

Миграция северной границы распространения сибирского шелкопряда

В. И. ХАРУК^{1,2}, С. Т. ИМ^{1,2,3}, М. Н. ЯГУНОВ⁴

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

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

³ Сибирский государственный университет науки и технологий им. М. Ф. Решетнева
660041, Красноярск, просп. Красноярский рабочий, 31

⁴ Центр защиты леса Красноярского края
660036, Красноярск, Академгородок, 50а, корп. 2

Статья поступила 16.05.2017

Принята к печати 04.08.2017

АННОТАЦИЯ

Изменения климата индуцировали продвижение на север зоны очагового распространения сибирского шелкопряда (*Dendrolimus sibiricus* Tschetv.), одного из самых опасных вредителей таежных лесов. Первичный очаг массового размножения вредителя возник в 2014 г. в кедрово-пихтовых древостоях Енисейской равнины на пологих юго-западных склонах и высотах до 200 м над ур. м. В дальнейшем повреждения распространялись на более увлажненные участки леса, склоны северной экспозиции и низкогорья Енисейского кряжа. Граница вспышки продвинулась на расстояние до 50 км севернее исторической границы очагового распространения сибирского шелкопряда (до 60°26' с. ш.), охватив территорию до 800 тыс. га. Вспышка инициировалась возрастанием засушливости климата и снижением влажности лесной подстилки, а также увеличением суммы положительных температур ($t > +10^{\circ}\text{C}$). В поврежденных насекомым древостоях активизировался комплекс вторичных стволовых вредителей, включая заселение пихт агрессивным видом *Polygraphus proximus*. Рассматриваемая вспышка сибирского шелкопряда представляет часть панзоональной вспышки, реализовавшейся в 2014–2017 гг. на территории Красноярского края, в Томской, Кемеровской и Иркутской областях. Наблюдаемое возрастание суммы положительных температур, увеличение аридности климата и удлинение периода вегетации открывает возможности миграции вредителя в северные темнохвойные леса.

Ключевые слова: сибирский шелкопряд, изменения климата, насекомые-дендрофаги, вспышки размножения насекомых, ареалы дендрофильных насекомых.

Вспышки массового размножения сибирского шелкопряда (*Dendrolimus sibiricus* Tschetv.), опасного вредителя таежных лесов, перио-

дически возникали в темнохвойной тайге на пространстве от 52-й параллели на юге до ~59° с. ш. [Коломиец, Майер, 1963]. Северная

граница очагового распространения вредителя аппроксимируется изолиниями суммы “активных” температур ($> +10^{\circ}\text{C}$), равной $1200\text{--}1400^{\circ}\text{C}$ [Рожков, 1965; Кондаков, 2002]. Единичные экземпляры бабочек шелкопряда отмечались до 63-й параллели включительно [Кондаков, 2002]. Предпочитаемыми кормовыми объектами этого коконопрядя являются пихта (*Abies sibirica*), сосна кедровая сибирская (*Pinus sibirica*), а также ель (*Picea obovata*) и лиственница (*Larix* spp.). Наиболее эруптивные вспышки шелкопряда, датируемые 1951–1957 гг. (Кеть–Чулымское междуречье) и 1993–1996 гг. (Нижнее Приан-

гарье), охватили территории $\sim 2,5$ и $1,0$ млн га соответственно [Рожков, 1965; Кондаков, 2002; Kharuk et al., 2004; 2007] (рис. 1). Массовые размножения данного насекомого провоцируются предшествующими засухами, низким уровнем осадков и относительно высокими температурами воздуха в весенне-раннелетний период [Коломиец, Майер, 1963; Кондаков, 2002].

Предполагается, что наблюдаемые изменения климата будут способствовать возрастанию частоты вспышек ряда видов насекомых, расширению их ареалов на север и в высокогорья [de la Giroday et al., 2012; Seiter,

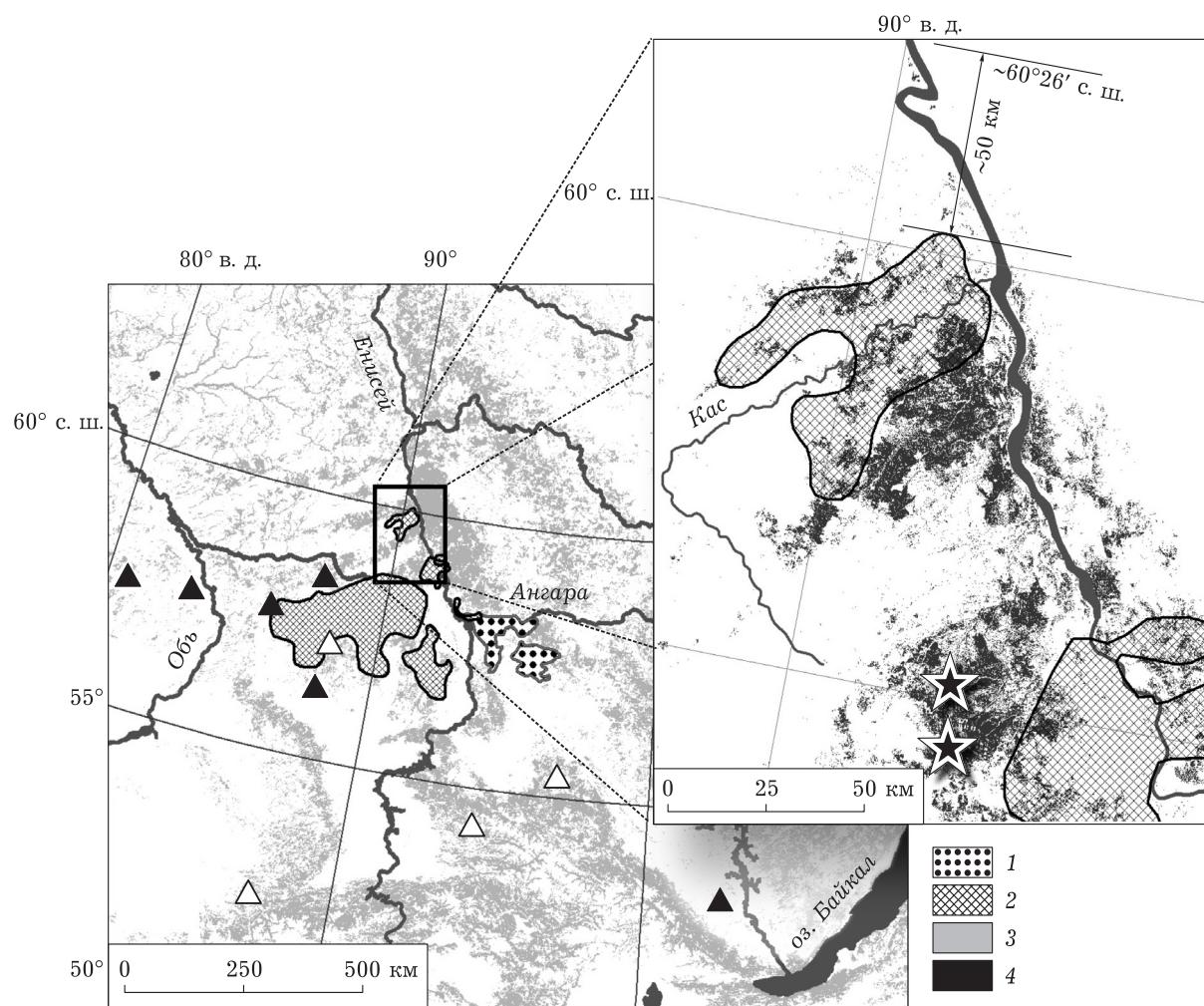


Рис. 1. Схема локализации Енисейской вспышки сибирского шелкопряда (обозначена прямоугольником). 1, 2 – зоны катастрофических вспышек 1951–1957 и 1994–1996 гг. соответственно; 3 – древостои с преобладанием *Abies sibirica*, *Pinus sibirica* и *Picea obovata*. Треугольниками указаны вспышки, возникшие в 2014–2015 гг. На вставке: погибшие древостои в зоне вспышки (4). Первичные очаги выделены звездочками. Стрелкой обозначено расстояние между северными границами Енисейской и Кеть–Чулымской вспышек

