netherer, Schopf, 2010].

В обнаружении и мониторинге поврежденных лесов насекомыми-вредителями значимое место занимают методы дистанционного зон-

дирования. Показана применимость съемки со спутника Landsat (разрешение 30 м) для обнаружения и картирования поврежденных древостоев сибирским шелкопрядом [Kharuk et al., 2003]. Возможности мониторинга вспышек массового размножения насекомых расширились с появлением оперативной съемки (с поступлением данных не реже одного раза в сутки) с приборов NOAA/AVHRR, Spot Vegetation и MODIS (пространственное разрешение 250–1000 м). Этот вид съемки использован в анализе вспышки размножения непарного шелкопряда (*Lymantria dispar*) в США [Beurs, 2008; Spruce, 2011] и сибирского шелкопряда [Kharuk et al., 2004, 2007], соснового пилильщика (*Neodiprion sertifer*) [Eklundh, 2009], дефолиации тамариска листоедом *Diorhabda elongata* [Dennison, 2009] и березовых древостоев пяденицами (*Epirrita autumnata*, *Operophtera brumata*) [Jepsen, 2009]. В сочетании с ГИС-технологиями космоснимки позволяют анализировать связь очагов размножения насекомых-вредителей с элементами рельефа; известно, что микро- и мезоклиматические условия, обусловленные топографией территории, существенно воздействуют на размножение насекомых, особенно на начальных фазах вспышки [Kharuk et al., 2004].

Цель работы – анализ пространственно-временной динамики повреждений сибирским шелкопрядом темнохвойных древостоев Алтая. Задачи включали: 1) анализ временной динамики вспышки; 2) изучение связи повреждений с ландшафтно-экологическими условиями произрастания; 3) изучение возможности обнаружения поврежденных древостоев на ранней фазе развития вспышки.

Массовые размножения сибирского шелкопряда в Северо-Восточном Алтае, а также в сопредельных и сходных по лесорастительным условиям Западном Саяне и Кузнецком Алатау возникают периодически, что подтверждается рядом исследований, охватывающим период с начала XX в. Обширные повреждения древостоев, нанесенные этим филлофагом, отмечены в 1914–1917, 1920–1928, 1943–1946, 1968–1970 гг. [Кондаков, 1974]. Согласно данным регулярных наблюдений, проводимых Центром защиты

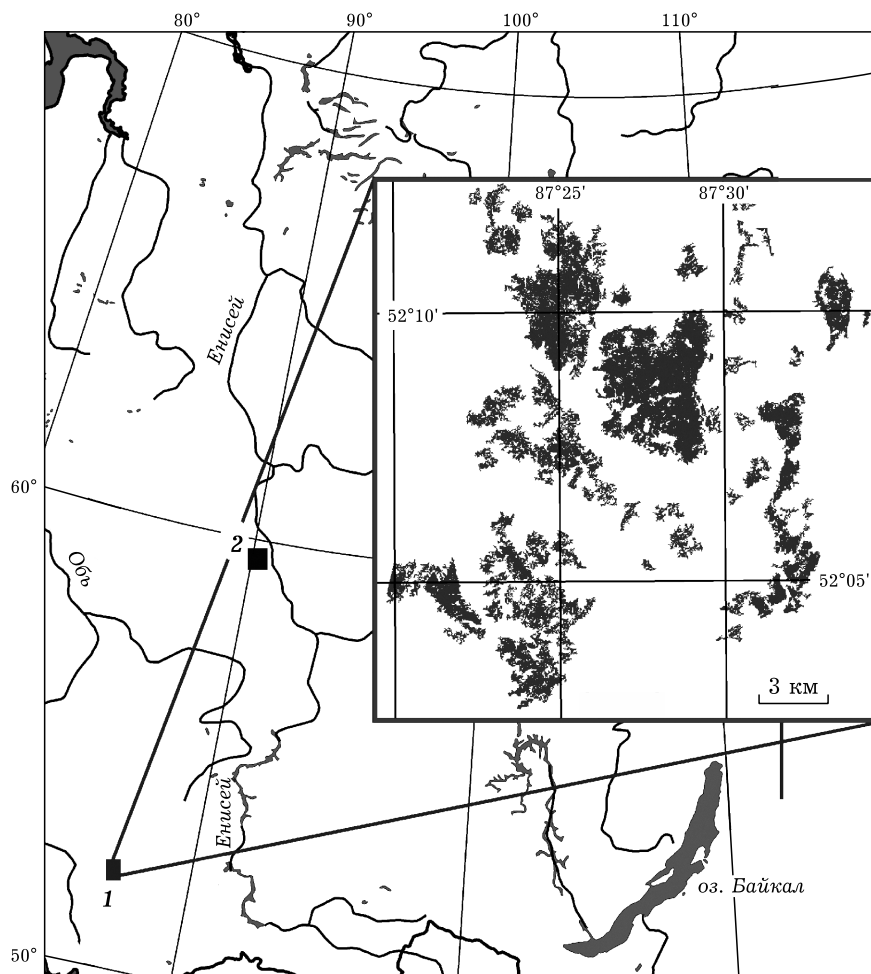


Рис 1. Локализация вспышек массового размножения сибирского шелкопряда: 1 – исследуемая вспышка (север Алтая); 2 – вспышка, произошедшая в 2015 г. в Приенисейской равнине. Врезка: картосхема поврежденных древостоев (по состоянию на 2014 г.)

леса Алтайского края, максимальная площадь очагов сибирского шелкопряда в этом регионе приходилась на 1999 г. (около 120 тыс. га). Рассматриваемая в данной работе вспышка произошла в 2009–2014 гг. (координаты центральной точки 52°10' с. ш., 87°28' в. д.; рис. 1).

