

УДК 630*58/64

ОЦЕНКА СОСТОЯНИЯ РАСТИТЕЛЬНОСТИ В ОЧАГЕ МАССОВОГО РАЗМНОЖЕНИЯ СИБИРСКОГО ШЕЛКОПРЯДА ПО СПУТНИКОВЫМ ДАННЫМ¹

© 2019 г. С. В. Князева^а, *, Н. В. Королева^а, С. П. Эйдлина^а, Е. Н. Сочилова^а^аЦентр по проблемам экологии и продуктивности лесов РАН,
Россия, 117997, Москва, ул. Профсоюзная, 84/32, стр. 14

*E-mail: knsvetl@gmail.com

Поступила в редакцию 26.02.2019 г.

После доработки 06.05.2019 г.

Принята к публикации 05.06.2019 г.

В статье представлены результаты анализа состояния и динамики поврежденной растительности по космическим снимкам высокого и сверхвысокого пространственного разрешения. Исследование проведено на примере участка темнохвойных лесов Нижнего Приангарья (Красноярский край), где в 1994–1995 гг. образовался крупный очаг вспышки сибирского шелкопряда. В результате дистанционной оценки состояния темнохвойных лесов получены тренды индексов SWVI (или NDMI) и NDVI, характеризующие многолетние изменения растительного покрова за период 2000–2018 гг. Наиболее информативным показателем является индекс SWVI: для погибших и сильно поврежденных древостоев (дефолиация крон более 75%) отмечается резкое снижение средних значений и увеличение коэффициентов вариации индекса. По данным разностных изображений индексов (Δ SWVI) с пороговым критерием 1σ (стандартное отклонение) рассчитана площадь погибших древостоев. В 2000 г. площадь лесов, погибших под воздействием сибирского шелкопряда, составила около 19,2 тыс. га. После двух крупных пожаров в 2004 и 2011 гг. и в результате совокупности ряда деструктивных факторов площадь погибших лесов увеличилась к 2017–2018 гг. до 20,4 тыс. га. Анализ лесовозобновления в границах очага повреждения (погибшие насаждения) проведен при помощи классификации снимков Landsat (20.06.2017, 23.06.2018) алгоритмом Random Forest с использованием при выборе эталонов для обучения детальных разносезонных снимков с пространственным разрешением 1 м Ресурс-П (Геотон-Л1 – 22.07.2015 и 12.03.2018). Достоверность классификации высокая (показатель каппа более 0,9). По результатам классификации рассчитаны площади лиственных и хвойных древостоев, лиственного и смешанного с преобладанием хвойного возобновления, травяно-кустарниковой растительности, открытой почвы. Через 23 года после повреждения древостоев вредителем активный процесс естественного возобновления преимущественно хвойным подростом происходит на 17% площади очага повреждения, лиственным подростом зарастает около 10% площади. Размер бывшего очага шелкопряда влияет на процесс зарастания: чем больше площадь, тем выше доля безлесных, покрытых травяно-кустарниковой растительностью участков (для крупного очага она составляет более половины площади – 66%, для мелких очагов – менее половины площади – около 45%). Возобновление наблюдается на участках, не затронутых крупными пожарами, с присутствием куртин древостоя и валежа. Частые пожары на территории бывшего шелкопряда затрудняют процесс лесовозобновления, поэтому большая часть растительности находится на начальной стадии сукцессионного цикла.

Ключевые слова: сибирский шелкопряд, темнохвойные леса, погибшие древостои, одновременные спутниковые данные, индексы SWVI и NDVI, классификация, естественное лесовозобновление.

DOI: 10.1134/S0024114819050036

Сибирский шелкопряд (*Dendrolimus sibiricus* Tschetv.) наряду с лесными пожарами является важнейшим фактором, влияющим на лесообразовательные процессы в таежных лесах Сибири и Дальнего Востока. Основным кормовым ресурсом для сибирского шелкопряда служит хвоя пих-

ты (*Abies sibirica*), кедра (*Pinus sibirica*) и лиственницы (*Larix sibirica*). После воздействия шелкопряда хвойные леса становятся очагами размножения различных стволовых вредителей, которые превращают поврежденные древостои в сухой и приводят к полной гибели деревьев. Наиболее разрушительные последствия характерны для темнохвойной тайги с преобладанием пихты и кедра. Восстановление темнохвойных

¹ Исследование выполнено в рамках темы Госзадания ЦЭПЛ РАН на 2019 г. (АААА-А18-118052400130-7).

лесов на участках бывших шелкопрядников происходит через длительно-производную смену пород, сопровождается многократными пожарами и изменением гидротермического режима и почвенных характеристик, препятствующих естественному лесовозобновлению (Фуряев, 1966; Гродницкий и др., 2002; Гродницкий, 2004; Краснощек, Бескаравайная, 2008; Керженцев, Трашеев, 2011). Наблюдение за процессами усыхания и гибели лесов в результате повреждения насекомыми-вредителями и началом восстановительной сукцессии коренного типа растительности является важным средством изучения особенностей динамики состояния лесов в таежной зоне и прогнозирования возможностей лесовосстановления.

Большой вклад в изучение динамики численности лесных насекомых и ландшафтно-экологических условий приуроченности очагов размножения вредителей внес академик Александр Сергеевич Исаев, крупнейший советский и российский лесовод-эколог. А.С. Исаев одним из первых оценил потенциальные возможности аэрокосмических методов для изучения состояния таежных лесов на обширных труднодоступных территориях Сибири. Под руководством А.С. Исаева в 80-х годах создана программа дистанционного лесоэнтомологического мониторинга, в которой лес рассматривается как сложная саморегулирующаяся система. Объектами слежения в программе мониторинга являются не отдельные виды насекомых, а экологические группы, ранжированные по степени опасности и связанные с определенными типами фитоценозов (Исаев, Кондаков, 1986). Сибирский шелкопряд относится к первой группе наиболее опасных вредителей леса, продуцирующих вспышки массового размножения, обусловленные взаимодействием целого комплекса факторов: состоянием кормового ресурса, наличием естественных врагов, климатическими и погодными особенностями, лесорастительными условиями, антропогенным воздействием на лесную экосистему и др. Особое внимание в системе мониторинга уделяется ландшафтному районированию и картографированию потенциальных очагов воздействия вредителей, площадей и степени повреждения лесов по материалам аэрокосмической съемки (Исаев и др., 1999б; Исаев, Коровин, 2003).

В результате массового размножения сибирского шелкопряда в 1994–1996 гг. на территории Красноярского края было повреждено до 1 млн га темнохвойных лесов с преобладанием пихты. В этот период под руководством академика А.С. Исаева были разработаны чрезвычайная программа биологического контроля вредителей и методика обработки космических снимков высокого пространственного разрешения с использованием ГИС-технологий, сформирован банк данных ГИС и созданы тематические карты степени поврежденности лесов (Барталев и др., 1999; Исаев

и др., 1999а). Вспышки размножения сибирского шелкопряда в этом регионе меньших масштабов были отмечены в 2011–2012 и 2015 г. (Бабой и др., 2016; Павлов и др., 2016). В 2017 г. было повреждено около 800 тыс. га Приенисейской темнохвойной тайги, включая погибшие древостои на площади 300 тыс. га (Kharuk et al., 2017).

В настоящее время ареал потенциального распространения шелкопряда расширяется, северная граница смещается на 150–300 км к северу, и, таким образом, увеличиваются возможности миграции вредителя в зону северной тайги, а также в высокогорье (Михайлов, Сумина, 2012; Kharuk et al., 2016). Климатические изменения последних десятилетий, включающие увеличение суммы положительных температур, удлинение периода вегетации, возрастание засушливости летнего и малоснежности зимнего периодов, способствуют увеличению частоты вспышек массового размножения вредителей и увеличению интенсивности повреждения лесов (Исаев и др., 1999б; Senf et al., 2017; Харук и др., 2018).

Для дистанционной оценки площадных характеристик поврежденных лесов на обширных территориях используют спутниковые данные среднего и низкого пространственного разрешения (NOAA, MODIS, SPOT-Vegetation), позволяющие за счет высокой периодичности съемки получать мультивременные композиты и оперативно выявлять крупные очаги массовых вспышек размножения вредителей и динамику их развития (Харук и др., 2001; Им и др., 2007; Ершов, Девятова, 2008; Jepsen et al., 2009; Разнообразие..., 2012; Kharuk et al., 2016). Для задач мониторинга локального уровня используют спутниковые данные высокого пространственного разрешения, в преобладающем большинстве исследований – мультиспектральные данные Landsat, которые позволяют создавать временные ряды снимков ввиду длительного периода работы группы спутников Landsat (с 1980-х годов). Достаточно надежно (с вероятностью более 90%) можно выявлять по космическим снимкам сильное и сплошное повреждение крон деревьев, приводящее к гибели древостоев. Наиболее информативны для анализа и выявления участков растительности с ухудшенным состоянием значения яркости в коротковолновом инфракрасном диапазоне электромагнитного спектра (Gao, 1996; Skakun et al., 2003; Wulder et al., 2006; Барталев и др., 2015). Широко применяются в целях дистанционной оценки повреждений лесов насекомыми-вредителями и пожарами методы преобразования мультиспектральных данных (главных компонент, Tasseled Cup) и расчета различных индексов – нормализованный вегетационный NDVI, нормированной разности влажности NDMI (или коротковолновый SWVI), отношение SWIR/NIR, RGI (отношение красного и зеленого диапазонов R/G), гарей NBR, нару-

шений DI, стресса влажности (MSI, EWDI), листовой поверхности LAI и др. (Харук и др., 2002; Wilson, Sader, 2002; White et al., 2005; Wulder et al., 2006; Franklin et al., 2008; Goodwin et al., 2008; Cohen et al., 2010; Meddens, Hicke, 2014; Lausch et al., 2016; Senf et al., 2017). Для оценки нарушений, наряду с различными индексами, используются классификаторы с обучением, такие как максимального правдоподобия, случайный лес (Random Forest), метод опорных векторов или регрессионные модели (Харук и др., 2002; Wilson, Sader, 2002; Vogelmann et al., 2009; Cohen et al., 2010; Kennedy et al., 2010; Meddens et al., 2013; Potapov et al., 2015; Senf et al., 2017).