Kingsolver, 2013; Kharuk et al., 2017], тогда как другие виды могут уменьшить свою численность и распространение [Haynes et al., 2014; Kolb, 2016].

В настоящее время с воздействием изменений климата связывают активизацию таких агрессивных видов ксилофагов, как уссурийский полиграф (*Polygraphus proximus*) в Сибири и *Dendroctonus ponderosae*, *D. rufipennis* в Северной Америке [Bentz et al., 2010; Weed et al., 2013; Kharuk et al., 2017]. На юго-западе США и Мексики расширяется ареал античной волнянки [Coleman et al., 2014]. В лесах Германии наблюдаются вспышки *Dendrolimus pini*, стимулированные периодическими засухами [Haynes et al., 2014]. Расширяется ареал *Lymantria dispar* в Северной Америке [Thompson et al., 2017]. В южной тайге Сибири отмечено продвижение зоны очагового распространения сибирского шелкопряда на север [Харук и др., 2016б; Kharuk et al., 2017]. На данной территории, по сравнению с другими регионами, эффект климатических воздействий на динамику насекомых может являться более высоким, поскольку одному градусу возрастания глобальной температуры соответствует возрастание региональной температуры на 1,75 °C [IPCC, 2014].

Цель данной работы – анализ динамики и причин возникновения вспышки массового размножения *Dendrolimus sibiricus*, реализовавшейся в Енисейской равнине севернее его исторической границы очагового распространения.

Рассматривались следующие аспекты проблемы: хронология вспышек массового размножения сибирского шелкопряда; анализ связи их возникновения с эколого-климатическими переменными; изменение ареала очагового распространения сибирского шелкопряда; вероятностный прогноз зон потенциальных вспышек вредителя.

МАТЕРИАЛ И МЕТОДЫ

Исследуемая “Енисейская” вспышка массового размножения сибирского шелкопряда реализовалась в восточной части Енисейской низменности и в низкогорьях Енисейского кряжа (Красноярский край). Практически синхронно с ней очаги размножения данного вредителя возникли в Томской, Ке-

меровской и Иркутской обл. (см. рис. 1). Древостои в первичном очаге сформированы преимущественно пихтой и кедром; средние возраст, высота и диаметр составляют 95 ± 20 лет, 17 ± 5 м, 18 ± 6 см для пихты и 213 ± 40 лет, 21 ± 4 м и 35 ± 5 см – для кедра.

В работе использовали материалы дистанционного зондирования (съемка Landsat, Sentinel-2A, Worldview) и данные наземных обследований. Снимки Landsat (разрешение 15–60 м) получены с сайта <http://glovis.usgs.gov>. Анализировали 1–7 спектральные каналы. Снимки Sentinel-2A (разрешение 10–60 м) взяты с сайта <https://scihub.copernicus.eu/dhus/>. Использовали только каналы с разрешением 10 м (синий, зеленый, красный, ближний ИК). Снимки сверхвысокого разрешения (0,5 м) Worldview приведены с сервисов Bing Maps (<https://www.bing.com/mapspreview>) и Google Maps (<https://www.google.com/maps>).

Анализ снимков включал следующие этапы:

- Подбор и предобработку снимков Landsat-7/ETM+, Landsat-8/OLI и Sentinel-2A, генерацию композитов мозаик, трансформацию снимков в проекцию UTM (зона 46 сфероид WGS84). К сценам применяли топографическую коррекцию методом С-коррекции [Riano et al., 2003]. Использовано всего 15 сцен Landsat и две сцены Sentinel-2A, покрывающие девять временных срезов (2013–2016 гг.).

- Генерацию маски темнохвойных древостоев до начала вспышки (2013 г.) на основе экспертного дешифрирования снимков Landsat и Worldview. К темнохвойным относили древостои с преобладанием (> 70 %) пихты и кедра. Классификационную картосхему генерировали методом максимального правдоподобия с применением процедуры Threshold с пороговым значением $p = 0,05$. Использовали 14 обучающих выборок для темнохвойных древостоев, включающих в среднем по 13 700 пикселей. Средняя разделимость между обучающими выборками для них по расстоянию Джейффриса – Матусита составила 1040 (23 % перепутывания). Площадь темнохвойных древостоев – 18 247 км² (~18,5 % от анализируемой территории).

- Генерацию классификационных картосхем усохших и усыхающих (древостои с уровнем дефолиации >75 %, включавшие >50 % усохших деревьев). Всего покрыто во-

семь временных срезов (12.07.2014, 05.06.2015, 21.06.2015, 01.09.2015, 20.04.2016, 04.06.2016, 11.06.2016, август – сентябрь 2016 г.).

Снимки обрабатывали в программной среде ESRI ArcGIS (www.esri.com) и Erdas Imagine (<http://geospatial.intergraph.com>). Анализ пространственного распределения древостоев выполняли с применением цифровой модели рельефа SRTMGL1 (разрешение 8,6 м по вертикали и 30 м по горизонтали; https://lpdaac.usgs.gov/dataset_discovery/measures/measures_products_table/srtmgl1v003). Пространственные переменные (высота над уровнем моря, крутизна склона, азимут) анализировали с шагом 100 м, 5 и 45° соответственно. Распределение древостоев по элементам рельефа вычислялось с применением процедуры нормализации [Харук и др., 2016б].

Наземные обследования выполнены специалистами Красноярского Центра защиты леса. Определяли следующие параметры: координаты, породный состав, полноту, бонитет, запас, преобладающую породу, средние возраст, высоту и диаметр, степень повреждения древостоя и налигие свежего сухостоя, подрост, подлесок, тип почвы.