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ

Объект исследования находится в северо-восточной части Алтайской горной системы (см. рис. 1). Для него характерны высоты не более 900 м над ур. м. (в отдельных случаях до 1400 м над ур. м.). Климат мягкий континентальный. Увлажнение и теплообеспеченность относительно велики: в зависимости от высоты над уровнем моря и широты годовое

количество осадков составляет 500–1600 мм, сумма температур выше 10 °С – 1100–1800 °С, продолжительность периода с температурами выше 10 °С – от 75 до 110 дней в году, что создает условия для доминирования пихты в древостоях. В районе господствует лесная растительность, значительная часть лесов представлена мало нарушенными коренными формациями. Коренные леса нижней части гор сформированы пихтой (*Abies sibirica* Ledeb.) и занимающей ее место после гибели древостоев осиною (*Populus tremula* L.), в верхней части – пихтой и кедром сибирским (*Pinus sibirica* Du Tour). Пихтовые, кедрово-пихтовые и осиновые леса совокупно занимают более 80 % площади района [Огурева, 1980]. Исследуемый участок характеризуется преобладанием лесов с доминировани-

Т а б л и ц а 1
Обучающие выборки для классификации данных
Landsat

Год	Обучающие выборки, всего/пикселей	Обучающие выборки поврежденных древостоев, всего/пикселей
2010	21/4341	8/1050
2011	21/18610	8/4192
2012	22 /10426	8/4192
2013	19/15383	7/3062
2014	14/6502	6/2513

ем пихты (6–8 единиц), имеющих полноту 0,5–0,6; средний возраст пихты – 70–100 лет.

В работе использованы данные дистанционного зондирования (съемка Landsat и Aqua/MODIS) и наземных обследований, климатические переменные, а также ГИС-технологии.

Съемка Landsat (Landsat-5, -7, -8) охватывала период с 2006 по 2015 г.; Aqua/MODIS – с 2007 по 2014 г. Данные Landsat (размер пиксела в видимом и ближнем ИК диапазонах 30 м) применены для обнаружения поврежденных древостоев, данные Aqua/MODIS (размер пиксела 250–1000 м) – для анализа динамики вегетационных индексов. Следует отметить, что обычно в исследованиях суши используется съемка Terra/MODIS; однако радиометрическая точность этого прибора заметно ухудшилась по сравнению с Aqua/MODIS.

Анализ снимков Landsat. Анализ спутниковых данных проводился в программном пакете ERDAS Imagine (<http://www.hexagongeospatial.com>). ГИС-анализ выполнялся в программе ESRI ArcGIS (<http://www.esri.com>). В работе использована цифровая модель рельефа (ЦМР) ASTER GDEM

(ASTER Global Digital Elevation Model). ЦМР имеет разрешение 20 м и точность определения высоты над уровнем моря 10–25 м (http://www.jspacesystems.or.jp/ersdac/GDEM/ver2Validation/Summary_GDEM2_validation_report_final.pdf). Данные Landsat подвергнуты топографической нормализации методом С-коррекции [Riano, 2003]. Из анализа “отсекались” территории, расположенные выше 650 м над ур. м., поскольку выше не наблюдалось каких-либо повреждений. На основе анализа летних и зимних снимков, полученных до начала вспышки (2006, 2009 гг.) сформирована маска древостоев до вспышки. Далее, на основе координат поврежденных лесов, полученных в результате полевых исследований, построены обучающие выборки поврежденных древостоев, которые использовались для классификации снимков (табл. 1). Классификация проводилась методами минимального расстояния и максимального правдоподобия [Richards, 1993].

Общая точность классификации составила 87 % (табл. 2). Каппа-статистика равна 0,8 (очень хорошее совпадение).

Анализ данных MODIS. Преимуществом Aqua/MODIS является возможность получения ежедневных данных, тогда как минимальный интервал между съемками Landsat составляет 16 дней. Данные Aqua/MODIS (размер пиксела 250 м) использовались для составления временных серий нормированного вегетационного индекса (NDVI), широко применяемого для оценки состояния растительного покрова [Kharuk et al., 2009]. Индекс NDVI определяется соотношением:

$$NDVI = (\sigma_{NIR} - \sigma_{RED}) / (\sigma_{NIR} + \sigma_{RED}),$$

Т а б л и ц а 2
Матрица ошибок классификации

Название класса	Всего по наземным данным	Всего по классификации	Количество верно классифицированных точек	Точность классификатора, %	Точность пользователя, %
Поврежденные леса	46	60	43	93	72
Фон	104	90	87	84	97
Всего	150	150	130		

Воздействие сибирского шелкопряда на пихтовые древостой по состоянию на август 2013 г.
[Предварительные итоги..., 2013]

Пробная площадь	Координаты	Доля деревьев (по числу стволов), %			
		здоровые	дефолиированные	усохшие	погибшие до начала вспышки
1	52°11'26" с. ш., 87°26'11" в. д.	5	60	20	15
2	52°11'18" с. ш., 87°27'15" в. д.	10	65	15	10
3	52°11'25" с. ш., 87°26'41" в. д.	5	50	30	15
4	52°12'9" с. ш., 87°26'1" в. д.	5	90	5	0

где σ_{RED} , σ_{NIR} – величины сигналов от подстилающей поверхности в красной и ближней инфракрасной частях спектра соответственно.

Наряду с NDVI апробировались и другие индексы (например, улучшенный вегетационный индекс EVI), однако их применение не выявило каких-либо преимуществ по сравнению с NDVI. Временная динамика NDVI древостоев анализировалась за период с 2007 по 2014 г. (с мая по август). Данные по NDVI получены из продукта MYD13Q1 (www.earthexplorer.usgs.gov). Выборки для погибших и здоровых участков древостоев (30–50 пикселей) выбирались на основе классификации съемки Landsat. Рассчитывались средние значения, а также параметр ΔNDVI – разность между NDVI здоровых и поврежденных древостоев.