Целью нашего исследования являлся дистанционный анализ состояния растительности на участке темнохвойных лесов Нижнего Приангарья (Красноярский край), где в 1994–1995 гг. образовался крупный очаг вспышки массового размножения сибирского шелкопряда. Локальный уровень исследования обусловил выбор спутниковых данных высокого и сверхвысокого пространственного разрешения. Данная работа базируется на методических подходах, представленных в статье В.М. Жиринина с соавторами (2016), и продолжает ряд наблюдений за динамикой растительного покрова на территории бывшего шелкопрядника с применением методов создания индексных изображений и автоматизированного дешифрирования. В статье представлены результаты исследования, включающие анализ динамики состояния нарушенных лесов на основе вегетационных индексов SWVI и NDVI за период 1989–2018 гг. и оценку процесса лесовосстановления по результатам классификации снимков Landsat с использованием отечественных снимков сверхвысокого пространственного разрешения Ресурс-П1.

ОБЪЕКТЫ И МЕТОДИКА

До вспышки сибирского шелкопряда на территории исследования площадью около 100 тыс. га в районе Нижнего Приангарья (бассейн рр. Усолка и Тасеево) произрастали темнохвойные разновозрастные и зеленомошные леса с преобладанием пихты, ели и кедра при участии сосны, лиственницы, березы и осины. В результате взаимодействия различных природных и антропогенных факторов (пожаров, интенсивных рубок и др.) для лесов характерен смешанный породный состав, доля чистых древостоев составляет не более 15%. По данным лесоустройства 1992 г. (Усольский лесхоз) смешанные древостои с преобладанием темнохвойных пород занимали около 50%, с преобладанием светлохвойных – 12%, лиственные – 38% покрытой лесом площади участка. Возрастная структура хвойных насаждений включала диапазон от 10 до 260 лет, средний возраст составлял 80–130 лет (Жирин и др., 2016).

Для дистанционной оценки состояния темнохвойной тайги использованы разновременные мультиспектральные спутниковые данные Landsat с пространственным разрешением 30 м. Различия в спектральных характеристиках между здоровой и поврежденной древесной растительностью наиболее ярко проявляются при анализе межгодовой динамики состояния древостоев до и после воздействия насекомых. Для минимизации ошибок предпочтительнее использовать спутниковые данные, полученные в одной фенологической фазе вегетационного периода, и формировать многолетние временные ряды снимков (Им и др., 2008; Goodwin et al., 2008; Разнообразие..., 2012; Meddens et al., 2013). Для нашего исследования выбраны сцены Landsat, полученные до начала вспышки размножения шелкопряда в июне 1989 г. (16.06.1989) и после воздействия вредителя в третьей декаде июня – 22.06.2000, 19.06.2002, 22.06.2006, 21.06.2014, 20.06.2017 и 23.06.2018 г. Для корректного анализа данных, полученных различными съемочными системами спутников Landsat 4, 5 и 7, предварительно проведена процедура калибровки и пересчета исходных значений спектральной яркости снимков (в условных единицах датчика) в коэффициенты отражения, учитывающие условия освещенности в момент съемки (Chander et al., 2009; Белова и др., 2011). Спутниковые данные, полученные съемочной аппаратурой Landsat 8 OLI_TIRS, могут быть предоставлены пользователям с радиометрической калибровкой и поэтому не требуют дополнительной обработки.

По разновременным данным ближнего и среднего инфракрасного диапазона съемки Landsat рассчитаны производные индексные изображения SWVI. Коротковолновый вегетационный индекс SWVI (или нормированной разности влажности NDMI) вычисляется по формуле: $SWVI = (b_{NIR} - b_{SWIR}) / (b_{NIR} + b_{SWIR})$, где b – значения отражения в ближнем (NIR в диапазоне 0.775–0.90 мкм) и среднем (SWIR в диапазоне 1.55–1.75 мкм) инфракрасных каналах съемки. Для сравнения и более детального анализа изменений растительности по данным Landsat рассчитан также нормализованный вегетационный индекс NDVI по соотношению коэффициентов отражения в красном и ближнем инфракрасном диапазонах электромагнитного спектра: $NDVI = (b_{NIR} - b_{Red}) / (b_{NIR} + b_{Red})$, где b – значения отражения в красном (RED) диапазоне 0.630–0.680 мкм и ближнем (NIR) диапазоне 0.845–0.885 мкм каналах съемки. NDVI характеризует особенности процесса фотосинтеза растительности и широко используется для оценки проективного покрытия растительного покрова и объема фитомассы.

В результате воздействия сибирского шелкопряда происходит полная или частичная дефолиация (потеря хвои) крон деревьев, которая приво-

дит к ослаблению и усыханию древостоев. Индексы, рассчитанные по соотношению яркостей в ближнем инфракрасном и коротковолновом среднем инфракрасном диапазонах (SWIR/NIR, SWVI или NDMI), как правило, более чувствительны, чем NDVI для выявления повреждений (усыхания) хвойных лесов в результате дефолиации, из-за воздействия насекомых, атмосферной или почвенной засухи (Vogelmann, 1990; Coops et al., 2006; Senf et al., 2017). Продолжительное (несколько лет) снижение значений индексов SWVI является индикатором процесса дефолиации хвойных пород деревьев. Выявление изменений коротковолнового вегетационного индекса (Δ SWVI) проведено при помощи статистического расчета разностного изображения индексов. Значение пиксела разностного изображения представляет собой разницу значений индекса для двух выбранных дат съемок. Затем вычисляется разница между значением пиксела и средним значением изображения: если разница превышает выбранный пороговый критерий, пиксел относят к классу “изменения”, если она меньше – к классу “без изменений”. Отрицательная разница Δ SWVI между 1989 и 2000 г., равная пороговому критерию 1σ (стандартному отклонению), соответствует 3 и 4 классам повреждения (сильное и сплошное повреждение крон древостоев – потеря хвои более 75%) по данным лесопатологических обследований. Наземные обследования были проведены с использованием материалов аэрофотосъемки Восточно-Сибирским лесоустроительным предприятием в период действия вспышки шелкопряда в 1995–1996 гг. (Барталев и др., 1999; Жирин и др., 2016). При небольшой степени дефолиации трудно отделить значимые спектральные изменения от естественной флуктуации, связанной с погодными, фенологическими и естественными межгодовыми изменениями (Fraser, 2005; Ершов, Девятова, 2008; Vogelmann et al. 2009; Meddens, Nicke, 2014; Lausch et al., 2016). В нашем исследовании выявление классов слабой и средней степени интенсивности повреждений крон древостоев (потеря хвои менее 50%) при помощи разностного изображения Δ SWVI не дало достоверных результатов при сравнении с данными лесопатологических обследований 1995–1996 гг.

С использованием разностного индексного изображения Δ SWVI 1989–2000 гг. создана маска лесов, погибших в результате воздействия сибирского шелкопряда. На ее основе в границах 878 таксационных выделов рассчитаны статистические показатели, включающие средние значения и стандартные отклонения индексов SWVI и NDVI. Для сравнения были отобраны 153 выдела хвойных и 157 выделов лиственных насаждений, не подвергшихся в период с 1989 по 2018 г. влиянию различных деструктивных факторов, а также таксационные выделы, отнесенные по данным лесопатологиче-

ских обследований к 3 и 4 классам повреждения, для которых также рассчитаны статистические показатели индексов SWVI и NDVI.

Для более детальной оценки состояния растительности использованы методы автоматизированного дешифрирования спутниковых данных Landsat. В качестве классификатора выбран алгоритм Random Forest, хорошо зарекомендовавший себя в ранее проведенных исследованиях для решения задач классификации лесов (Senf et al., 2017; Королева, 2018). Алгоритм основан на большом числе (ансамбле) деревьев решений, когда при построении каждого дерева используется только фиксированное число случайно отбираемых признаков обучающей выборки (Breiman, 2001). При создании обучающей выборки для снимков Landsat 1989 и 2000 г. использованы данные таксации 1992 г. и лесопатологических обследований 1995–1996 гг.