Климатические переменные получены с ближайших метеостанций (Тасеево, meteo.ru; Енисейск, climexp.knmi.nl), либо по данным CRU TS 3.23 (https://crudata.uea.ac.uk/cru/data/hrg/cru_ts_3.23), GHCN CAMS (<https://www.esrl.noaa.gov/psd/data/gridded/data.ghcncams.html>) и GPCC (<https://www.esrl.noaa.gov/psd/data/gridded/data.gpcc.html>) с разрешением 0,5 × 0,5°. Данные по суммам положительных температур и количеству дней с $t > 0$ °C и $t > +10$ °C рассчитаны по данным MERRA2 (M2SDNXSLV.5.12.4; ftp://goldsmr4.sci.gsfc.nasa.gov//data/s4ra/MERRA2_MONTHLY; 1980–2016 гг.). Указанная база данных использована также для расчета влажности напочвенного покрова (поверхностный слой 0–2 см; продукт M2TMNXLND.5.12.4). Значения индекса засушливости SPEI получены с сайта <http://sac.csic.es/spei> (разрешение 0,5 × 0,5°). SPEI вычисляется как разность (D_i) между величинами осадков (P_i) и потенциальной эвапотранспирацией (PET_i), где i – период, и нормируется по пространству и времени [Vicente-Serrano et al., 2010]:

$$D_i = P_i - PET_i$$

Статистическую модель для локализации зон потенциальных вспышек размножения сибирского шелкопряда и определения времени их возникновения рассчитывали по климатическим данным методом MARS (многомерные аддитивные регрессионные сплайны). MARS реализован в программе Statistica и основан на методике, предложенной J. H. Friedman [1991]. Для генерации модели использовали помесячные данные о температурах, количестве осадков и SPEI за текущий и три предшествующих года (значения переменных за летний, осенний, весенний и зимний периоды и за год). В общей сложности рассчитывали 183 переменные (из которых 23 оказались значимыми). Модель состоит из 41 терма и 40 базисных функций. При генерировании модели в качестве опорных данных использовали данные о семи известных вспышках сибирского шелкопряда (Енисейская – 2014 г., Приангарская – 1993–1996 гг., Кеть-Чульымская – 1951–1957 гг., Ирбейская – 2002 г., Байгольская – 2009 г., Тегульдетская – 1981 г., Восточно-Саянская – 1966 г.). Анализируемый временной интервал в каждом случае составлял двадцать лет до начала вспышки. Полученная модель позволила определить семь из семи вспышек с вероятностью >70 % и 142 из 142 годов с отсутствием вспышек.

Тестирование модели произведено по шести наблюденным вспышкам (в Томской, Кемеровской и Иркутской обл.), не использованными при генерации модели. Модель датировала возникновение вспышек 2014 г. (Томская и Кемеровская обл.) и 2015 г. (в Иркутской обл.); датировка совпадает с приведенной в отчетах областных центров защиты леса. С целью составления карт зон потенциальных вспышек модель реализована в программе ArcGIS с помощью ГИС-инструментов.

РЕЗУЛЬТАТЫ

В пределах зоны Енисейской вспышки годовое количество осадков составляет 540 мм (летние осадки – 190 мм), средняя температура января и июля –20,8 и +18,8 °C соответственно (данные за период с 2001–2016 гг.). В последние десятилетия наблюдается воз-

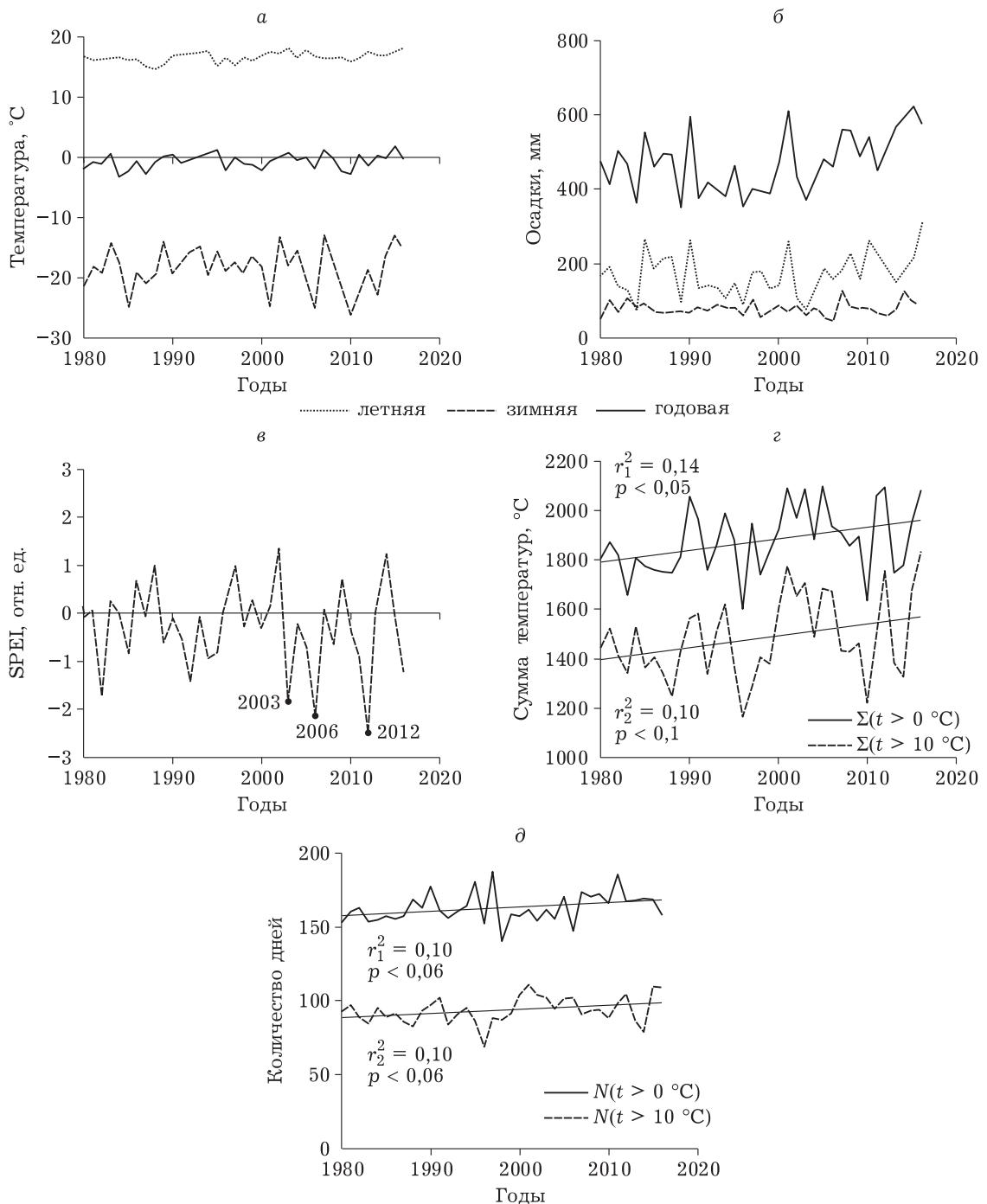


Рис. 2. Динамика климатических переменных в зоне Енисейской вспышки: а – температура, б – осадки, в – индекс сухости SPEI, г – сумма температур, д – количество дней с $t > 0^\circ\text{C}$, $t > 10^\circ\text{C}$.

Графики а–в получены по данным метеостанции “Енисейск”; г, д – по данным MERRA2

растание суммы положительных температур ($t > 0^\circ\text{C}$, $t > +10^\circ\text{C}$) и количества дней с $t > 0^\circ\text{C}$ (+9; рис. 2, г, д). Начиная с 2000 г. суммы температур с $t > 0^\circ\text{C}$ и $t > +10^\circ\text{C}$ возросли на 120 и 150 °C соответственно (базовый период – 1980–1999 гг.). Наблюдается

возрастание частоты и интенсивности засух (см. рис. 2, в).

