

Оценка дефолиации темнохвойных древостоев после воздействия сибирского шелкопряда по дистанционным данным

Е. И. Пономарёв^{1,2,3}, Н. Д. Якимов^{1,3}, П. Д. Третьяков^{1,3}, С. М. Султсон³

¹ Красноярский научный центр СО РАН, Красноярск, 660036, Россия
E-mail: nyakimov96@mail.ru

² Сибирский федеральный университет, Красноярск, 660041, Россия

³ Сибирский государственный университет науки и технологий им. акад. М. Ф. Решетнева, Красноярск, 660037, Россия

Представлены результаты анализа признаков дефолиации темнохвойных древостоев после воздействия сибирского шелкопряда (*Dendrolimus sibiricus* Tschetverikov (*Lepidoptera: Lasiocampidae*)) в горно-таёжных лесах Ирбейского лесничества Красноярского края Средней Сибири в 2018–2020 гг. Использованы материалы Landsat-8 OLI/TIRS (англ. Operational Land Imager/Thermal Infrared Sensor), а также сведения о древостоях и лесотаксационные характеристики в формате векторного слоя для выделов, входящих в зону поражения сибирским шелкопрядом. Степень нарушенности древостоев оценивали по относительной аномалии вегетационного индекса ($\Delta_{\text{отн}}$, %) по сравнению с характерными фоновыми значениями для трёх вариантов доминирующих темнохвойных древостоев: пихты (*Abies sibirica*), кедра (*Pinus sibirica*) и ели (*Picea obovata*). Выполнен переход от попиксельных данных к значениям, усреднённым по выделам, и с привязкой к доминирующим породам. Показано, что пороговые значения относительной аномалии $\Delta_{\text{отн}}$ на уровне 10, 25, 50 % позволяют детализировать степень дефолиации с выделением пяти классов состояния повреждённых участков. Сопряжённый анализ с привлечением лесотаксационных данных позволил подчеркнуть различия в скорости проявления признаков дефолиации на материалах спутниковой съёмки, а также косвенно оценить устойчивость к воздействию шелкопряда доминирующих темнохвойных древостоев пихты, кедра (сосны сибирской) и ели, ориентируясь на долю площади, с признаками чрезвычайной дефолиации на заключительном этапе развития вспышки в 2020 г.

Ключевые слова: Сибирь, темнохвойная тайга, сибирский шелкопряд (*Dendrolimus sibiricus*), спутниковые данные, Landsat, NDVI

Одобрена к печати: 25.07.2023

DOI: 10.21046/2070-7401-2023-20-4-175-186

Введение

К одному из самых значительных природных факторов воздействия на темнохвойные древостои Сибири относят периодические критические вспышки численности сибирского шелкопряда (*Dendrolimus sibiricus* Tschetverikov (*Lepidoptera: Lasiocampidae*)). Эта проблема актуальна для многих регионов произрастания темнохвойных древостоев. В различных участках темнохвойной тайги Красноярского края (Средняя Сибирь) начиная с 1878 г. было зарегистрировано девять крупномасштабных вспышек численности энтомовредителя (Sultson et al., 2021). Утверждается, что это второй деструктивный фактор после лесных пожаров по масштабности воздействия на древостои в отдельные периоды (Soukhovolsky et al., 2022).

Ранее было показано (Кондаков, 1974; Creedon et al., 2014), что вспышки численности шелкопряда тесно связаны с климатическими факторами, такими как продолжительные засухи и длительные периоды высокой температуры в различные сезоны вегетационного периода. В условиях меняющегося климата и глобального потепления прогнозируется увеличение частоты вспышек энтомовредителей в Сибири. Таким образом, изучение данного вопроса (Харук, Антамошкина, 2017; Pavlov et al., 2018; Sultson et al., 2021) имеет большое значение в контексте прогнозируемых климатических изменений, вероятно, определяющих как регулярность повторения вспышек в регионе, так и масштабы последующей дефолиации и гибели

темнохвойных насаждений. Отмечено (Niinemets et al., 2010), что именно в бореальных лесных экосистемах сочетание стресса, вызванного изменениями климата, с дефолиацией проявляется наиболее масштабно. Кроме того, рост антропогенного вмешательства (вырубки, хозяйственная деятельность, антропогенные пожары) также потенциально благоприятствует вспышкам шелкопряда.