Для дистанционной оценки современного состояния растительности в бывшем очаге шелкопряда по снимкам Landsat 2017 и 2018 г. выбор эталонных участков проводился на основе разносезонных снимков сверхвысокого пространственного разрешения, полученных с отечественного спутника Ресурс-П1 аппаратурой Геотон-Л1. Материалы съемки 22 июля 2015 и 12 марта 2018 г. на территорию Нижнего Приангарья переданы Научным центром оперативного мониторинга Земли НЦ ОМЗ (подразделение АО “Российские космические системы”) и соответствуют уровню обработки 1А с радиометрической и геометрической коррекцией. Предварительная обработка снимков включала синтез зональных изображений в трех каналах съемки (G, R, NIR) и создание производного изображения с пространственным разрешением 1 м, включающего информацию панхроматического канала (паншерпинг). Поскольку наземные данные полевых обследований растительности на территории шелкопряда отсутствуют, выбор эталонов базировался на экспертной оценке результатов визуального дешифрирования снимков Ресурс-П1. Обучающие выборки оценивались по степени однородности эталонов методами сегментации изображений, реализованными в программе ERDAS (алгоритм FLS-сегментации). Для классификации снимков Landsat алгоритмом Random Forest использованы наиболее информативные спектральные диапазоны – красный (R), ближний (NIR) и средний инфракрасный (SWIR). Достоверность результатов классификации оценивалась по контрольной выборке на основе матрицы перепутывания (или матрицы ошибок классификации). На основе матрицы ошибок рассчитывался коэффициент каппа Коэна – показатель общей достоверности классификации, вносящий поправку на случайность полученных результатов и оценивающий оба типа ошибок (число пикселей, ошибочно от-

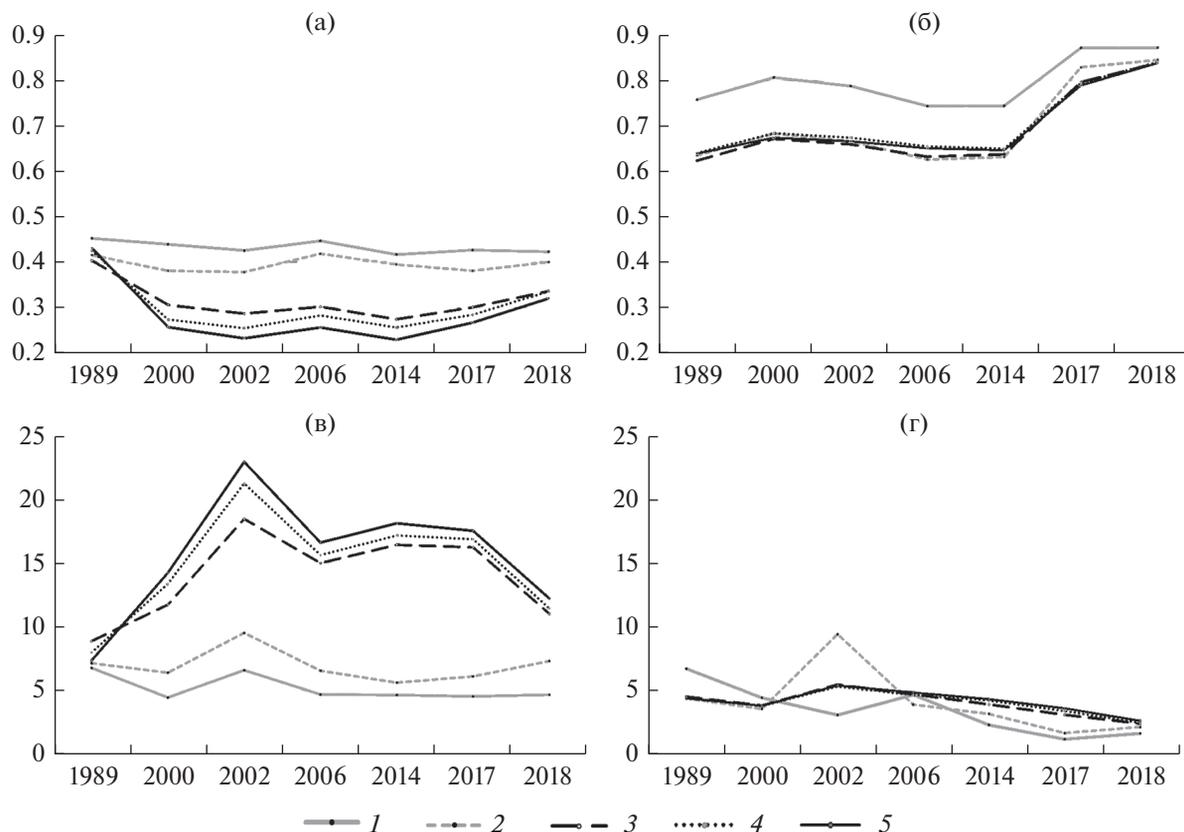


Рис. 1. Средние значения индексов SWVI (а) и NDVI (б) и коэффициенты вариации для SWVI (в) и NDVI (г).

1 – неповрежденные лиственные; 2 – неповрежденные хвойные; 3 – сильно поврежденные древостои (3 класс); 4 – сплошное повреждение древостоев (4 класс); 5 – погибшие древостои.

несенных к определенному классу, и число пикселей, ошибочно не попавших в этот класс). Классификация проведена программными средствами свободно распространяемого пакета Rstudio.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Графическое представление динамики состояния погибших и сильно поврежденных темнохвойных лесов Приангарья на основе статистических показателей индексов SWVI и NDVI, включающих средние значения и коэффициенты вариации, приведены на рис. 1.

В 1989 г. средние значения индекса SWVI практически одинаковы для всех классов и составляют 0.4–0.42. К 2000 г. как результат дефолиации крон деревьев в период вспышки массового размножения сибирского шелкопряда в 1994–1995 гг. значения индекса SWVI классов погибших и сильно поврежденных древостоев резко снижаются – до 0.25–0.3. До 2014 г. значения SWVI остаются примерно на одном уровне, не превышая 0.3. Затем начинается постепенный рост значений индекса, и к 2018 г. они становятся более 0.3. Для лесов, не подвергшихся воздей-

ствию вредителя, значения SWVI практически не меняются в течение всего периода наблюдений, не выходя за пределы средних значений индекса 0.37–0.42. Коэффициенты вариации характеризуются противоположной тенденцией – средние значения для поврежденных и погибших лесов резко возрастают с 7% в 1989 г. до 23% в 2000 г. и остаются на довольно высоком уровне в 17%. Коэффициенты вариации индекса SWVI здоровых лесов изменяются незначительно и не превышают 7–9%. Коэффициент вариации, как известно, служит для оценки однородности выборки и позволяет сравнивать между собой вариацию различных признаков. Выборки индексов SWVI для всех классов, средние значения которых представлены на графиках, однородны. Однако можно отметить в качестве отличительной черты, что для класса погибших лесов коэффициент вариации SWVI отличается наиболее высокой степенью рассеивания данных. На графиках средних значений SWVI хорошо заметен одинаковый тренд изменений для поврежденных (3 и 4 классы) и погибших насаждений. Самые низкие значения индекса принадлежат классу “погибшие”, который был образован на основе разностного

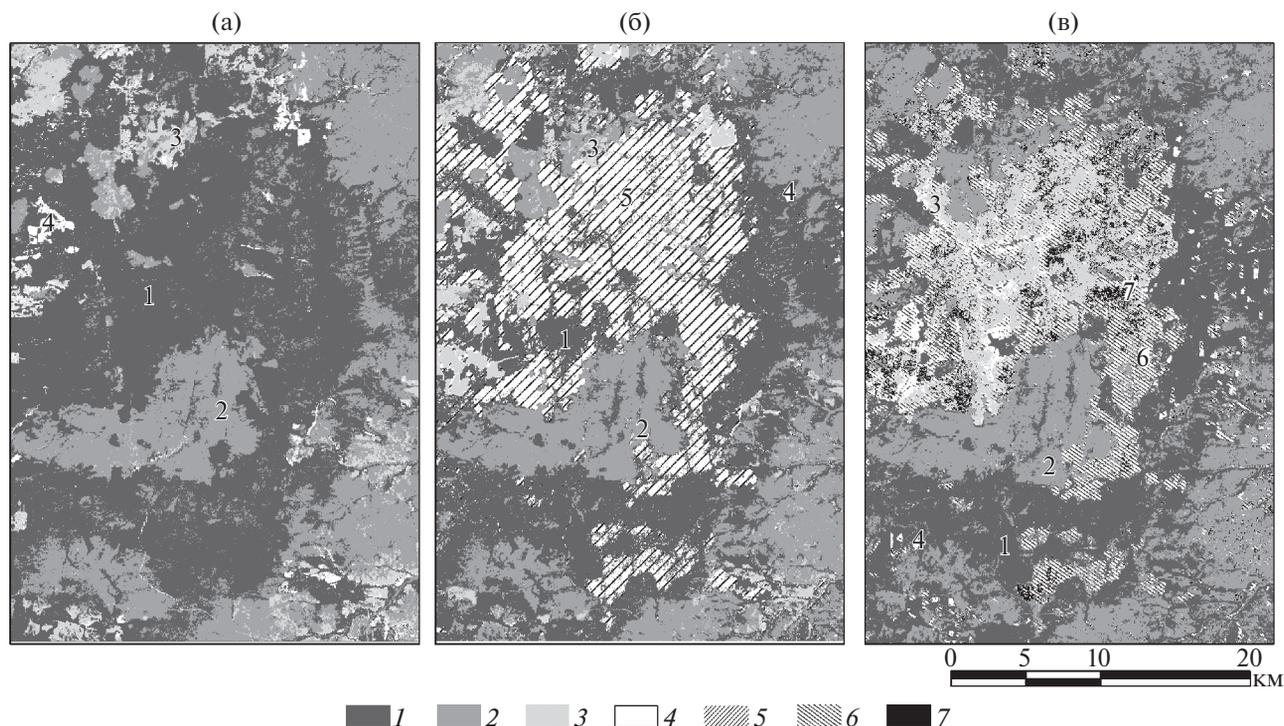


Рис. 2. Результаты классификации разновременных снимков Landsat: а – 1989, б – 2000, в – 2017.

1 – темнохвойные породы; 2 – лиственные породы; 3 – травяно-кустарниковая растительность; 4 – открытая почва; 5 – поврежденные и погибшие древостои; 6 – хвойный подрост; 7 – лиственный подрост и кустарники.