Первичный очаг шелкопряда возник в 2014 г. на невысоких (150–180 м) пологих (до 5°) склонах юго-западной экспозиции (рис. 3, а). Такие местообитания наиболее благоприят-

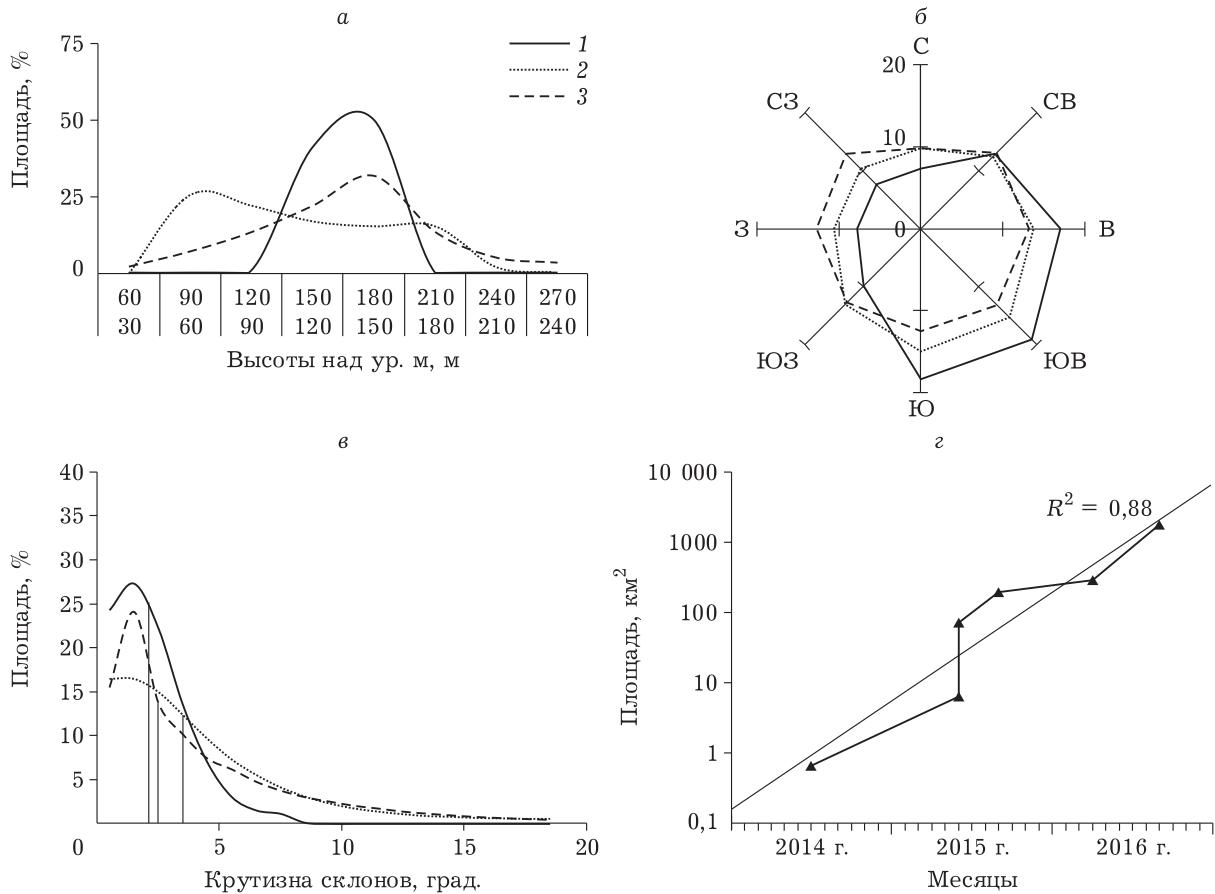


Рис. 3. Распределение усохших древостоев по элементам рельефа в зависимости от высоты над уровнем моря (а), азимута (б) и крутизны склона (в).

1 – первичные очаги, 2 – все усохшие древостои, 3 – вся анализируемая территория; 4–6 – медианы распределений. Данные нормализованы (% от площади древостоев до начала вспышки); г – динамика площади усохших древостоев

ны для развития вредителя и соответствуют его первичным резервациям [Кондаков, 1974]. Аналогична локализация вспышек *Diprion pini* L. в сосновых лесах Финляндии [Kosunen et al., 2017]. В дальнейшем повреждения древостоев распространялись на высоты до 350 м и включали леса, расположенные на склонах северной экспозиции крутизной до 25°. Площадь очага в конце 2016 г. составила около 200 тыс. га (рис. 4, г), охватив в 2017 г. территорию до 800 тыс. га.

Эколого-климатическая граница очагового распространения насекомого, согласно А. С. Рожкову [1965] и Ю. П. Кондакову [2002], определяется теплообеспеченностью в период активного развития сибирского шелкопряда. Его северная граница ограничена суммой положительных температур ($> +10$ °С), которую А. С. Рожков [1965] полагал равной

> 1200 °С, тогда как по Ю. П. Кондакову [2002] она составляет > 1400 °С. Максимальные суммы температур, при которых возможны вспышки, составляют 2200 °С [Рожков, 1965]. На рис. 4 приведены рассчитанные суммы температур, соответствующие интервалам от 1200 до 2200 °С. Наблюдаемая в настоящее время северная граница очагового распространения сибирского шелкопряда аппроксимируется суммой температур в интервале 1200–1300 °С.

Вспышки массового размножения вредителя в бассейнах рек Обь и Енисей охватывали древостои на площадях до 2,5 млн га (рис. 5). Начиная с катастрофической вспышки в Кеть-Чулымском междуречье (1951–1957 гг.), прослеживается тренд уменьшения их площади. Указанное явление может объясняться “выеданием” шелкопрядом своей кор-