Наземные исследования. Проведенные в 2013 г. специалистами ФБУ “Рослесозащита” лесопатологические обследования позволили установить, что в исследуемом районе площадь пихтовых древостоев, поврежденных сибирским шелкопрядом, превысила 21 тыс. га [Предварительные итоги..., 2013]. Дефолиация началась в 2009 г., и к середине августа 2013 г. значительная часть деревьев пихты потеряла часть хвои, либо усохла (табл. 3). Приведенные в таблице данные использованы для дешифрирования снимков Landsat.

ГИС-анализ. Площади поврежденных древостоев определялись с учетом их представленности на определенных элементах рельефа (высоты над ур. м., экспозиции, крутиз-

ны склона). С этой целью использовался нормирующий коэффициент k , определяющийся соотношением

$$k_{c(i)} = 100 \cdot S_{c(i)-f} / S_{c(i)-I},$$

где индекс $c(i)$ – это i -я категория параметра рельефа c ; $S_{c(i)-f}$ – площадь поврежденных древостоев на территории с i -й категорией характеристики параметра рельефа c ; $S_{c(i)-I}$ – площадь территории с i -й категорией характеристики параметра рельефа c на анализируемой территории, занятая лесами; c – параметр рельефа – высота над ур. м., крутизна склона или экспозиция склона.

В данном исследовании высота над ур. м. бралась с интервалом 10 м, экспозиции склонов представлены восемью градациями, крутизна склонов взята с шагом 1°.

Климатические переменные. Анализируемые климатические параметры включали температуру воздуха, осадки, дефицит влажности воздуха, индекс сухости (Standardized Precipitation Evaporation Index, SPEI), количество дней с отрицательными средними температурами воздуха. Климатические переменные получены с метеостанции Турочак, расположенной в 20–25 км от объекта исследований. Данные по SPEI получены с сайта <http://sac.csic.es/spei/> (пространственное разрешение 0,5 × 0,5 градуса). Индекс SPEI представляет разность между величинами осадков и потенциальной эвапотранспирации:

$$D_i = P_i - PET_i.$$

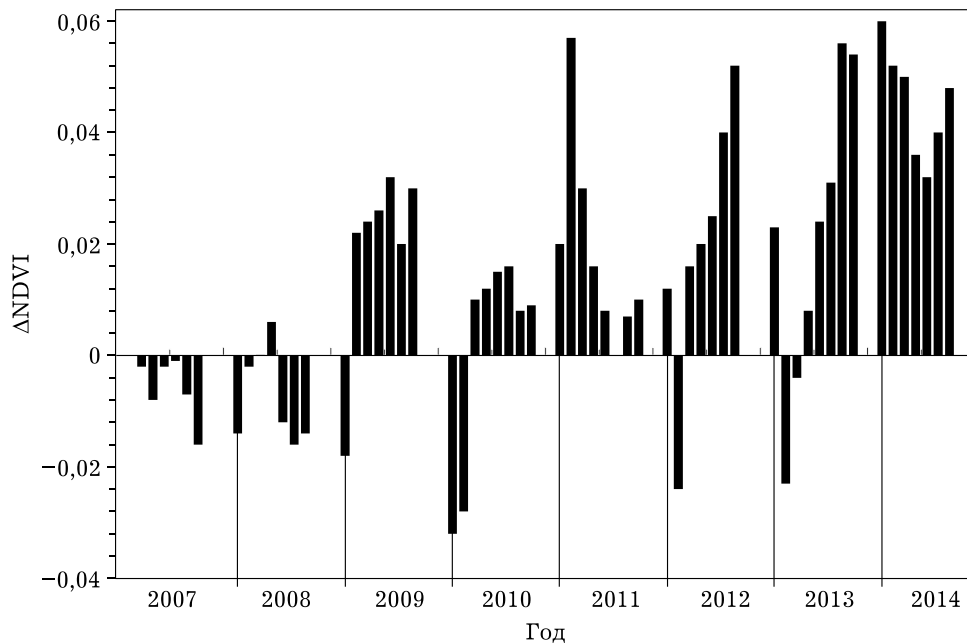


Рис. 2. Временная динамика Δ NDVI

Указанный индекс служит мерой засушливости, начала и окончания засухи [Vicente-Serrano et al., 2010].

РЕЗУЛЬТАТЫ

Динамика вспышки. Анализ динамики NDVI позволяет определить начало вспышки размножения шелкопряда – вторая де-

када июня 2009 г. (рис. 2). В это время наблюдается значимое превышение величины Δ NDVI (разности между значениями NDVI здоровых и поврежденных древостоев) над фоном.

На рис. 3, а, б показаны динамика площади и пространственное распределение погибших древостоев. В 2010 г. древостои погибли на 700 га; общая площадь достигла