изображения $\Delta SWVI$ 1989–2000 гг. Таким образом, можно констатировать, что класс “погибшие”, выделенный по дистанционным данным, более корректно отображает границы очага повреждения, чем 4 класс “сплошное повреждение”, выявленный в результате лесопатологических обследований.

Средние значения индекса NDVI для всех классов поврежденных и неповрежденных хвойных древостоев очень близки и отличаются одинаковой динамикой. Они меняются в диапазоне 0.63–0.68 с 1989 по 2014 г. В погибших древостоях из-за потери хвои и вывала деревьев происходит осветление древесного полога, увеличение освещенности приводит к интенсивному развитию травяно-кустарникового покрова и подлеска, что отражается в увеличении значений индекса через 4–5 лет после дефолиации крон деревьев (Жиринов и др., 2016). Значения NDVI для лиственных древостоев выше на протяжении всего периода наблюдений и изменяются от 0.75 до 0.81. Начиная с 2014 г. происходит резкий рост средних значений NDVI для всех классов и к 2018 г. они превышают 0.83. Коэффициенты вариации NDVI для всех классов отличаются малой вариабельностью, не превышают 10% и к 2018 г. уменьшаются до 5%. Разница между значениями индексов SWVI и NDVI неповрежденных и погибших древостоев к 2018 г. сокращается, что может свидетельствовать

об интенсивном зарастании территории шелкопряда травяно-кустарниковой и древесной растительностью.

На основе разностных изображений $\Delta SWVI$ при помощи программных средств ArcGIS рассчитаны площади нарушенных лесов на исследуемом участке. В 2000 г. площадь лесов, погибших под воздействием сибирского шелкопряда и стволовых вредителей, составила около 19.2 тыс. га. После двух крупных пожаров в 2004 г. (~25 тыс. га) и 2011 г. (~27 тыс. га) и меньших по площади пожаров 2014 г. (~7.5 тыс. га) и 2016 г. (~1.5 тыс. га) не покрытая лесом площадь увеличилась к 2017 г. до 20.4 тыс. га. Сведения о пожарах получены через геопортал информационной системы дистанционного мониторинга лесных пожаров Федерального агентства лесного хозяйства (ИСДМ-Рослесхоз).

Для более детальной дистанционной оценки состояния растительности проведена классификация снимков Landsat (16.06.1989, 22.06.2000, 20.06.2017, 23.06.2018) на основе алгоритма с обучением Random Forest. Изображения результатов классификации разновременных снимков представлены на рис. 2.

Для снимка Landsat (16.06.1989) созданы обучающая и контрольная выборки, насчитывающие 83 эталона (8530 пикселей), по которым выделено

4 класса: темнохвойный лес, лиственный лес, травяно-кустарниковая растительность, открытая почва (рис. 2а). Достоверность классификации высокая – общий показатель каппа равен 0.98. Для классификации снимка Landsat (22.06.2000), полученного через 6 лет после начала массовой вспышки размножения шелкопряда, создан 121 эталон (10020 пикселей), на основе которых с общей достоверностью 0.9 выделено 5 классов: сильно поврежденные и погибшие древостои, темнохвойный лес, лиственный лес, травяно-кустарниковая растительность, открытая почва. Исходя из пространственных признаков, предложенных в работах А.С. Исаева (Исаев, Сухих, 1986; Аэрокосмический..., 1991), повреждения пихтовых насаждений относятся к концентрированным сплошным. Очаг представлен крупными участками обесхвоенного леса (площадью более 1000 га), небольшими куртинами сохранившегося древостоя, часто протянувшимися узкими полосами вдоль рек, и участками леса с переходными стадиями от сильно поврежденных и ослабленных к здоровым насаждениям. Усыхающие, потерявшие хвою деревья за период, прошедший с момента активизации шелкопряда, становятся очагом развития вспышки массового размножения стволовых вредителей, преимущественно черного пихтового усача (Исаев и др., 1988; Михайлов, Сумина, 2012). На рис. 2б хорошо заметна пространственная структура участков сухостойных древостоев – один крупный очаг действия вредителей и несколько окружающих его более мелких очагов.

Через 4–5 лет после образования очага размножения шелкопряда начинается вывал усохших деревьев, и по мере накопления горючего материала возникают периодические пожары разной интенсивности. На рис. 3 представлены контуры самого большого пожара на исследуемой территории, произошедшего в мае 2011 г. и охватившего практически полностью бывший крупный очаг шелкопряда. Частые пожары нарушают естественный ход лесовозобновления, так как приводят к уничтожению наряду с сухостойными деревьями подрост хвойных и лиственных пород.

По данным Landsat 2017 и 2018 г. на основе 125 эталонов (8200 пикселей) выделено 6 классов: темнохвойный лес, лиственный лес, преимущественно хвойный подрост (участки возобновления), лиственный подрост и кустарники, травяно-кустарниковая растительность, открытая почва. Эталоны для классов возобновления выбирались по летнему (22.07.2015) и весеннему (12.03.2018) снимкам Ресурс–П1 (Геотон–Л1) с пространственным разрешением 1 м на основе визуального дешифрирования снимков. Общая достоверность классификаций алгоритмом Random Forest достаточно высокая – индекс каппа равен 0.9 и 0.93. Класс “возобновление с преобладанием хвойных” распознается с вероятностью 84.2%

(2017 г.) и 79% (2018 г.), класс “лиственное возобновление и кустарники” – 77.6% и 81.7%, соответственно. Классы возобновления наиболее часто перепутываются с классом “травяно-кустарниковая растительность” и частично с лиственными древостоями (особенно это характерно для класса лиственного возобновления).

В границах шелкопряда (2000 г.) рассчитаны относительные площади типов растительности по результатам классификаций 2017 и 2018 г. Варьирование площадных характеристик в 2017 и 2018 г. отличалось для разных классов – от 2% для классов темнохвойных древостоев и преимущественно хвойного возобновления до 5–7% – лиственного возобновления и травяно-кустарниковой растительности. Поскольку практически никаких изменений на территории шелкопряда за год не зафиксировано (пожары отсутствовали), значения площадей были усреднены по двум годам (рис. 4а). Размер очага шелкопряда достаточно сильно влияет на скорость зарастания (Харук и др., 2002). Слабая регенерационная способность пихты, последующее заболачивание и интенсивные процессы задернения территории, отсутствие почвенного запаса семян пихты и малая дальность распространения семян от здоровых деревьев способствуют увеличению длительности естественного хода лесовосстановления. Поэтому для более детального анализа площади классов были рассчитаны отдельно для бывшего крупного очага шелкопряда и нескольких гораздо более мелких очагов (рис. 4б и в). Для крупного очага общей площадью около 14.6 тыс. га (77% от площади повреждений в 2000 г.) смешанное с преобладанием хвойных возобновление отмечено на 15% территории, что значительно меньше доли хвойного возобновления в мелких очагах (27%). Для небольших участков повреждений характерны более высокие доли лиственных древостоев и меньшие доли травяно-кустарниковой растительности (около 45%), что свидетельствует о более интенсивном процессе зарастания по сравнению с крупным очагом, где участки без древесной растительности занимают около 66% площади. Участки с преимущественно хвойным возобновлением расположены по границе шелкопряда, около оставшихся небольших куртин пихтовых деревьев и в вытянутой узкой юго-восточной части бывшего очага, которая не была затронута пожарами (рис. 3). Визуальный анализ весенних снимков Ресурс–П1 со сплошным снежным покровом территории позволяет отчетливо различать на фоне снега поваленные стволы деревьев на участках с присутствием подрост и древостоев и отсутствие валежа на открытых пространствах, который, по-видимому, был уничтожен огнем. Частые пожары препятствуют лесовозобновлению, а существенная площадь территории бывшего очага шелкопряда, составляющая около