В случае сибирского шелкопряда с потеплением возможно расширение ареала и появление вспышек массового размножения в ранее не подверженных риску субрегионах арктической зоны. Так, в последние десятилетия в Сибири было выявлено расширение геоклиматической зоны распространения данного энтомовредителя (Kharuk et al., 2020; Kirichenko et al., 2009). Потенциальная область распространения шелкопряда намного шире и затрагивает места произрастания темнохвойных древостоев на всей территории северного полушария (Им и др., 2008; Flø et al., 2020; Foster et al., 2013; Mõykkynen, Pukkala, 2014).

В силу объективной сложности наземного мониторинга зон поражения сибирским шелкопрядом актуально развитие дистанционных технологий оценки состояния древостоев на повреждённых участках. В этих целях активно используются многоспектральные спутниковые данные и спектральные индексы, динамика которых, а также амплитуда относительных отклонений от нормы могут косвенно характеризовать степень нарушенности древостоев, уровень дефолиации и развитие процессов усыхания (Жиринов и др., 2016; Князева и др., 2019).

Анализ спутниковых изображений после начала дефолиации позволяет обнаружить уже нанесённый сибирским шелкопрядом ущерб (Kharuk et al., 2004). Вместе с тем показано (Барталев и др., 1999; Князева и др., 2019; Kharuk et al., 2020), что с использованием ряда спектральных индексов можно характеризовать степень нарушенности древостоев даже в условиях, когда дефолиация составляет менее 50 %. В работе (Барталев и др., 1999) для решения данной задачи применён метод декомпозиции спектральных смесей, что позволило получить характеристику дефолиации, выраженную в непрерывной шкале. Однако в целом для верификации и калибровки спутниковых оценок необходимы данные натурных обследований повреждённых участков, возможность получить которые зачастую ограничена. Поэтому задача количественных оценок устойчивости темнохвойных древостоев сегодня не имеет достаточной степени проработки, а предложенные решения изобилуют допущениями и пока не находят широкого практического применения (Kovalev, Soukhovolsky, 2021). В этой связи подходы, обобщающие наземные данные лесоустройства и информацию, получаемую методами дистанционного зондирования Земли, могут служить основой для новых технологий контроля древостоев и выявления их устойчивости в условиях деструктивного воздействия вспышек численности сибирского шелкопряда.

В работе мы рассмотрели следующие аспекты: 1) относительные аномалии спектральных характеристик темнохвойных древостоев в условиях дефолиации; 2) возможность пороговой классификации состояния темнохвойного леса после воздействия сибирского шелкопряда (*Dendrolimus sibiricus*) в зоне горно-таёжных темнохвойных лесов Сибири в 2018–2020 гг.; 3) интегральную оценку вероятного уровня дефолиации в зависимости от преобладающего древостоя в районе исследований.

Район исследований и исходные данные

Исследование было проведено для участка на территории Ирбейского лесничества Красноярского края Средней Сибири (рис. 1, см. с. 177). Общая площадь лесничества составляет ~904 тыс. га. (54° 45'–55° 05' с. ш., 95° 20'–99° 10' в. д.). Участок вспышки сибирского шелкопряда, которая наблюдалась в период с 2018 по 2020 г., расположен в южной горно-таёжной зоне Восточного Саяна.