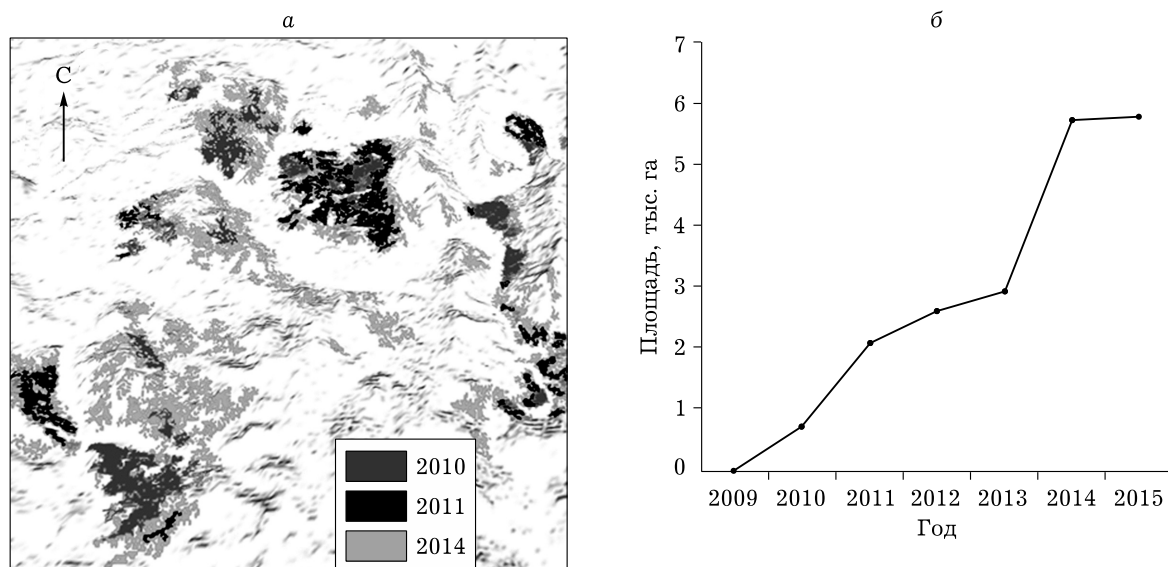


Рис. 3. Картограмма динамики повреждений древостоев сибирским шелкопрядом (а); динамика площади погибших древостоев (б)

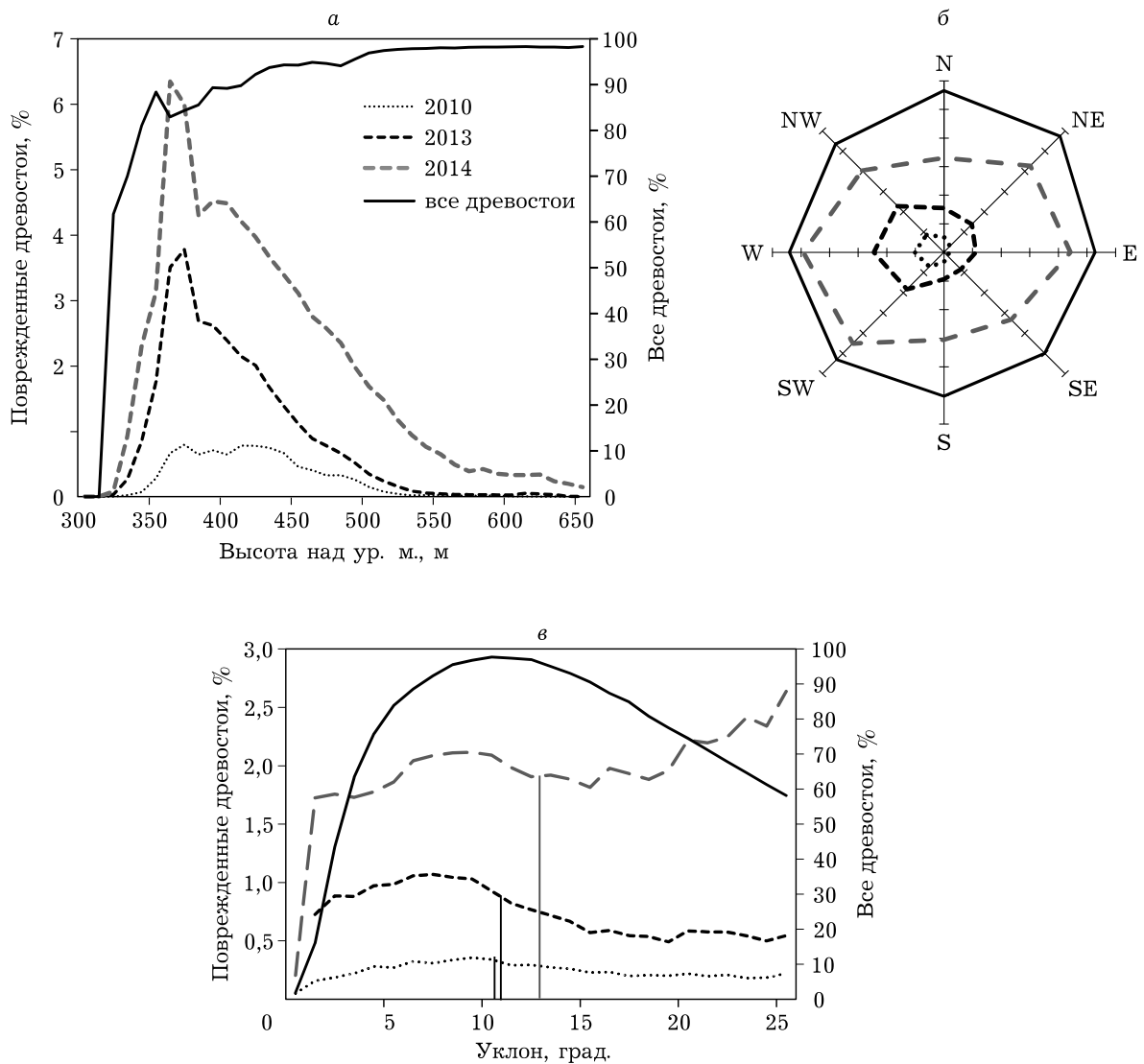


Рис. 4. Нормированные площади поврежденных древостоев относительно площади лесов: а – по высоте над ур. м.; б – по экспозиции; в – по крутизне склонов

примерно 6000 га в 2014 г. Таким образом, гибель древостоев произошла примерно на одной трети общей площади очага (21 тыс. га [Предварительные итоги..., 2013]). Отметим, что в 2014 г. наблюдался резкий прирост площади погибших древостоев (на 2,8 тыс. га).

Распределение погибших древостоев по элементам рельефа неоднородно (рис. 4). В первоначальных очагах они занимают нижние участки западных склонов, имеющие высоту около 400 м над ур. м. и крутизну около 10° . В дальнейшем из первоначальных очагов погибшие леса распространялись вверх и вниз, преимущественно по западным скло-

нам. В конце вспышки (2013–2014 гг.) повреждения распространились также на восточные склоны. Относительно крутизны склонов медиана распределения погибших лесов сместилась с 11° в 2010 г. на 13° в 2014 г.