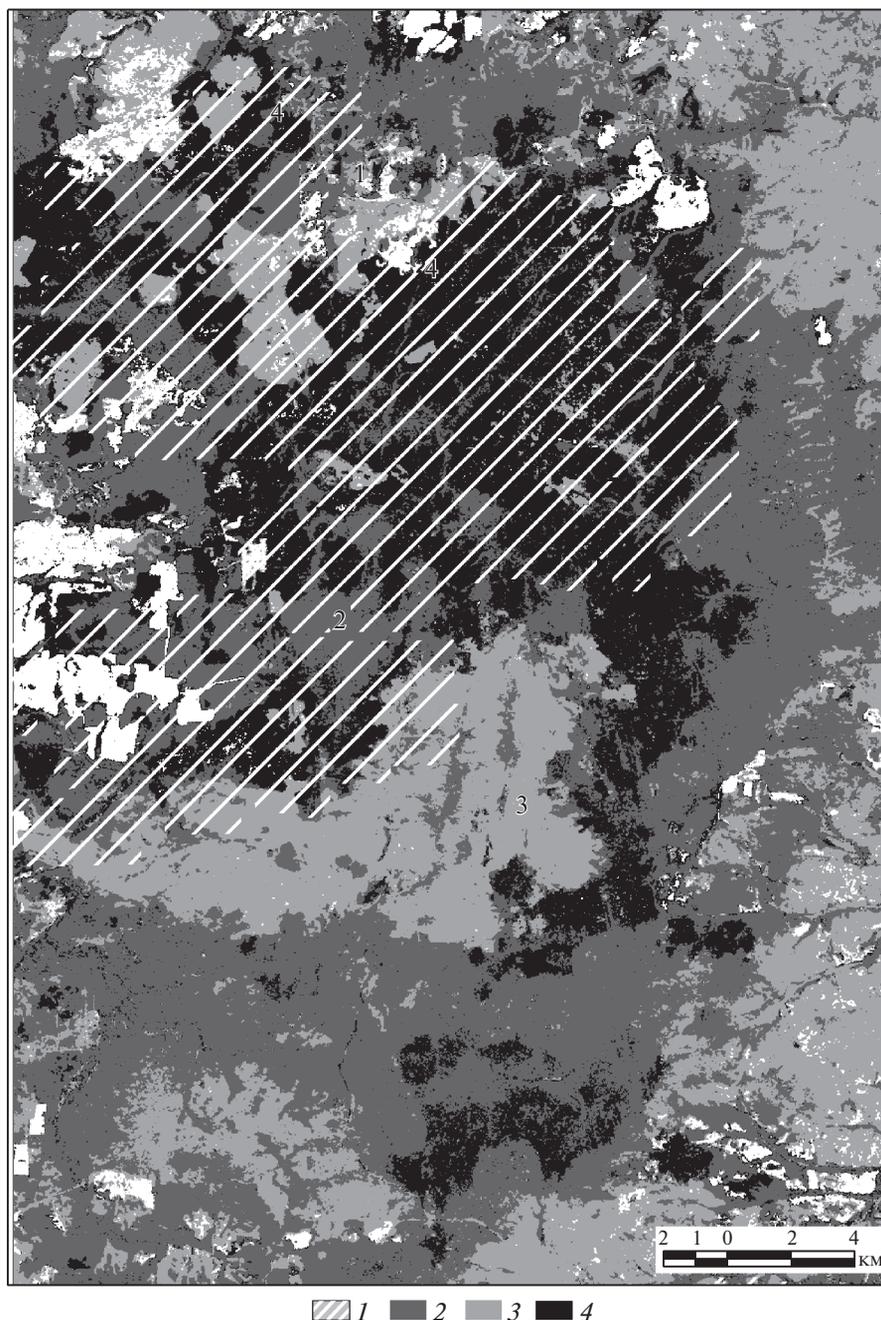


Рис. 3. Классификация снимка Landsat 2000 г.

1 – участки пожара; 2 – темнохвойные породы; 3 – лиственные породы; 4 – поврежденные древостои.

15 тыс. га, является дополнительным лимитирующим фактором восстановления в перспективе ближайших 50 лет сомкнутой лесной растительности на месте массовой гибели пихтовых насаждений.

Заключение. В результате дистанционной оценки, основанной на анализе временных рядов летних индексов SWVI и NDVI, получены тренды, характеризующие многолетние изменения

растительного покрова на территории бывшего очага сибирского шелкопряда. Для погибших и сильно поврежденных древостоев (дефолиации крон более 75%) характерно резкое снижение средних значений и увеличение коэффициентов вариации индекса SWVI. Применение разностного изображения индексов SWVI с пороговым критерием, равным стандартному отклонению, обеспечило более детальное выделение участков по-

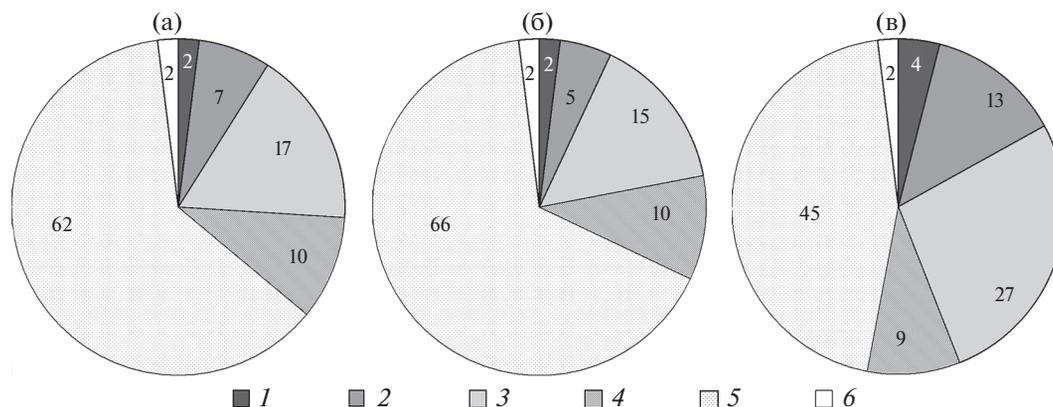


Рис. 4. Диаграммы относительных площадей основных классов по результатам автоматизированного дешифрирования снимков за 2017 и 2018 гг.

а – вся территория шелкопряда, б – крупный очаг, в – небольшие очаги; 1 – темнохвойные породы; 2 – лиственные породы; 3 – травяно-кустарниковая растительность; 4 – открытая почва; 5 – лиственный подрост и кустарники; 6 – хвойный подрост.

гибших и сильно поврежденных древостоев по сравнению с данными наземных обследований. Изменение средних значений летнего индекса NDVI для темнохвойных лесов через 4–5 лет после дефолиации выражено незначительно и не может служить индикатором усыхающих и погибших древостоев. Частые пожары на территории шелкопряда затрудняют процесс лесовозобновления, однако одновременное увеличение значений двух индексов после 2014 г., сопровождающееся снижением коэффициентов вариации, указывает на интенсивное зарастание бывшего очага шелкопряда травяно-кустарниковой и древесной растительностью. Эту тенденцию подтверждают результаты классификации снимков Landsat 2017 и 2018 г., на основе которых проведена оценка площадных характеристик основных типов растительности в границах очага сибирского шелкопряда. Использование для автоматизированного дешифрирования и верификации космических снимков сверхвысокого разрешения позволило достоверно распознать классы преимущественно хвойного или лиственного возобновления. Через 23 года после повреждения древостоев вредителем на исследуемой территории активный процесс естественного возобновления преимущественно хвойным подростом происходит на 17% площади очагов повреждения, лиственным подростом зарастает около 10% площади. Интенсивность процесса лесовозобновления выше на небольших участках повреждения по сравнению с крупным очагом. Возобновление наблюдается на участках, не затронутых пожарами, с присутствием куртин древостоя и валежом. Около 62% площади шелкопряда покрыто травяно-кустарниковой растительностью без видимых признаков лесовозобновления.

Локальная оценка состояния растительности по космическим снимкам Landsat дает общее представление о динамике процесса естественного лесовозобновления на территории бывшего очага шелкопряда и обеспечивает пространственную основу для оптимизации планирования наземных обследований растительности. Более детальная дистанционная оценка с количественными характеристиками лесовозобновления возможна на основе снимков сверхвысокого пространственного разрешения, позволяющего выделять отдельные деревья (группы деревьев) и оценивать качество хвойного и лиственного подростка.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

Аэрокосмический мониторинг лесов / Под ред. А.С. Исаева, В.И. Сухих. М.: Наука, 1991. 241 с.

Бабой С.Д., Астапенко С.А., Голубев Д.В., Ягунов М.Н. Оценка распространения и воздействия на лесной покров насекомых вредителей в лесах Красноярского края, на примере шелкопряда сибирского // Мониторинг, моделирование и прогнозирование опасных природных явлений и чрезвычайных ситуаций: Сб. статей по матер. VI Всерос. науч.-практич. конф. (Железногорск, 27 мая 2016 г.). Железногорск: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования “Сибирская пожарно-спасательная академия” Государственной противопожарной службы Министерства Российской Федерации по делам гражданской обороны, чрезвычайным ситуациям и ликвидации стихийных бедствий”, 2016. С. 37–40.

Барталев С.А., Еришов Д.В., Исаев А.С. Оценка дефолиации лесов по многоспектральным спутниковым изображениям методом декомпозиции спектральных смесей // Исследование Земли из космоса. 1999. № 4. С. 78–86.