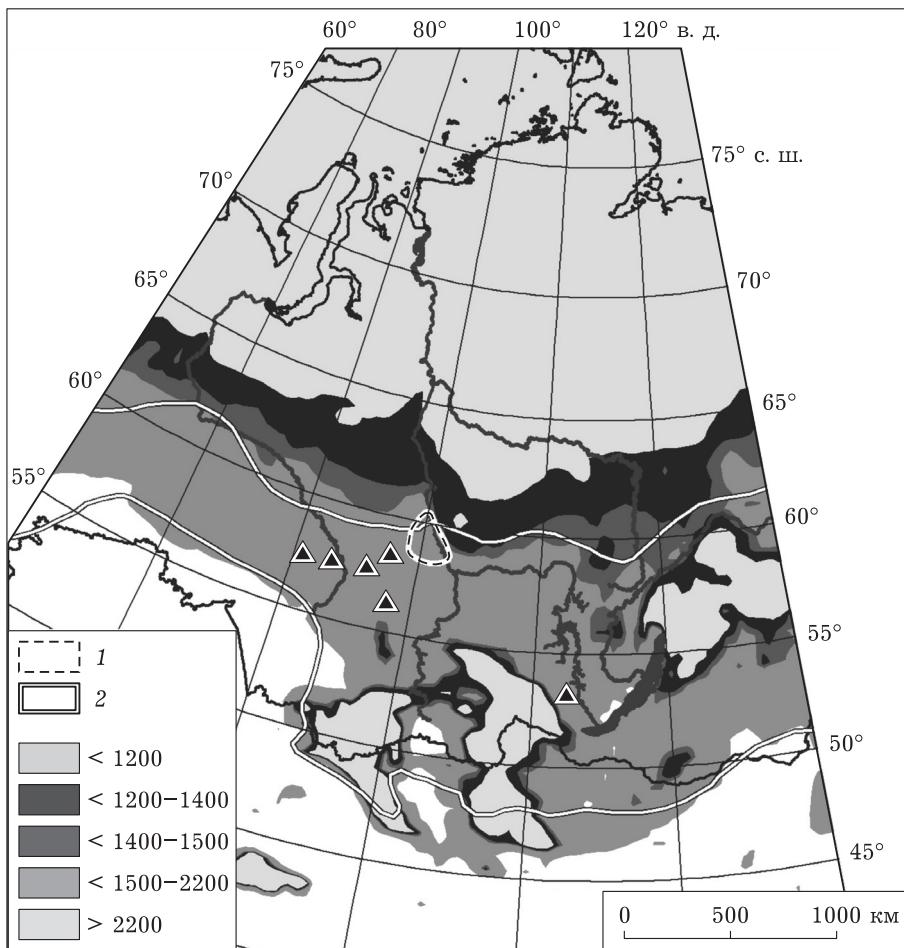


Рис. 4. Карта суммы суточных температур ($t > 10^{\circ}\text{C}$; период – 2011–2016 гг.).

1 – Енисейская вспышка сибирского шелкопряда; 2 – границы ареала сибирского шелкопряда (по: [Рожков, 1965] в модификации Баранчикова и Кондакова [<http://forest.akadem.ru/projects/c2/r-gallery/r-pst-sib08.html>]). Белыми треугольниками отмечены локализации вспышек сибирского шелкопряда, использованные для генерации модели. Черные треугольники – вспышки шелкопряда в Томской, Кемеровской (2014 г.) и Иркутской обл. (2015 г.)

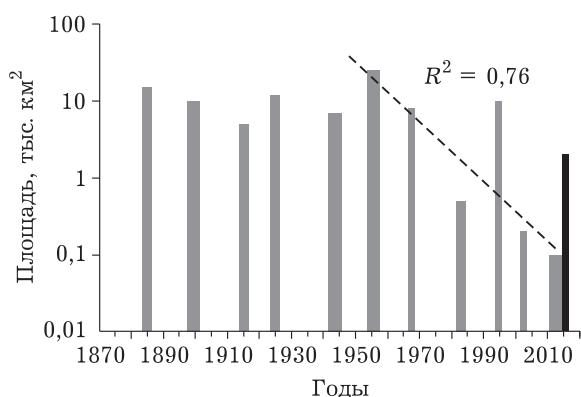


Рис. 5. Хронология площади вспышек сибирского шелкопряда в Средней Сибири (по данным Кондакова [2002], Kharuk et al. [2003, 2004, 2009]; Харук и др. [2016б]). Тренд обозначен прямой (без учета Енисейской вспышки)

мовой базы в предшествующие вспышки, а также уменьшением и фрагментацией площади темнохвойных древостоев вследствие антропогенных воздействий. Енисейская вспышка реализовалась в ранее незатронутых шелкопрядом древостоях севернее исторической границы очагового распространения этого насекомого.

Возникновение вспышек связывают с аномалиями эколого-климатических переменных, основными из которых полагают аномалии температуры воздуха в весенний-раннелетний период и предшествующее вспышке возрастание засушливости [Рожков, 1965; Кондаков, 2002; Kolb et al., 2016]. Значимым показателем является также влажность лесной подстилки, в которую уходят на зимовку гу-

сеницы шелкопряда; этот параметр можно оценить по данным MERRA2 (см. Материал и методы). Рассмотрим динамику климатических переменных в период, предшествовавший наиболее масштабным вспышкам сибирского шелкопряда (Кеть-Чулымской, Приангарской и Енисейской). Как следует из представленных на рис. 6 данных, им предшествовали возрастание температуры воздуха (май – июнь) и суммы положительных температур, уменьшение количества осадков и возрастание засушливости климата, а также уменьшение влажности лесной подстилки. Во всех случаях вспышки предваряли засухи (индцируемые экстремально низкими значениями SPEI). Их завершение совпадало с возрастанием влажности подстилки, снижением суммы температур ($t > +10^{\circ}\text{C}$) и возрастанием увлажнения (см. рис. 6).

При статистическом моделировании вероятных очагов возникновения вспышек сибирского шелкопряда и времени их возникновения рассматривались все основные климатические переменные, потенциально влияющие на возникновение вспышки: температура воздуха, индекс сухости, осадки (см. Методы). Модель построена и проверена по обучающей выборке, включающей 13 известных вспышек (из них шесть использованы при построении модели; рис. 7).

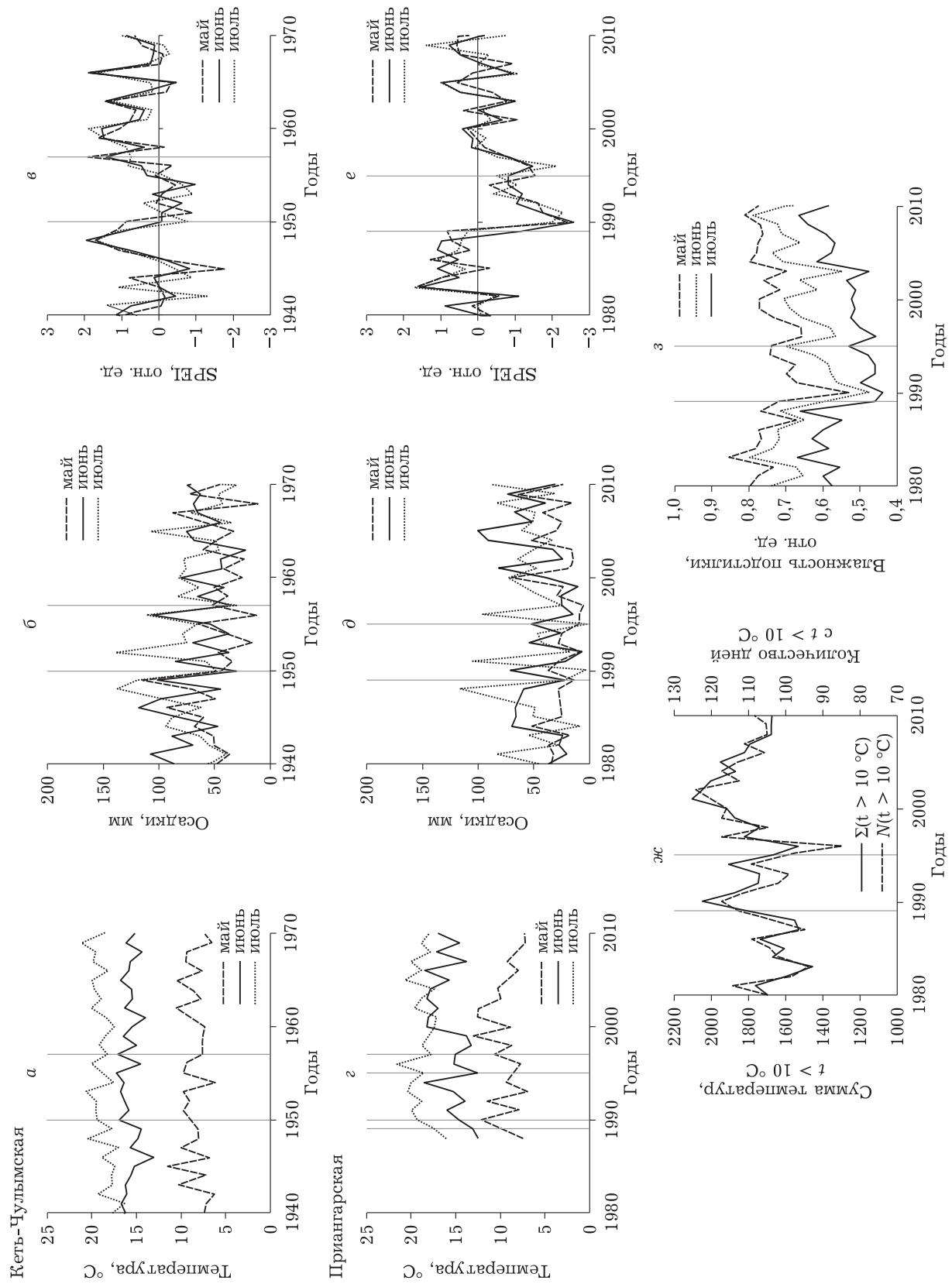
Модель позволила предсказать зоны возникновения всех указанных вспышек (см. рис. 7). Наиболее значимыми переменными текущего года являются температура марта, количество майских и летних осадков; значимые переменные предшествующего года – летние, майские и сентябрьские температуры, количество осадков в мае – июне и декабре, индекс засушливости SPEI в августе. Зоны вероятного возникновения вспышек охватывают территории, превышающие зоны реализации вспышек. Таким образом, учет климатических переменных представляется необходимым, но недостаточным условием предсказания локализации вспышки. Диапазон неопределенности возникновения данного явления требует рассмотрения некоторых других существенных переменных (например, характеристик локальных популяций шелкопряда, данных о кормовых ресурсах). Вместе с тем реализованный в модели подход по-