Климатические предпосылки вспышки. Вспышка размножения сибирского шелкопряда реализовалась на фоне возрастания температуры воздуха, уменьшения количества осадков и числа поздних заморозков, а также глубины снежного покрова (рис. 5, а, б, д, е). В начале вспышки (2009–2010 гг.) наблюдалось также возрастание засушливости и дефицита влажности воздуха (см. рис. 5, в, г).

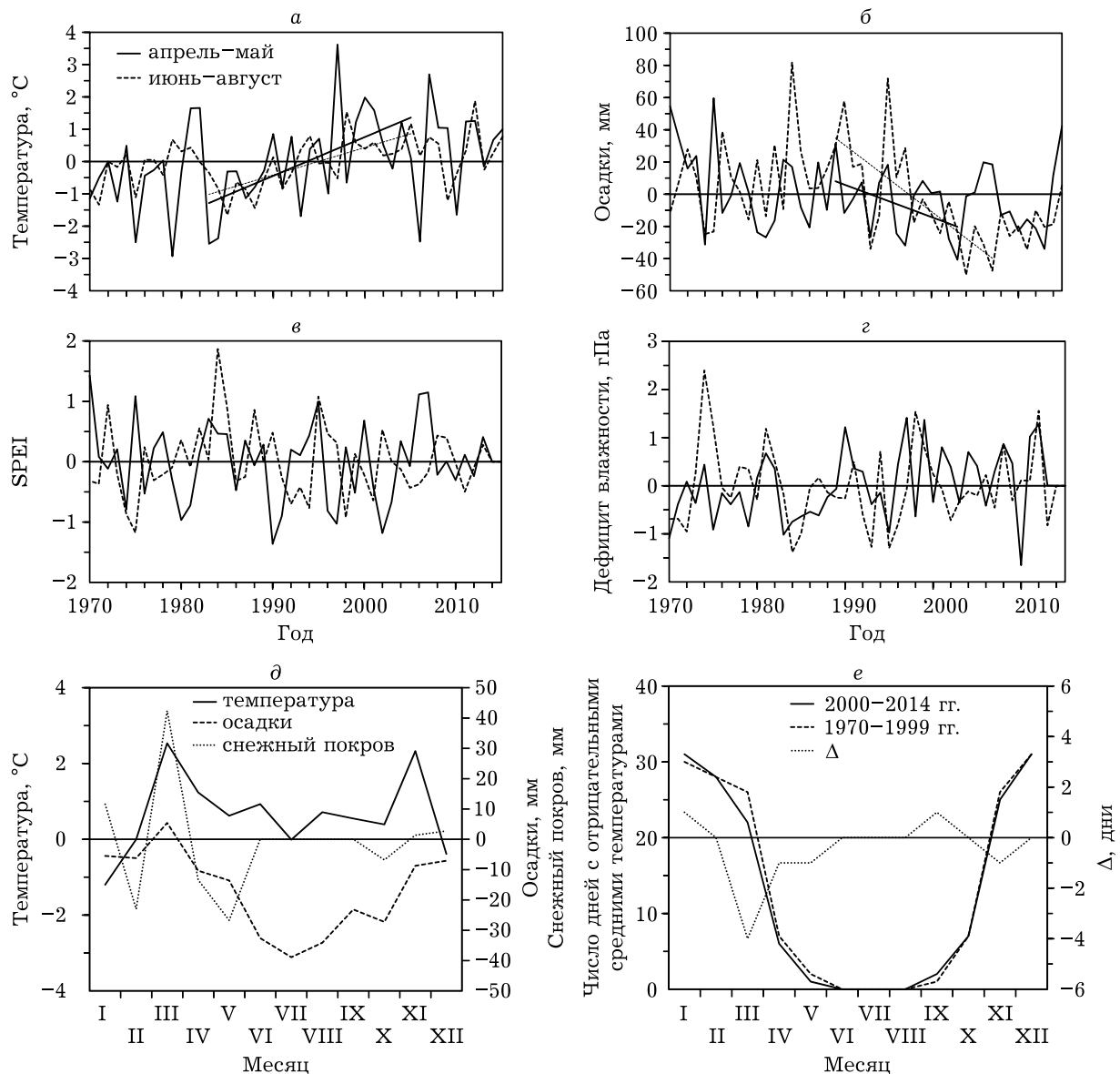


Рис. 5. Отклонения от многолетних средних величин: температур (а); осадков (б); индекса сухости SPEI (в); дефицита влажности воздуха (г); Δ-климатограммы температуры, осадков и высоты снежного покрова (д); Δ-климатограммы числа дней со средними отрицательными температурами (е).

Δ – разница значений за периоды 2000–2014 и 1970–1999 гг. Тренды на рис. а, б значимы для $p < 0,05$. Уменьшение индекса SPEI соответствует возрастанию засушливости.

ОБСУЖДЕНИЕ

Увеличение в течение небольшого промежутка времени (нескольких лет) площади погибших древостоев, наблюдаемое в очагах долины р. Байгол – универсальный для очагов сибирского шелкопряда процесс. Обеспечивается он двумя механизмами, первый во времени из них – расселительные миграции бабочек сибирского шелкопряда [Кондаков,

1974]. Для горных кедровых лесов указано, что откладка яиц бабочками происходит на расстоянии 300–1200 м от дефолированных древостоев [Рожков, 1965], что в целом соответствует наблюдаемой на исследуемой территории картине. Ослабленные дефолиацией древостои становятся восприимчивыми к атакам стволовых вредителей, под воздействием которых происходит окончательное отмирание темнохвойных древостоев [Криволюц-