- Барталев С.А., Стыценко Ф.В., Егоров В.А., Лупян Е.А.* Спутниковая оценка гибели лесов России от пожаров // Лесоведение. 2015. № 2. С. 83–94.
- Белова Е.И., Еришов Д.В.* Предварительная обработка временных серий изображений Landsat-TM/ETM+ при создании безоблачных композитных изображений местности // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2011. Т. 8. № 1. С. 73–82.
- Гродницкий Д.Л.* Сибирский шелкопряд и судьба пихтовой тайги // Природа. 2004. № 11 (1071). С. 49–56.
- Гродницкий Д.Л., Разнобарский В.Г., Ремарчук Н.П., Солдатов В.В.* Деградация древостоев в таежных шелкопрядниках // Сибирский экологический журн. 2002. Т. 9. № 1. С. 3–11.
- Еришов Д.В., Девятова Н.В.* Применение данных спутниковой съемки при мониторинге массового размножения сибирского шелкопряда // Известия высших учебных заведений. Геодезия и Аэрофотосъемка. 2008. № 2. С. 161–167.
- Жирин В.М., Князева С.В., Эйдлина С.П.* Многолетняя динамика вегетационных индексов темнохвойных лесов после повреждения сибирским шелкопрядом // Лесоведение. 2016. № 1. С. 3–14.
- Им С.Т., Федотова Е.В., Харук В.И.* Анализ очагов повреждения таежных лесов сибирским шелкопрядом по данным мелкомасштабной космосъемки // Вычислительные технологии. 2007. Т. 12. № S2. Вып. 1. С. 60–69.
- Им С.Т., Федотова Е.В., Харук В.И.* Спектрорадиометрическая космосъемка в анализе зоны вспышки массового размножения сибирского шелкопряда // Журн. Сибирского федерального университета. Серия: Техника и технологии. 2008. Т. 1. № 4. С. 346–358.
- Исаев А.С., Киселев В.В., Калашиников Е.Н., Плешиков Ф.И., Черкашин В.П.* Геоинформационные системы в прогнозировании и контроле массового размножения лесных насекомых // Лесоведение. 1999а. № 5. С. 15–23.
- Исаев А.С., Кондаков Ю.П.* Принципы и методы лесо-энтомологического мониторинга // Лесоведение. 1986. № 4. С. 3–9.
- Исаев А.С., Коровин Г.Н.* Крупномасштабные изменения в бореальных лесах Евразии и методы их оценки с использованием космической информации // Лесоведение. 2003. № 2. С. 3–9.
- Исаев А.С., Овчинникова Т.М., Пальникова Е.Н., Суховольский В.Г., Тарасова О.В.* Оценка характера взаимодействий “лес–насекомые” в лесах бореальной зоны в ходе возможных климатических изменений // Лесоведение. 1999б. № 6. С. 39–44.
- Исаев А.С., Рожков А.С., Киселев В.В.* Черный пихтовый усач. Новосибирск: Наука, 1988. 270 с.
- Исаев А.С., Сухих В.И.* Аэрокосмический мониторинг лесных ресурсов // Лесоведение. 1986. № 6. С. 11–21.
- Керженцев А.С., Трапеев Р.В.* “Двойная карусель” сукцессионного процесса в региональной экосистеме // Экология. 2011. № 6. С. 409–416.
- Королева Н.В., Тихонова Е.В., Еришов Д.В., Салтыков А.Н., Гаврилюк Е.А., Пугачевский А.В.* Оценка масштабов зарастания нелесных земель в национальном парке “Смоленское Поозерье” за 25 лет по спутниковым данным Landsat // Лесоведение. 2018. № 2. С. 83–96.
- Краснощечков Ю.Н., Безкорвайная И.Н.* Функционирование почв в очагах размножения сибирского шелкопряда в южной тайге Средней Сибири // Известия Российской академии наук. Серия биологическая. 2008. № 1. С. 84–93.
- Михайлов Ю.З., Сумина Н.Ю.* Сибирский шелкопряд *Dendrolimus superans* (Butler, 1877) и борьба с ним в Иркутской области // Байкальский зоологический журнал. 2012. № 3 (11). С. 25–29.
- Павлов И.Н., Литовка Ю.А., Астапенко С.А.* Роль энтомопатогенных грибов и бактерий в динамике численности сибирского шелкопряда // Матер. междунар. конф. “IX Чтения памяти О.А. Катаева. Дендробиотные беспозвоночные животные и грибы и их роль в лесных экосистемах”. (Санкт-Петербург, 23–25 ноября 2016 г.). Санкт-Петербург: Изд-во СПбГЛТУ, 2016. С. 76–77.
- Разнообразие и динамика лесных экосистем России: В 2-х кн. // Под ред. А.С. Исаева М.: Товарищество научных изданий КМК, 2012. Кн. 1. 461 с.
- Фуряев В.В.* Шелкопрядники тайги и их выжигание. М.: Наука, 1966. 92 с.
- Харук В.И., Им С.Т., Ягунов М.Н.* Миграция северной границы распространения сибирского шелкопряда // Сибирский экологический журнал. 2018. Т. 25. № 1. С. 32–44.
- Харук В.И., Кожуховская А.Г., Пестунов И.А., Рансон К.Дж., Цибульский Г.М.* Съемка NOAA/AVHRR в мониторинге вспышек сибирского шелкопряда // Исследование Земли из космоса. 2001. № 1. С. 80–86.
- Харук В.И., Рансон К.Дж., Кузьмичев В.В., Буренина Т.А., Тихомиров А.Ю., Им С.Т.* Съемка “Landsat” в анализе шелкопрядников Южной Сибири // Исследование Земли из космоса. 2002. № 4. С. 79–90.
- Breiman L.* Random forests // Machine Learning. 2001. V. 45 (1). P. 5–32.
- Chander G., Markham B.L., Helder D.L.* Summary of current radiometric calibration coefficients for Landsat MSS, TM, ETM+, and EO-1 ALI sensors // Remote Sensing of Environment. 2009. V. 113. № 5. P. 893–903.
- Cohen W.B., Yang Z., Kennedy R.* Detecting trends in forest disturbance and recovery using yearly Landsat time series: 2: TimeSync—tools for calibration and validation // Remote Sensing of Environment. 2010. V. 114. № 12. P. 2911–2924.
- Coops N.C., Johnson M., Wulder M.A., White J.C.* Assessment of QuickBird high spatial resolution imagery to detect red attack damage due to mountain pine beetle infestation // Remote Sensing of Environment. 2006. V. 103. № 1. P. 67–80.
- Franklin S.E., Fan H., Guo X.* Relationship between Landsat TM and SPOT vegetation indices and cumulative spruce budworm defoliation // International Journal of Remote Sensing. 2008. V. 29. № 4. P. 1215–1220.
- Fraser R.H., Latifovic R.* Mapping insect-induced tree defoliation and mortality using coarse spatial resolution satellite imagery // International Journal of Remote Sensing. 2005. V. 26. № 1. P. 193–200.
- Gao B.C.* NDWI – A normalized difference water index for remote sensing of vegetation liquid water from space // Remote Sensing of Environment. 1996. V. 58. № 3. P. 257–266.
- Goodwin N.R., Coops N.C., Wulder M.A., Gillanders S., Schroeder T.A., Nelson T.* Estimation of insect infestation dy-

- namics using a temporal sequence of Landsat data // *Remote Sensing of Environment*. 2008. V. 112. № 9. P. 3680–3689.
- Jepsen J.U., Hagen S.B., Høgda K.A., Ims R.A., Karlsen 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 Environment*. 2009. V. 113. № 9. P. 1939–1947.
- Kennedy R.E., Yang Z.G., Cohen W.B. Detecting trends in forest disturbance and recovery using yearly Landsat time series: 1. LandTrendr – Temporal segmentation algorithms // *Remote Sensing of Environment*. 2010. V. 114. № 9. P. 2897–2910.
- Kharuk V.I., Im S.T., Ranson K.J., Yagunov M.N. Climate-Induced Northerly Expansion of Siberian Silkmoth Range // *Forests*. 2017. V. 8. № 8. P. 301.
- 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 // *Contemporary Problems of Ecology*. 2016. V. 9. № 6. P. 711–720.
- Lausch A., Erasmi S., King D., Magdon P., Heurich M. Understanding forest health with remote sensing – Part I – A review of spectral traits, processes and remote-sensing characteristics // *Remote Sensing of Environment*. 2016. V. 8. P. 1029.
- Meddens A.J.H., Hicke J.A., Vierling L.A., Hudak A.T. Evaluating methods to detect bark beetle-caused tree mortality using single-date and multi-date Landsat imagery // *Remote Sensing of Environment*. 2013. № 132. P. 49–58.
- Meddens A.J.H., Hicke J.A. Spatial and temporal patterns of Landsat-based detection of tree mortality caused by a mountain pine beetle outbreak in Colorado, USA // *Forest Ecology & Management*. 2014. № 322. P. 78–88.
- Potapov P.V., Turubanov S.A., Tyukavina A., Krylov A.M., McCarty J.L., Radeloff V.C., Hansen M.C. Eastern Europe's forest cover dynamics from 1985 to 2012 quantified from the full Landsat archive // *Remote Sensing of Environment*. 2015. V. 159. P. 28–43.
- Senf C., Seidl R., Hostert P. Remote sensing of forest insect disturbances: Current state and future directions // *International J. Applied Earth Observation and Geoinformation*. 2017. V. 60. P. 49–60.
- Skakun R.S., Wulder M.A., Franklin S.E. Sensitivity of the thematic mapper enhanced wetness difference index to detect mountain pine beetle red-attack damage // *Remote Sensing of Environment*. 2003. V. 86. № 4. P. 433–443.
- Vogelmann J.E. Comparison between two vegetation indices for measuring different types of forest damage in the north-eastern United States // *International J. Remote Sensing*. 1990. V. 11. № 12. P. 2281–2297.
- Vogelmann J.E., Tolk B., Zhu Z. Monitoring forest changes in the southwestern United States using multitemporal Landsat data // *Remote Sensing of Environment*. 2009. V. 113. № 8. P. 1739–1748.
- White J.C., Wulder M.A., Brooks D., Reich R., Wheate R.D. Detection of red attack stage mountain pine beetle infestation with high spatial resolution satellite imagery // *Remote Sensing of Environment*. 2005. V. 96. № 3–4. P. 340–351.
- Wilson E.H., Sader S.A. Detection of forest harvest type using multiple dates of Landsat TM imagery. *Remote Sensing of Environment*. 2002. V. 80. № 3. P. 385–396.
- Wulder M.A., White J.C., Bentz B., Alvarez M.F., Coops N.C. Estimating the probability of mountain pine beetle red-attack damage // *Remote Sensing of Environment*. 2006. V. 101. № 2. P. 150–166.