На территории преобладают темнохвойные древостои: сосна сибирская (*Pinus sibirica*), пихта (*Abies sibirica*) и ель (*Picea obovata*), которые в совокупности составляют около 40 % от общей площади лесных массивов района. Среди лиственных пород (*Populus tremula* и *Betula spp.*) преобладают берёзовые насаждения (около 19 % территории). Светлохвойные

сосновые (*Pinus sylvestris*) и лиственничные леса (*Larix sibirica*) занимают 16 и 6,5 % территории Ирбейского лесничества соответственно. До 14 % площади на северо-западе лесничества не покрыто лесом. Участки с насаждениями высокой сомкнутости представлены в основном сосной сибирской (Sultson et al., 2021). Большая часть зоны повреждения выявлена в древостоях с доминирующими насаждениями сосны сибирской, ели и пихты, на долю которых пришлось 96 % от общей площади повреждённых древостоев.

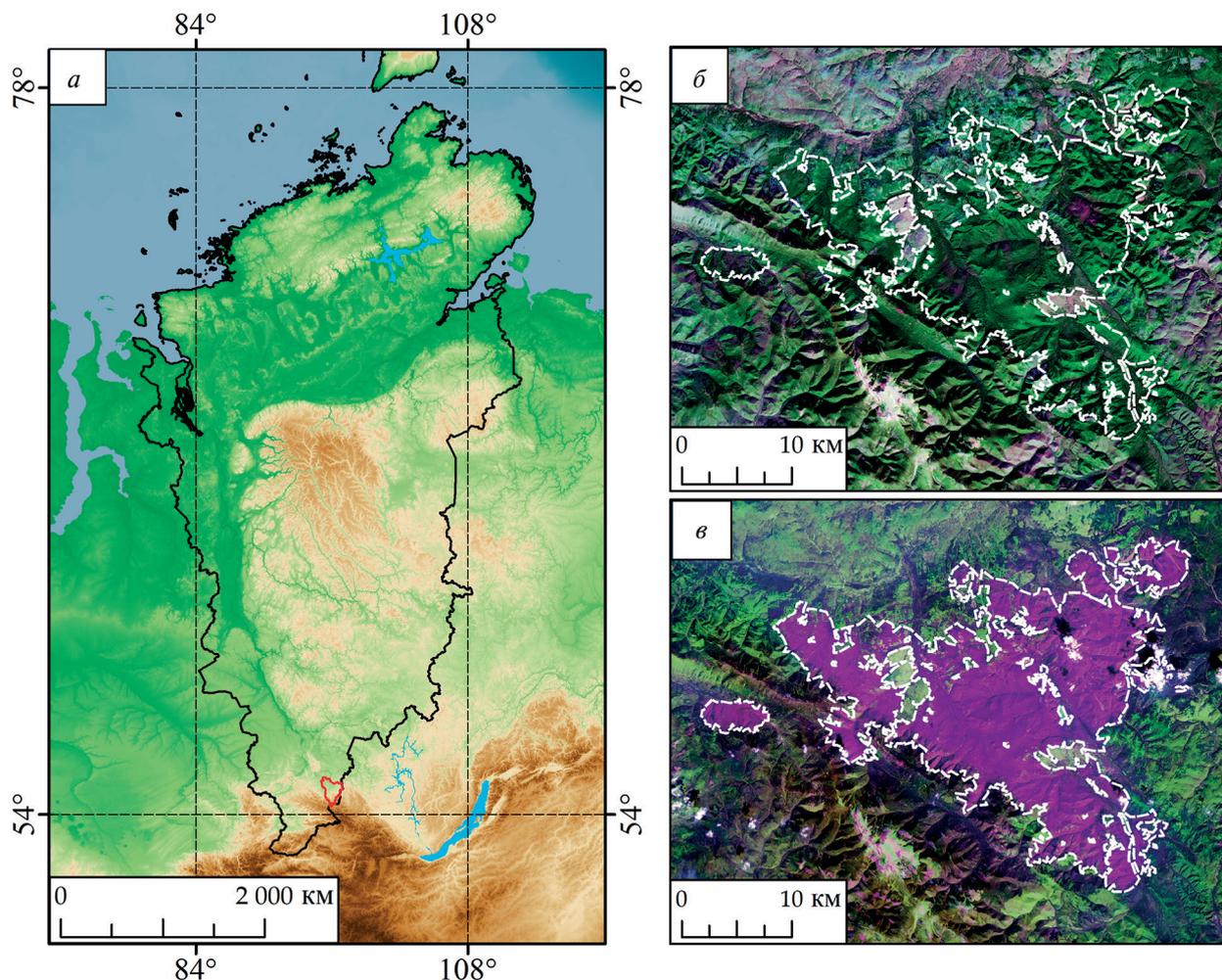


Рис. 1. Территория исследования на карте Красноярского края (а); красным контуром показана территория Ирбейского лесничества. Материалы съёмки Landsat: зона распространения вспышки шелкопряда до стадии дефолиации 29.09.2018 (б), состояние нарушенного участка на 10.08.2020 (в)

Данные о древостоях и лесотаксационные характеристики части Ирбейского лесничества с привязкой к зоне повреждения сибирским шелкопрядом были получены из векторного слоя таксационных описаний, выполненных для 2068 выделов. Исходная информация взята в Центре защиты лесов Красноярского края (Красноярск, Россия) (<https://krasnoyarsk.rcfh.ru>). Выделы с их характеристиками и границами представлены в векторном полигональном слое, который накладывался на материалы спутниковых съёмок средствами геоинформационной системы (ГИС) с открытым кодом Quantum GIS 3.16.3 (англ. Quantum Geographic Information System) (<https://www.qgis.org>). Далее результаты классификации шелкопрядников с признаками дефолиации древостоя на доступных спутниковых снимках района исследований были проанализированы в сочетании с данными инвентаризации лесов. Дополнительная информация о древостоях обобщена по материалам сервиса «Вега» (данные Института космических исследований РАН (ИКИ РАН), <http://pro-vega.ru/maps/>) (Loupian et al., 2022).