зволяет выявить зоны вероятного возникновения вспышек массового размножения шелкопряда. При использовании прогнозных данных по температурам, осадкам и индексу SPEI возможно применение модели для прогнозирования их потенциальных зон, что может использоваться в лесопатологическом мониторинге.

ОБСУЖДЕНИЕ

Особенностью рассмотренной вспышки массового размножения сибирского шелкопряда является ее локализация: она реализовалась севернее ранее установленной границы очагового распространения этого насекомого. Кроме того, она представляет часть панзональной вспышки вредителя, очаги которой возникли синхронно в темнохвойных древостоях Красноярского края, Томской, Кемеровской и Иркутской обл. с расстоянием между очагами более 1200 км. Первичные очаги размножения шелкопряда возникли в кедрово-пихтовых древостоях, расположенных на пологих прогреваемых склонах южной экспозиции. Потепление и возрастание засушливости климата, увеличение продолжительности периода вегетации позволило сибирскому шелкопряду продвинуться на расстояние до 50 км на север от ранее установленной границы и реализовать вспышку, охватившую территорию 800 тыс. га. Возникновение столь масштабного явления в расположенных южнее древостоях маловероятно вследствие произошедшего ранее “выедания” шелкопрядом своей кормовой базы, а также вырубки и фрагментации темнохвойных древостоев. Продвижение на север границы очагового распространения сибирского шелкопряда подтверждает гипотезу о климатически индуцированной миграции ареалов насекомых-вредителей [Kolb et al., 2016].

Наблюдаемые изменения климата открывают возможности освоения шелкопрядом темнохвойной тайги Енисейского кряжа (прежде всего, низкогорий), а также продвижение в зону доминирования лиственницы. Лиственница, в отличие от кедра и пихты, способна переносить дефолиацию. Однако, как показывают вспышки вредителя в Якутии [Чикидов и др., 2000], возможен массовый



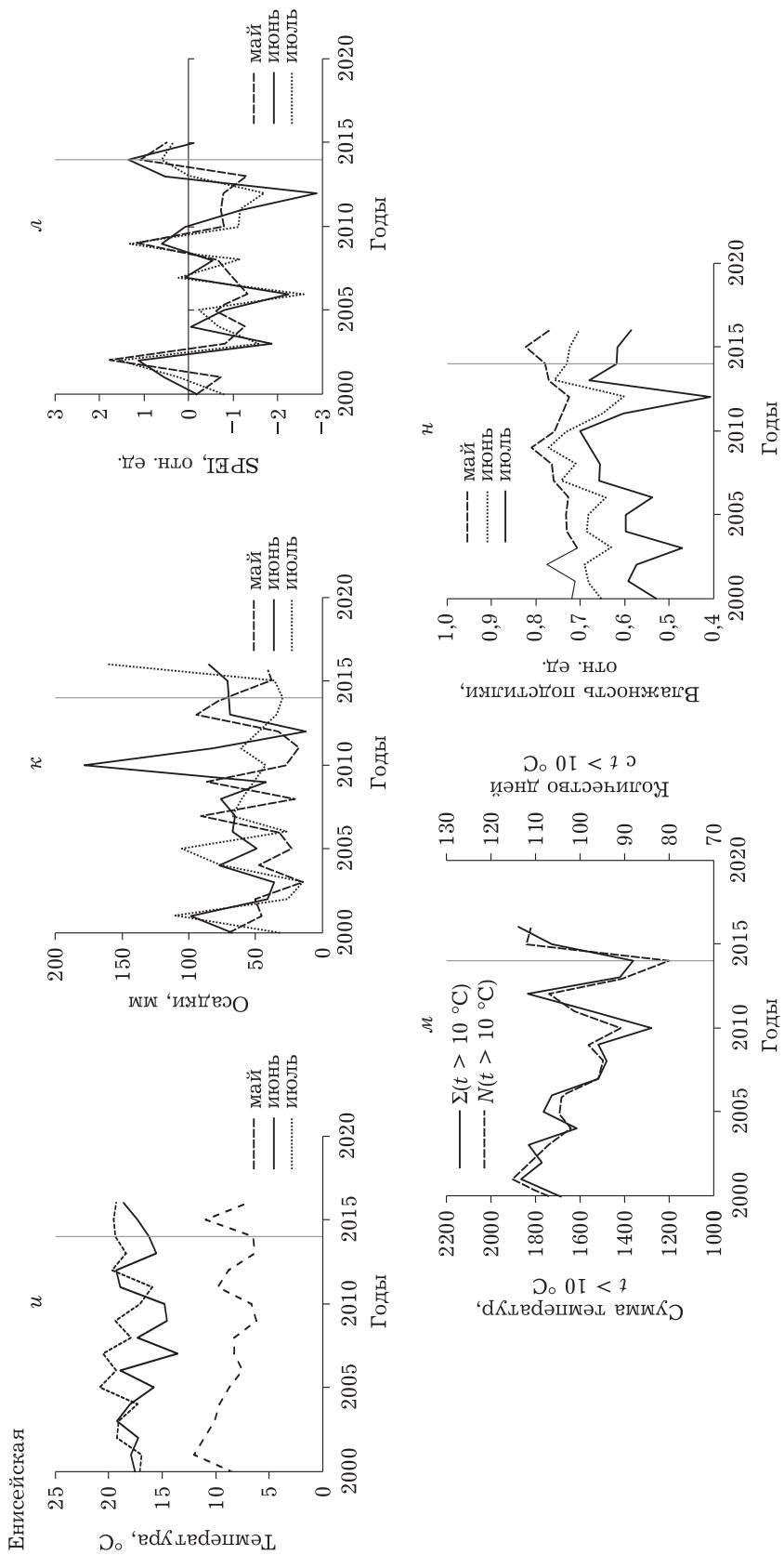


Рис. 6. Динамика климатических переменных (температура воздуха и суммы положительных температур, индекс засушливости SPEI, влажность лесной подстилки). Вертикальные линии указывают начало и конец вспышек