Health of Vegetation in Area of Mass Outbreaks of Siberian Moth: A Satellite-Based Estimate

S. V. Knyazeva^{1,*}, N. V. Koroleva¹, S. P. Eidlina¹, and E. N. Sochilova¹

¹Center for Forest Ecology and Productivity of the Russian Academy of Sciences,
Profsoyuznaya st. 84/32 bldg. 14, Moscow, 117997 Russia

*E-mail: knsvelt@gmail.com

Received 26 February 2019

Edited 6 May 2019

Accepted 5 June 2019

Health and dynamics of disturbed vegetation were studied on space images of high and ultra-high spatial resolution. Site of dark coniferous forests in Lower Angara Region (Krasnoyarsk Krai) within the center of formed in 1994–1995 mass outbreak of the Siberian moth was studied. Retrieved trends of SWVI (NDMI) and NDVI indices describe the long-term changes in vegetation during 2000–2018. SWVI was the most informative indicator, having strongly decreased average and higher coefficient of variation of values in dead and severely damaged stands with defoliation of crowns over 75%. Based on the image differencing results for the indices (Δ SWVI) the area of dead stands was calculated with the threshold criterion 1σ (standard deviation). In 2000 the area of forests destroyed by the Siberian moth was about 19200 ha. After two major fires in 2004 and 2011, and as a result of destructive factors combination, the area of dead forests increased up to 20400 ha by 2017–2018. Reforestation within the boundaries of dead stands was estimated from classification of Landsat images (20.06.2017, 23.06.2018) by Random Forest algorithm using the selection of templates from detailed images Resurs-P with a spatial resolution of 1 m (Geoton-L1 – 22.07.2015 and 12.03.2018), taken during different seasons. The classification proved to be highly reliable (Kappa index is more than 0.9). Areas of classified deciduous and coniferous stands, deciduous and mixed stands with mainly coniferous regrowth, grass-shrub vegetation and barren soil were calculated. Natural regeneration of mainly coniferous undergrowth occurred on 17% of the damaged area, and deciduous regrowth occurred on about 10% of the

area 23 years after damage by pests. Areas damaged by moth affected reforestation: the larger the area of the outbreak, the higher the share of open lands with grass and shrub vegetation. They occupied 66% of the large outbreak, and about 45% of the smaller one. Regrowth was found in proximity of patches of stands and deadwood on sites unaffected by large fires. Frequent fires on the territory of moth infestation limit the process of reforestation. Therefore, most of the vegetation was at the initial stage of the succession cycle.

Keywords: siberian moth, dark coniferous forests, dead stands, multi-temporal space data, SWVI and NDVI indices, classification, natural reforestation.

Acknowledgements: The study was carried out in the framework of the State Assignment to CEPF RAS of 2019 (project AAAA-A18-118052400130-7).

REFERENCES

- Baboi S.D., Astapenko S.A., Golubev D.V., Yagunov M.N., Otsenka rasprostraneniya i vozdeistviya na lesnoi pokrov nasekomykh vreditelei v lesakh Krasnoyarskogo kraja, na primere shelkopryada sibirskogo (Assessment of distribution and effects on forests cover of pest insects: case study of Siberian moth in forests of Krasnoyarsk kraj), *Monitoring, modelirovanie i prognozirovanie opasnykh prirodnykh yavlenii i chrezvychaynykh situatsii (Monitoring, modelling and prediction of hazardous natural phenomena and emergency situations)*, Zheleznogorsk, 27 May 2016, Zheleznogorsk: Izd-vo SibPSA GPS MChS Rossii, 2016, pp. 37–40.
- Bartalev S.A., Ershov D.V., Isaev A.S., Otsenka defoliatsii lesov po mnogospektral'nym sputnikovym izobrazheniyam metodom dekompozitsii spektral'nykh smesei (Spectral decomposition-based assessment of forest defoliation from multispectral satellite images), *Issledovanie Zemli iz kosmosa*, 1999, No. 4, pp. 78–86.
- Bartalev S.A., Stytsenko F.V., Egorov V.A., Loupian E.A., Sputnikovaya otsenka gibeli lesov Rossii ot pozharov (Satellite-based assessment of Russian forest fire mortality), *Lesovedenie*, 2015, No. 2, pp. 83–94.
- Belova E.I., Ershov D.V., Predvaritel'naya obrabotka vremennykh serii izobrazhenii Landsat-TM/ETM+ pri sozdanii bezoblachnykh kompozitnykh izobrazhenii mestnosti (Preprocessing Landsat TM/ETM+ data sets for creating cloud-free composite imagery), *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*, 2011, Vol. 8, No. 1, pp. 73–82.
- Breiman L., Random forests, *Machine learning*, 2001, Vol. 45, No. 1, pp. 5–32.
- Chander G., Markham B.L., Helder D.L., Summary of current radiometric calibration coefficients for Landsat MSS, TM, ETM+, and EO-1 ALI sensors, *Remote Sensing of Environment*, 2009, Vol. 113, No. 5, pp. 893–903.
- Cohen W.B., Yang Z., Kennedy R., Detecting trends in forest disturbance and recovery using yearly Landsat time series: 2. TimeSync—Tools for calibration and validation, *Remote Sensing of Environment*, 2010, Vol. 114, No. 12, pp. 2911–2924.
- Coops N.C., Johnson M., Wulder M.A., White J.C., Assessment of QuickBird high spatial resolution imagery to detect red attack damage due to mountain pine beetle infestation, *Remote Sensing of Environment*, 2006, Vol. 103, No. 1, pp. 67–80.
- Ershov D.V., Devyatova N.V., Primenenie dannykh sputnikovoi s'emki pri monitoringe massovogo razmnozheniya sibirskogo shelkopryada (Application of satellite survey data to monitor mass outbreaks of Siberian moth), *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Geodeziya i aerofotos'emka*, 2008, No. 2, pp. 161–167.
- Franklin S., Fan H., Guo X., Relationship between Landsat TM and SPOT vegetation indices and cumulative spruce budworm defoliation, *International Journal of Remote Sensing*, 2008, Vol. 29, No. 4, pp. 1215–1220.
- Fraser R., Latifovic R., Mapping insect-induced tree defoliation and mortality using coarse spatial resolution satellite imagery, *International Journal of Remote Sensing*, 2005, Vol. 26, No. 1, pp. 193–200.
- Furyaev V.V., *Shelkopryadniki taigi i ikh vyzhiganie* (Burning out the centers of moth outbreaks), Moscow: Nauka, 1966, 92 p.
- Gao B.-C., NDWI - A normalized difference water index for remote sensing of vegetation liquid water from space, *Remote Sensing of Environment*, 1996, Vol. 58, No. 3, pp. 257–266.
- Goodwin N.R., Coops N.C., Wulder M.A., Gillanders S., Schroeder T.A., Nelson T., Estimation of insect infestation dynamics using a temporal sequence of Landsat data, *Remote Sensing of Environment*, 2008, Vol. 112, No. 9, pp. 3680–3689.
- Grodnitskii D.L., Raznobarskii V.G., Remarchuk N.P., Soldatov V.V., Degradatsiya drevostoev v taezhnykh shelkopryadnikakh (Decline of the stands in centers of mass outbreak of moths), *Sibirskii ekologicheskii zhurnal*, 2002, Vol. 9, No. 1, pp. 3–11.
- Grodnitsky D.L., Sibirskii shelkopryad i sud'ba pikhtovoi taigi (Siberian moth and destiny of fir taiga), *Priroda*, 2004, No. 11 (1071), pp. 49–56.
- Im S.T., Fedotova E.V., Kharuk V.I., Analiz ochagov povrezhdeniya taezhnykh lesov sibirskim shelkopryadom po dannym melkomasshtabnoi kosmos'emki (Analysis of the centers disturbed by siberian moth in taiga with low-resolution satellite imagery), *Vychislitel'nye tekhnologii*, 2007, Vol. 12, No. S2, pp. 60–69.
- Im S.T., Fedotova E.V., Kharuk V.I., Spektoradiometricheskaya kosmos'emka v analize zony vspyshki massovogo razmnozheniya sibirskogo shelkopryada (Spectroradiometric satellite imagery application in analysis of siberian moth outbreaks), *Zhurnal Sibirskogo federal'nogo universiteta. Seriya: Tekhnika i tekhnologii*, 2008, Vol. 1, No. 4, pp. 346–358.
- Isaev A.S., *Raznoobrazie i dinamika lesnykh ekosistem Rossii* (Forest ecosystems of Russia: diversity and dynamics), Moscow: Tovarishestvo nauchnykh izdaniy KMK, 2012, Vol. 1, 460 p.