кая, 1986]. По нашим наблюдениям, сделанным в миграционных очагах сибирского шелкопряда, погибшие деревья в регионе исследования наиболее интенсивно заселялись черным пихтовым усачом *Monochamus urusovi* (Fisch.) и полиграфом уссурийским *Polygraphus proximus* Blandf. Интерес представляет направление миграций сибирского шелкопряда по вертикали. Хорошо известно, что начало очередной вспышки приурочено к местообитаниям, максимально соответствующим потребностям насекомых-дефолиаторов, и только затем осваиваются худшие по тем или иным критериям древостои. Эта закономерность определяет высотную приуроченность первичных очагов сибирского шелкопряда в горных условиях. На Дальнем Востоке его первичные очаги в древостоях с участием кедра корейского (*Pinus koraiensis*) возникают в наиболее прогреваемых и не подвергающихся затоплениям участках – на возвышенных местах (но не выше 700 м над ур. м.) и склонах южной экспозиции [Журавлев, 1960]. Сопоставление пространственной динамики очагов сибирского шелкопряда в кедровниках Предбайкалья с лесорастительными условиями [Флоров, 1948], где их расширение направлено от занятых кедровыми лесами вершин хребтов к их нижним частям с преобладанием сосновых древостоев, также хорошо укладывается в эту схему. Для Рудного Алтая А. В. Костин [1958] показал, что движение очагов сибирского шелкопряда определяется микроклиматом, который наиболее благоприятен в средних частях склонов, откуда очаги смещаются к вершине и, в меньшей степени, к плохо дренированным межгорным понижениям. В Восточном Саяне в ходе вспышки сибирского шелкопряда в 2002 г. первичный очаг возник в интервале высот 430–490 м на пологих юго-западных (5°) склонах [Kharuk et al., 2009]. В дальнейшем наблюдалось продвижение повреждений как вверх, так и вниз по склону. На конечной фазе развития азимутальное распределение повреждений стало однородным. Общая площадь очага, как и в рассматриваемом случае, составила примерно 20 тыс. га.

Сформированные в ходе развития исследованной нами вспышки массового размножения очаги также привязаны к наиболее благоприятным для сибирского шелкопряда

местообитаниям. Если для региона в целом верхняя граница леса находится на высоте около 650 м, то медиана поврежденных древостоев находится на высоте около 400 м (см. рис. 4, а). Это объясняется тем, что нижние части склонов характеризуются лучшими температурными условиями по сравнению с вышележащими участками, и в то же время достаточно дренированы, что обеспечивает успешную зимовку гусениц. Близкие значения получены для вспышки сибирского шелкопряда, произошедшей на Восточном Саяне (2002 г.): первичный очаг возник в интервале высот 430–490 м на пологих (5°) юго-западных склонах [Kharuk et al., 2009]. В Приангарье (вспышка 1993–1996 гг.) максимум повреждений наблюдался в интервале высот 210–320 м; более низкие значения высот обусловлены, вероятно, более суровыми климатическими условиями (очаг расположен севернее на 5° по широте), а также более сглаженным рельефом территории. По отношению к крутизне склонов, максимальные повреждения на Алтае наблюдались в интервале 11–13° (в Приангарье – 5–20°). Во всех случаях максимальные повреждения локализовались на юго-западных, наиболее прогреваемых склонах.

Возникновению вспышки массового размножения сибирского шелкопряда благоприятствовали погодные условия: наблюдалось возрастание температуры воздуха, уменьшение количества осадков и числа поздних заморозков, а также засушливости и дефицита влажности воздуха. Необходимо отметить, что согласно прогнозам [IPCC, 2014], в значительной части Сибири, включая ареалы пихты и кедра, в XXI в. будут продолжаться возрастание температуры воздуха и засушливости климата, что будет способствовать возникновению вспышек массового размножения сибирского шелкопряда там, где ранее они не наблюдались, – в темнохвойных древостоях Енисейского кряжа севернее 59 параллели. На возможность реализации такого сценария указывает и возникшая недавно (2015 г.) вспышка сибирского шелкопряда вблизи северной границы его очагового распространения, охватившая территорию ~20 тыс. га (см. рис. 1, участок 2).

После завершения вспышки массового размножения сибирского шелкопряда и пе-

рехода его популяции в фазу депрессии увеличение площади погибших темнохвойных древостоев происходит за счет активности стволовых насекомых. Показано, что деятельность ксилофагов не ограничивается наиболее пострадавшими от потери хвои насаждениями. А. С. Исаев с соавт. [1988] рассматривали подъем численности сибирского шелкопряда с последующим массовым размножением в его очагах черного пихтового усача *Monochamus urussovi* как часть единого процесса. В результате синергизма воздействия сибирского шелкопряда и стволовых вредителей площадь очага превращается в мозаику древостоев, пострадавших и погибших в разное время, что и наблюдалось в долине р. Байгол. Согласно данным Центра защиты леса Алтайского края [Предварительные итоги..., 2013], формирование очагов сибирского шелкопряда началось в 2009 г.; появление участков погибших древостоев, согласно данным анализа NDVI и снимков Landsat – в 2010 г. (см. рис. 2, 3). Первый максимум прироста площади усохшего леса приходится на 2011 г., а в 2013 г. популяция сибирского шелкопряда на большей части площади очага перешла в фазу депрессии [Предварительные итоги..., 2013]. По-видимому, массовое освоение стволовыми вредителями ослабленных дефолиацией деревьев началось в 2012 г. и в целом завершилось в 2013 г. В 2014 г. формируется второй максимум прироста площади пострадавших древостоев, который обеспечивается миграцией агрессивных видов ксилофагов (в первую очередь, *Monochamus urussovi* и *Polygraphus proximus*) из дефолированных участков в прилегающие древостои, относительно мало пострадавшие от деятельности шелкопряда, что привело к резкому приросту площади погибших древостоев в 2014 г. (+2,8 тыс. га; см. рис. 3, б). Эта интерпретация согласуется с процессом, описанным для темнохвойных лесов Западносибирской равнины, где наблюдалась миграция ксилофагов в прилегающие частично дефолированные и здоровые древостои, что приводило к гибели до 30 % от общего числа деревьев [Криволуцкая, 1965]. Согласно нашим оценкам, до 45 % погибших древостоев – следствие воздействия ксилофагов.