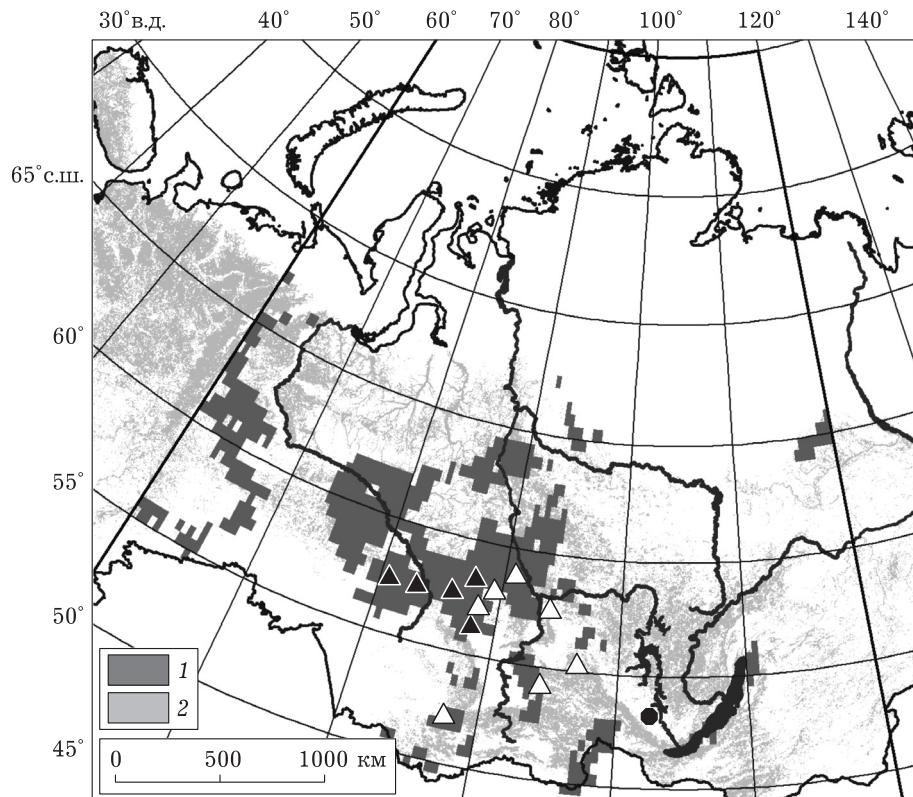


Рис. 7. Карта зон потенциальных вспышек сибирского шелкопряда в темнохвойной тайге.

1 – зона потенциальных вспышек 2014 г., 2 – темнохвойные древостои. Светлые треугольники – обучающая выборка для модели. Темные треугольники и черный диск – вспышки, использованные при тестировании модели. Вспышка в Иркутской обл., возникшая в 2015 г. в предсказанной моделью зоне, указана черным диском

отпад древостоев с последующим возникновением крупных лесных пожаров.

Наряду с миграцией на север, следует ожидать продвижения шелкопряда и в горные леса, где возникновение вспышек лимитируется температурой. До настоящего времени локализация первичных очагов в горно-таежных лесах ограничивалась высотами до 400–550 м над ур. м. [Kharuk et al., 2009]. Однако тренд потепления в горах, превышающий таковой на равнинах, приводит к удлинению периода вегетации, возрастанию прироста древесных растений (кедра, пихты, лиственницы) и сомкнутости древостоев, их продвижения по градиенту высоты [Kharuk et al., 2007]. Таким образом, возникновение вспышек в горах выше их исторических границ – вопрос ближайшего будущего. В этой связи отметим, что в горных лесах США зафиксировано продвижение насекомых по градиенту высоты, стимулированное изменениями климата [Millar, Stephenson, 2015].

Известно, что погибшие и ослабленные шелкопрядом древостои подвергаются атакам вторичных вредителей, наиболее опасным из которых до недавнего времени рассматривался черный пихтовый усач (*Monochamus urussovi*) [Исаев и др., 1988]. Однако в XXI в. наибольший ущерб пихтарникам подзоны южной тайги Сибири наносит *Polygraphus proximus*, массовому размножению которого способствовало ослабление древостоев водным стрессом вследствие возрастающей аридизации климата [Харук и др., 2016а]. Размножение этого насекомого отмечено и в ослабленных шелкопрядом древостоях зоны Енисейской вспышки.

В отечественной и зарубежной литературе неоднократно дискутировался вопрос о связи возникновения вспышек шелкопряда с аномалиями эколого-климатических параметров [Рожков, 1965; Кондаков, 2002; Haynes et al., 2014]. Представленная статистическая модель, в которую включены температура

воздуха, сумма положительных температур и индекс засушливости, позволяет указывать зоны вероятного возникновения вспышек. В настоящее время температурная граница ($> 1200^{\circ}\text{C}$) вероятного возникновения вспышек шелкопряда продвинулась на север на расстояние до 150–500 км по сравнению с указанной А. С. Рожковым [1965] (см. рис. 4).

В заключение следует отметить, что продвижение зоны очагового распространения сибирского шелкопряда на север будет сопровождаться возрастанием горимости лесов, поскольку в погибших древостоях (“шелкопрядниках”) частота и площадь пожаров существенно (до десяти раз) превышает таковые в контроле [Харук, Антамошкина, 2017].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Наблюдаемые изменения климата индуцировали продвижение на север зоны очагового распространения *Dendrolimus sibiricus* – опасного вредителя таежных лесов. Инициация вспышки связана с возрастанием засушливости климата, увеличением суммы “активных” температур ($t > +10^{\circ}\text{C}$) и удлинением вегетационного периода.

Енисейская вспышка сибирского шелкопряда представляет часть панзональной вспышки, реализовавшейся в 2014–2017 гг. на территории Красноярского края, в Томской, Кемеровской и Иркутской областях.

Сохранение наблюдаемых климатических трендов, возрастание суммы положительных температур, увеличение аридности климата и удлинение периода вегетации открывает возможности миграции сибирского шелкопряда в северные темнохвойные леса и лиственничники.

Работа поддержана грантом № 14.В.25.31.0031.