- Isaev A.S., Kiselev V.V., E.N. K., Pleshikov F.I., Cherkashin V.P., Geoinformatsionnye sistemy v prognozirovanii i kontrole massovogo razmnozheniya lesnykh nasekomykh (Geoinformation systems application to forecast and regulation of forest insects outbreaks), *Lesovedenie*, 1999, No. 5, pp. 15–23.
- Isaev A.S., Kondakov Y.P., Printsipy i metody lesoentomologicheskogo monitoringa (Principles and methods of the forest entomological monitoring), *Lesovedenie*, 1986, No. 4, pp. 3–12.
- Isaev A.S., Korovin G.N., Krupnomasshtabnye izmeneniya v boreal'nykh lesakh Evrazii i metody ikh otsenki s ispol'zovaniem kosmicheskoi informatsii (Large-scale changes in Eurasian boreal forests and methods of their assessment using space information), *Lesovedenie*, 2003, No. 2, pp. 3–9.
- Isaev A.S., Ovchinnikova T.M., Pal'nikova E.N., Sukhovol'skii V.G., Tarasova O.V., Otsenka kharaktera vzaimodeistvii "les – nasekomye" v lesakh boreal'noi zony v khode vozmozhnykh klimaticheskikh izmenenii (Assessment of "forest - insect" relations in forests of boreal zone under probable climatic changes), *Lesovedenie*, 1999, No. 6, pp. 39–44.
- Isaev A.S., Rozhkov A.S., Kiselev V.V., *Chernyi pikhtovyi usach: Monochamus urussovi (Fisch.) (Monochamus urussovi (Fisch.))*, Novosibirsk: Nauka, 1988, 270 p.
- Isaev A.S., Sukhikh V.I., Aerokosmicheskii monitoring lesnykh resursov (Aerospace monitoring of forest resources), *Lesovedenie*, 1986, No. 6, pp. 11–21.
- Isaev A.S., Sukhikh V.I., Kalashnikov E.N., *Aerokosmicheskii monitoring lesov (Aerospace monitoring of forests)*, Moscow: Nauka, 1991, 240 p.
- Jepsen J.U., Hagen S.B., Høgda K.A., Ims R.A., Karlsen 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 Environment*, 2009, Vol. 113, No. 9, pp. 1939–1947.
- Kennedy R.E., Yang Z., Cohen W.B., Detecting trends in forest disturbance and recovery using yearly Landsat time series: 1. LandTrendr – Temporal segmentation algorithms, *Remote Sensing of Environment*, 2010, Vol. 114, No. 12, pp. 2897–2910.
- Kerzhentsev A.S., Trashcheev R.V., "Double carousel" of the succession process in a regional ecosystem, *Russian Journal of Ecology*, 2011, Vol. 42, No. 6, pp. 445–452.
- 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, *Contemporary Problems of Ecology*, 2016, Vol. 9, No. 6, pp. 711–720.
- Kharuk V.I., Im S.T., Ranson K.J., Yagunov M.N., Climate-induced northerly expansion of siberian silkmoth range, *Forests*, 2017, Vol. 8, No. 8, Article 301, <https://doi.org/10.3390/f8080301>.
- Kharuk V.I., Im S.T., Yagunov M.N., Migration of the northern boundary of the siberian silk moth, *Contemporary Problems of Ecology*, 2018, Vol. 11, No. 1, pp. 26–34.
- Kharuk V.I., Kozhukhovskaya A.G., Pestunov I.A., Ranson K.J., Tsibul'skii G.M., S'emka NOAA/AVHRR v monitoringe vspyshek sibirskogo shelkopryada (NOAA/AVHRR imagery application to Siberian moth outbreaks monitoring), *Issledovanie Zemli iz kosmosa*, 2001, No. 1, pp. 80–86.
- Kharuk V.I., Renson K.Dzh., Kuz'michev V.V., Burenina A.A., Tikhomirov A.Y., Im S.T., S'emka "Landsat" v analize shelkopryadnikov Yuzhnoi Sibiri (Landsat imagery in analysis of silkworm outbreak sites in South Siberia), *Issledovanie Zemli iz kosmosa*, 2002, No. 4, pp. 79–90.
- Koroleva N.V., Tikhonova E.V., Ershov D.V., Saltykov A.N., Gavrilyuk E.A., Pugachevskii A.V., Twenty-five years of reforestation on nonforest lands in Smolenskoe Poozerye National Park according to Landsat imagery assessment, *Contemporary Problems of Ecology*, 2018, Vol. 11, No. 7, pp. 719–728.
- Krasnoshchekov Y.N., Bezkorovainaya I.N., Soil functioning in foci of Siberian moth population outbreaks in the southern taiga subzone of Central Siberia, *Biology Bulletin*, 2008, Vol. 35, No. 1, pp. 70–79.
- Lausch A., Erasmi S., King D.J., Magdon P., Heurich M., Understanding forest health with remote sensing – Part I – A review of spectral traits, processes and remote-sensing characteristics, *Remote Sensing*, 2016, Vol. 8, No. 12, Article 1029, <https://doi.org/10.3390/rs8121029>.
- Meddens A.J.H., Hicke J.A., Spatial and temporal patterns of Landsat-based detection of tree mortality caused by a mountain pine beetle outbreak in Colorado, USA, *Forest Ecology and Management*, 2014, Vol. 322, pp. 78–88.
- Meddens A.J.H., Hicke J.A., Vierling L.A., Hudak A.T., Evaluating methods to detect bark beetle-caused tree mortality using single-date and multi-date Landsat imagery, *Remote Sensing of Environment*, 2013, Vol. 132, pp. 49–58.
- Mikhailov Y.Z., Sumina N.Y., Sibirskii shelkopryad *Dendrolimus superans* (Butler, 1877) i bor'ba s nim v Irkutskoi oblasti (Siberian moth *Dendrolimus superans* (Butler, 1877) and control of it in Irkutsk region), *Baikal'skii zoologicheskii zhurnal*, 2012, No. 3 (11), pp. 25–29.
- Pavlov I.N., Litovka Y.A., Astapenko S.A., Rol' entomopatogennykh gribov i bakterii v dinamike chislennosti sibirskogo shelkopryada, *9th O.A. Kataev Readings. Dendrobiont invertebrates and fungi: the role in forest ecosystems*, Proc. Conf., Saint-Petersburg, 23–25 November 2016, Saint-Petersburg: Izd-vo SPbGLTU, 2016, pp. 76–77.
- Potapov P.V., Turubanova S.A., Tyukavina A., Krylov A.M., Mccarty J.L., Radeloff V.C., Hansen M.C., Eastern Europe's forest cover dynamics from 1985 to 2012 quantified from the full Landsat archive, *Remote Sensing of Environment*, 2015, Vol. 159, pp. 28–43.
- Senf C., Seidl R., Hostert P., Remote sensing of forest insect disturbances: Current state and future directions, *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2017, Vol. 60, pp. 49–60.
- Skakun R.S., Wulder M.A., Franklin S.E., Sensitivity of the thematic mapper enhanced wetness difference index to detect mountain pine beetle red-attack damage, *Remote Sensing of Environment*, 2003, Vol. 86, No. 4, pp. 433–443.
- Vogelmann J.E., Comparison between two vegetation indices for measuring different types of forest damage in the north-eastern United States, *International Journal of Remote Sensing*, 1990, Vol. 11, No. 12, pp. 2281–2297.
- Vogelmann J.E., Tolk B., Zhu Z., Monitoring forest changes in the southwestern United States using multitemporal Landsat data, *Remote Sensing of Environment*, 2009, Vol. 113, No. 8, pp. 1739–1748.
- White J.C., Wulder M.A., Brooks D., Reich R., Wheate R.D., Detection of red attack stage mountain pine beetle infestation

- with high spatial resolution satellite imagery, *Remote Sensing of Environment*, 2005, Vol. 96, No. 3–4, pp. 340–351.
- Wilson E.H., Sader S.A., Detection of forest harvest type using multiple dates of Landsat TM imagery, *Remote Sensing of Environment*, 2002, Vol. 80, No. 3, pp. 385–396.
- Wulder M.A., White J.C., Bentz B., Alvarez M.F., Coops C., Estimating the probability of mountain pine beetle red-attack damage, *Remote Sensing of Environment*, 2006, Vol. 101, No. 2, pp. 150–166.
- Zhirin V.M., Knyazeva S.V., Eydlina S.P., Long-term dynamics of vegetation indices in dark coniferous forest after Siberian moth disturbance, *Contemporary Problems of Ecology*, 2016, Vol. 9, No. 7, pp. 834–843.
- Kennedy R.E., Yang Z., Cohen W.B., Detecting trends in forest disturbance and recovery using yearly Landsat time series: 1. LandTrendr – Temporal segmentation algorithms, *Remote Sensing of Environment*, 2010, Vol. 114, No. 12, pp. 2897–2910.
- 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, *Contemporary Problems of Ecology*, 2016, Vol. 9, No. 6, pp. 711–720.
- Kharuk V.I., Im S.T., Ranson K.J., Yagunov M.N., Climate-induced northerly expansion of siberian silkmoth range, *Forests*, 2017, Vol. 8, No. 8, Article 301, <https://doi.org/10.3390/f8080301>.
- Lausch A., Erasmi S., King D.J., Magdon P., Heurich M., Understanding forest health with remote sensing – Part I – A review of spectral traits, processes and remote-sensing characteristics, *Remote Sensing*, 2016, Vol. 8, No. 12, Article 1029, <https://doi.org/10.3390/rs8121029>.
- Meddens A.J.H., Hicke J.A., Spatial and temporal patterns of Landsat-based detection of tree mortality caused by a mountain pine beetle outbreak in Colorado, USA, *Forest Ecology and Management*, 2014, Vol. 322, pp. 78–88.
- Meddens A.J.H., Hicke J.A., Vierling L.A., Hudak A.T., Evaluating methods to detect bark beetle-caused tree mortality using single-date and multi-date Landsat imagery, *Remote Sensing of Environment*, 2013, Vol. 132, pp. 49–58.
- Potapov P.V., Turubanova S.A., Tyukavina A., Krylov A.M., Mccarty J.L., Radeloff V.C., Hansen M.C., Eastern Europe's forest cover dynamics from 1985 to 2012 quantified from the full Landsat archive, *Remote Sensing of Environment*, 2015, Vol. 159, pp. 28–43.
- Senf C., Seidl R., Hostert P., Remote sensing of forest insect disturbances: Current state and future directions, *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2017, Vol. 60, pp. 49–60.
- Skakun R.S., Wulder M.A., Franklin S.E., Sensitivity of the thematic mapper enhanced wetness difference index to detect mountain pine beetle red-attack damage, *Remote Sensing of Environment*, 2003, Vol. 86, No. 4, pp. 433–443.
- White J.C., Wulder M.A., Brooks D., Reich R., Wheate R.D., Detection of red attack stage mountain pine beetle infestation with high spatial resolution satellite imagery, *Remote Sensing of Environment*, 2005, Vol. 96, No. 3–4, pp. 340–351.
- Wilson E.H., Sader S.A., Detection of forest harvest type using multiple dates of Landsat TM imagery, *Remote Sensing of Environment*, 2002, Vol. 80, No. 3, pp. 385–396.
- Wulder M.A., White J.C., Bentz B., Alvarez M.F., Coops N.C., Estimating the probability of mountain pine beetle red-attack damage, *Remote Sensing of Environment*, 2006, Vol. 101, No. 2, pp. 150–166.