Зависимость повреждения пихтовых древостоев от крутизны склонов в исследуемом регионе значительно менее выражена (см. рис. 4, в). По сравнению с распределением склонов по крутизне для территории в целом, которое имеет четкую медиану (10°), распределение отмирающих древостоев по склонам разной крутизны гораздо более сглажено. Однако определенная тенденция прослеживается и здесь: если в начале отмирания (2010 г.) значение медианы для отмирающих древостоев близко к значениям крутизны для исследуемого района (9°), то затем распределение начинает тяготеть к бимодальности. С 2011 г. значение моды несколько уменьшается (7°), возрастание крутизны склона до 18° приводит к некоторому снижению вероятности отмирания древостоев, а при дальнейшем ее повышении относительная площадь погибших пихтовых лесов вновь растет. Особенно явно эта закономерность выражена в 2014 г. Это явление мы связываем с различиями в дренированности склонов разной крутизны. Появление первого максимума обусловлено экологическими особенностями шелкопряда, который на склонах крутизной $7-9^\circ$ находит наиболее благоприятные условия для питания и зимовки. Второй максимум формируется в связи с экологическими особенностями пихты, которая на крутых склонах сталкивается с уменьшением мощности почвенного слоя, возрастанием стока воды и повышением риска водного стресса. Результатом этого является ослабление древесных растений, уменьшение их способности противостоять нападению агрессивных видов ксилофагов. Это предположение подтверждается также тем, что наиболее интенсивное повреждение древостоев на крутых склонах происходило в 2014 г., когда популяция сибирского шелкопряда перешла в фазу депрессии, а популяции ксилофагов, напротив, активно осваивали участки леса, расположенные по соседству с дефолированными.

Вспышка размножения сибирского шелкопряда реализовалась на фоне возрастания температуры воздуха, уменьшения количества осадков и числа поздних заморозков, а также глубины снежного покрова (см. рис. 5, а, б, д, е). В начале вспышки (2009–2010 гг.) на-

блюдалось также возрастание засушливости и дефицита влажности воздуха (см. рис. 5, в, г).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Начало вспышки сибирского шелкопряда в горах северного Алтая приурочено к элементам рельефа с определенными характеристиками: это юго-западные склоны крутизной 11–13°, расположенные на высотах около 400 м. Анализ материалов съемки MODIS (динамика вегетационных индексов) показал возможность определения времени начала вспышки с точностью до декады. Вспышка сибирского шелкопряда на Алтае реализовалась на фоне повышения температуры воздуха и снижения количества осадков, а также уменьшения количества дней с поздними заморозками. В настоящее время граница очагового распространения сибирского шелкопряда в Центральной Сибири ограничена 60 параллелью [Кондаков, 1974; Kharuk et al., 2004], однако при потеплении климата неизбежно ее продвижение на север, где в будущем темнохвойные леса Енисейского края станут кормовой базой для вспышек массового размножения сибирского шелкопряда. В XXI в. ожидается дальнейшее повышение температуры воздуха и возрастание засушливости климата в лесах бореальной зоны, включая часть ареалов пихты и кедра [IPCC, 2014]. Потепление и возрастание засушливости будут стимулировать возникновение вспышек массового размножения насекомых-вредителей [Millar, Stephenson, 2015]. Кроме того, ослабление древостоев водным стрессом делает их более восприимчивыми к атакам филлофагов и стволовых вредителей, что повлечет замену влаголюбивых пихты и сосны кедровой сибирской в части их ареалов на более засухоустойчивые виды [Харук и др., 2016].

Работа поддержана грантом Российского научного фонда № 14-24-00112.

ЛИТЕРАТУРА

Журавлев Г. П. Рекомендации по надзору за сибирским шелкопрядом в лесах Дальнего Востока. Хабаровск, 1960. 33 с.
Исаев А. С., Рожков А. С., Киселев В. В. Черный пихтовый усач *Monochamus uralis* (Fisch.). Новосибирск: Наука, 1988. 264 с.

Кондаков Ю. П. Закономерности массовых размножений сибирского шелкопряда // Экология популяций лесных животных Сибири. Новосибирск: Наука, 1974. С. 206–264.
Костин И. А. О вспышке массового размножения сибирского шелкопряда в горных лесах Восточного Казахстана // Тр. Ин-та зоологии АН КазССР. 1958. Т. 8. С. 122–126.
Криволицкая Г. О. Скрытостволовые вредители в темнохвойных лесах Западной Сибири, поврежденных сибирским шелкопрядом. М.; Л.: Наука, 1965. 129 с.
Маслов А. Д. Короед-типограф и усыхание еловых лесов. М.: ВНИИЛМ, 2010. 138 с.
Огуреева Г. Н. Ботаническая география Алтая. М.: Наука, 1980. 189 с.
Предварительные итоги лесопатологического мониторинга экспедиционными методами части насаждений Республики Алтай в 2013 г. М.: Рослесозащита, 2013.
Рожков А. С. Массовое размножение сибирского шелкопряда и меры борьбы с ним. М.: Наука, 1965. 180 с.
Флоров Д. Н. Вредитель сибирских лесов (сибирский шелкопряд). Иркутск: Иркут. обл. изд-во, 1948. 132 с.
Харук В. И., Им С. Т., Петров И. А., Ягунов М. Н. Усыхание темнохвойных древостоев Прибайкалья // Сиб. экол. журн. 2016 (в печати).
Beurs K. M. de, Townsend P. A. Estimating the effect of gypsy moth defoliation using MODIS// Remote Sensing of Environ. 2008. Vol. 112. P. 3983–3990.
Dennison P. E., Nagler P. L., Hultine K. R., Glenn E. P., Ehleringer J. R. Remote monitoring of tamarisk defoliation and evapotranspiration following saltcedar leaf beetle attack // Ibid. 2009. Vol. 113. P. 1462–1472.
Eklundh L., Johansson T., Solberg S. Mapping insect defoliation in Scots pine with MODIS time-series data // Ibid. P. 1566–1573.
Flower A., Gavin D. G., Heyerdahl E. K., Parsons R. A., Cohn G. M. Drought-triggered western spruce budworm outbreaks in the interior Pacific Northwest: A multi-century dendrochronological record // Forest Ecology and Management. 2014. Vol. 324. P. 16–27.
Jepsen J. U., Hagen S. B., Høgda K. A., Ims R. A., Karlsson S. R., Tømmervik H., Yoccoz N. G. Monitoring the spatio-temporal dynamics of geometrid moth outbreaks in birch forest using MODIS-NDVI data // Remote Sensing of Environ. 2009. Vol. 113. P. 1939–1947.
IPCC, 2014: Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. A Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change / eds. C. B. Field, V. R. Barros, D. J. Dokken et al. Geneva, Switzerland: World Meteorological Organization, 2014. 190 p. <https://ipcc-wg2.gov/AR5/report/>
Kharuk V. I., Ranson K. J., Kuz'michev V. V. Im S. T. Landsat-based analysis of insect outbreaks in southern Siberia // Canad. Journ. Remote Sensing. 2003. Vol. 29, N 2. P. 286–297.
Kharuk V. I., Ranson K. J., Kozuhovskaya A. G., Kondakov Y. P., Pestunov I. A. NOAA/AVHRR satellite detection of Siberian silkmouth outbreaks in eastern Siberia // Int. Journ. Remote Sensing. 2004. Vol. 25, N 24. P. 5543–5556.