ЛИТЕРАТУРА

- Исаев А. С., Рожков А. С., Киселев В. В. Черный пихтовый усач *Monochamus urussovi* (Fisch.). Новосибирск: Наука, 1988. 264 с.
- Коломиец Н. Г., Майер Э. И. Важнейшие вредители лесов Томской области и меры борьбы с ними. Томск: Том. кн. изд-во, 1963. 36 с.
- Кондаков Ю. П. Закономерности массовых размножений сибирского шелкопряда // Экология популяций лесных животных Сибири. Новосибирск: Наука, 1974. С. 206–264.
- Кондаков Ю. П. Массовые размножения сибирского шелкопряда в лесах Красноярского края // Энтомологические исследования в Сибири. Красноярск: КФ РЭО, 2002. Вып. 2. С. 25–74.
- Рожков А. С. Массовое размножение сибирского шелкопряда и меры борьбы с ним. М.: Наука, 1965. 180 с.
- Харук В. И., Им С. Т., Петров И. А., Ягунов М. Н. Усыхание темнохвойных древостоев Прибайкалья // Сиб. экол. журн. 2016а. № 5. С. 750–760 [Kharuk V. I., Im S. T., Petrov I. A., Yagunov M. N. Decline of dark coniferous stands in Baikal Region // Contemporary Problems of Ecology. 2016а. Vol. 9, N 5. P. 617–625].
- Харук В. И., Демидко Д. А., Федотова Е. В., Двинская М. Л., Будник У. А. Пространственно-временная динамика вспышки массового размножения сибирского шелкопряда в темнохвойных древостоях Алтая // Там же. 2016б. № 6. С. 843–854 [Kharuk V. I., Demidko D. A., Fedotova E. V., Dvinskaya M. L., Budnik U. A. Spatial and temporal dynamics of Siberian silk moth large-scale outbreak in dark-needle coniferous tree stands in Altai // Ibid. 2016б. Vol. 9, N 6. P. 711–720].
- Харук В. И., Антамошкина О. А. Воздействие сибирского шелкопряда на горимость лесных территорий // Сиб. экол. журн. 2017. № 5. С. 647–654.
- Чикидов И. И., Борисов Б. З., Исаев А. П. Оценка площади очагов массового размножения сибирского шелкопряда в 1999–2000 гг. в центральной Якутии по данным SPOT-Vegetation // Наука и образование. 2000. № 4. С. 76–82.
- Bentz B. J., Régnière J., Fettig C. J., Hansen E. M., Haynes J. L., Hicke J. A., Kelsey R. G., Negrón J. F., Seybold S. J. Climate change and bark beetles of the Western United States and Canada: Direct and indirect effects // Bioscience. 2010. Vol. 60. P. 602–613.
- Coleman T. W., Jones M. I., Courtial B., Graves A. D., Woods M., Roques A., Seybold S. J. Impact of the first recorded outbreak of the Douglas-fir tussock moth, *Orgyia pseudotsugata*, in southern California and the extent of its distribution in the Pacific Southwest region // For. Ecol. Manag. 2014. P. 295–305.
- De la Giroday H. C., Carroll A. L., Aukema B. H. Breach of the northern Rocky Mountain geoclimatic barrier: Initiation of range expansion by the mountain pine beetle // J. Biogeography. 2012. Vol. 39. P. 1112–1123.
- Friedman J. H. Multivariate adaptive regression splines // Annals of Statistics. 1991. Vol. 19, N 1. P. 1–67.
- Haynes K. J., Allstadt A., Klimetzek D. Forest defoliator outbreaks under climate change: Effects on the frequency and severity of outbreaks of five pine insect pests // Global Change Biol. 2014. Vol. 20. P. 2004–2018.
- 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, K. J. Mach, M. D. Mastrandrea, T. E. Bilir, M. Chatterjee, K. L. Ebi, Y. O. Estrada, R. C. Genova, B. Girma, E. S. Kissel, A. N. Levy, S. MacCracken, P. R. Mastrandrea, L. L. White. World Meteorological Organization: Geneva, Switzerland. 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 silkworm 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 silkworm outbreak and taiga mortality // Scandinav. Journ. Forest Res. 2007. Vol. 22. P. 531–536.
- Kharuk V. I., Ranson K. J., Im S. T. Siberian silkworm 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., Petrov I. A., Ranson K. J., Yagunov M. N. Climate-induced northerly expansion of Siberian silkworm range // Forests. 2017. Vol. 8 (301). doi: 10.3390/f8080301.
- Kolb T. E., Fettig C. J., Ayres M. P., Bentz B. J., Hicke J. A., Mathiasen R., Stewart J. E., Weed A. S. Observed and anticipated impacts of drought on forests insects and diseases in the United States // Ibid. 2016. early online.
- Kosunen M., Kantola T., Starr M., Blomqvist M., Talvitie M., Lyytikäinen-Saarenmaa P. Influence of soil and topography on defoliation intensity during an extended outbreak of the common pine sawfly (*Diprion pini* L.) // iForest. 2017. Vol. 10. P. 164–171.
- Millar C. I., Stephenson N. L. Temperate forest health in an era of emerging megadisturbance // Science. 2015. Vol. 349, N 823. P. 823–826.
- 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.
- Seiter S., Kingsolver J. Environmental determinants of population divergence in life-history traits for an invasive species: climate, seasonality and natural enemies / J. Evolutionary Biol. 2013. Vol. 26. P. 1634–1645.
- Thompson L., Faske T., Nahene N., Grim D., Salvatore J., Agost A., Parry D., Tobin P., Johnson D., Grayson K. Variation in growth and developmental responses to supraoptimal temperatures near latitudinal range limits of gypsy moth *Lymantria dispar* (L.), an expanding invasive species // Physiol. Entomol. 2017. Vol. 42. P. 181–190.
- 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. 1696–1711.
- Weed A. S., Ayres M. P., Hicke J. A. Consequences of climate change for biotic disturbances in North American forests // Ecol. Monographs. 2013. Vol. 83. P. 441–470.

Migration of the Northern Boundary of the Siberian Silkworm Habitat

V. I. KHARUK^{1,2}, S. T. IM^{1,2,3}, M. N. YAGUNOV⁴

¹ V. N. Sukachev Institute of Forest (Federal Research Center, Krasnoyarsk Scientific Center, SB RAS)
660036, Krasnoyarsk, Akademgorodok, 50/28
E mail: kharuk@ksc.krasn.ru

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

³ Reshetnev Siberian State University of Science and Technology
660041, Krasnoyarsk, Krasnoyarskii rabochii ave., 31

⁴ Forest Protection Center of Krasnoyarskii Krai
660036, Krasnoyarsk, Akademgorodok, 50a/2

Climate changes induced migration of Siberian silkworm (*Dendrolimus sibiricus* Tschetv., one of the most dangerous pests in taiga) outbreaks northward. The initial outbreak of the Siberian silkworm began in 2014 in the Siberian pine-fir stands within the Yenisei plain on the south-west gentle slopes at elevations up to 200 m above sea level. Later on, the outbreak extended to the forest with higher humidity, northern slopes and Yenisei Ridge low and middle elevations. The limit of the outbreak zone shifted up to 50 km (to 60°26' N) northward from the historical boundary of formerly observed outbreaks. The outbreak was incited by increasing aridity and sum of positive temperatures ($t > +10^{\circ}\text{C}$), and decreasing top soil moisture, and extended to the area up to 800,000 ha. Stands mortality was accompanied by activation of the secondary pests, including aggressive bark-beetle species *Polygraphus proximus*. The studied outbreak is a part of the pan-zonal outbreak which occurred in 2014–2017 on the territory of Siberia (Krasnoyarsk Krai, Tomsk, Kemerovo and Irkutsk Oblasts). The observed increase of warming, aridity and vegetation period extension open opportunities for Siberian silkworm migration to the northern darkneedle taiga.

Key words: Siberian silkworm, climate change, dendrophagous insects, pest outbreaks, pest ranges.