- Kharuk V. I., Ranson K. J., Fedotova E. V. Spatial pattern of Siberian silkmoth outbreak and taiga mortality // *Scandinav. Journ. Forest Res.* 2007. Vol. 22. P. 531–536.
- Kharuk V. I., Ranson K. J., Im S. T. Siberian silkmoth outbreak pattern analysis based on SPOT VEGETATION data // *Int. Journ. Remote Sensing.* 2009. Vol. 30, N 9. P. 2377–2388.
- Kharuk V. I., Im S.T., Dvinskaya M. L., Golukov A. S., Ranson K. J. Climate-induced mortality of spruce stands in Belarus // *Environ. Res. Lett.* 2015. Vol. 10, N 12. DOI 10.1088/1748-9326/10/12/125006.
- Millar C. I., Stephenson N. L. Temperate forest health in an era of emerging megadisturbance // *Science.* 2015. Vol. 349, N 823. DOI: 10.1126/science.aaa9933.
- Netherer S., Schopf A. Potential effects of climate change on insect herbivores in European forests – General aspects and the pine processionary moth as specific example // *Forest Ecol. and Management.* 2010. Vol. 259. P. 831–838.
- Raffa K. F., Grégoire J. C., Lindgren B. S. Natural History and Ecology of Bark Beetles // *Bark Beetles. Biology and Ecology of Native and Invasive Species* / eds. F. E. Vega, R. W. Hofstetter. Elsevier, 2015. 620 p.
- Riano D., Chuvieco E., Salas J., Aguado I. Assessment of Different Topographic Corrections in Landsat-TM Data for Mapping Vegetation Types // *IEEE Transactions on geoscience and remote sensing.* 2003. Vol. 41, N 5. P. 1056–1061.
- Richards J. A. Remote sensing digital image analysis. An introduction // Second, revised and enlarged edition. Springer-Verlag, 1993. 340 p.
- Spruce J. P., Sader S., Ryan R. E., Smoot J., Kuper P., Ross K., Prados D., Russell J., Gasser G., McKellip R., Hargrove W. Assessment of MODIS NDVI time series data products for detecting forest defoliation by gypsy moth outbreaks // *Remote Sensing of Environ.* 2011. Vol. 115. P. 427–437.
- Vicente-Serrano S. M., Beguería S., López-Moreno J. I. A Multi-scalar drought index sensitive to global warming: The Standardized Precipitation Evapotranspiration Index – SPEI // *J. Climate.* 2010. Vol. 23. P. 1696–1718.

Siberian Silk Moth Outbreak Dynamics in Dark-Coniferous Forests of the Altai

V. I. KHARUK^{1,2}, D. A. DEMIDKO¹, E. V. FEDOTOVA^{1,2}, M. L. DVINSKAYA¹, U. A. BUDNIK²

¹ V. N. Sukachev Institute of Forest, SB RAS
660036, Krasnoyarsk, Akademgorodok, 50/28
E-mail: institute_forest@ksc.krasn.ru

² Siberian Federal University
660041, Krasnoyarsk, Svobodny ave., 79

Spatial and temporal dynamics of fir-dominant stand mortality in the Altai Mountains was studied based on remote sensing and GIS methods. Mortality was primarily caused by Siberian silkmoth (*Dendrolimus sibiricus* Tschetv.). Spatial distribution of stands mortality was dissimilar with respect to relief features. Initially pest outbreak occurred on the south-west slopes (about 10° steepness) and elevation about 400 a.s.l. Then mortality spread uphill and downhill and to the steeper slopes and those of the eastern exposure. About 45 % of total (6 thousand ha) mortality was due to secondary pest (bark beetles) attacks. Based on remote sensing technique an initial phase of pest outbreak was determined with one-decade precision. Siberian silkmoth outbreak happened at increase in air temperature and decrease in precipitation and late frosts. Weakened by Siberian silkmoth and water stress trees became sensitive to secondary pest's attacks. Observed and predicted warming and aridity increase will facilitate Siberian silkmoth outbreaks both within its range and northward of its current border.

Keywords: Siberian silkmoth, insect outbreaks, xylophagous insects, pest monitoring, climate change, dark-conifer taiga, conifer mortality.