В качестве исходных данных для анализа спектральных характеристик нарушенных лесных участков использовали материалы среднего пространственного разрешения Landsat-8 OLI/TIRS (англ. Operational Land Imager/Thermal Infrared Sensor) (разрешение 30 и 100 м) за вегетационные периоды 2018–2020 гг. Загрузка данных съёмки Landsat выполнялась с сайта Геологической службы США (англ. United States Geological Survey — USGS, <https://earthexplorer.usgs.gov/>). Всего в работе было использовано 10 мультиспектральных спутниковых снимков, отражающих различные этапы дефолиации темнохвойных лесов Ирбейского лесничества на площадях 88,9 га (2018); 20,1 тыс. га (2019) и 50,8 тыс. га (2020).

Методы исследования

На основе доступной выборки съёмок Landsat за 2018–2020 гг. на территорию поражения была проведена ретроспективная экспертная оценка состояния темнохвойных древостоев на различных стадиях дефолиации. Рассматривались отдельные выделы с преобладанием темнохвойных насаждений (рис. 2), а в границах выделов анализировались соответствующие группы пикселей изображения, в которых спектральные характеристики отличались от фоновых (ненарушенных) территорий, — эти различия служили косвенным подтверждением начала дефолиации. Необходимо отметить, что спектральные признаки, значимые для дешифрирования повреждённых участков, формируются только по прошествии определённого времени, когда в древостоях проявляется отклик на воздействие шелкопряда. Характерное время такой реакции может составлять от нескольких месяцев, а наибольшие различия между спектральными характеристиками фоновых территорий и зон поражения фиксируются только в течение следующего вегетационного периода (Sultson et al., 2021). Первым критерием выделения участков с нарушениями древостоев после воздействия шелкопряда было характерное изменение цвета (см. рис. 2).

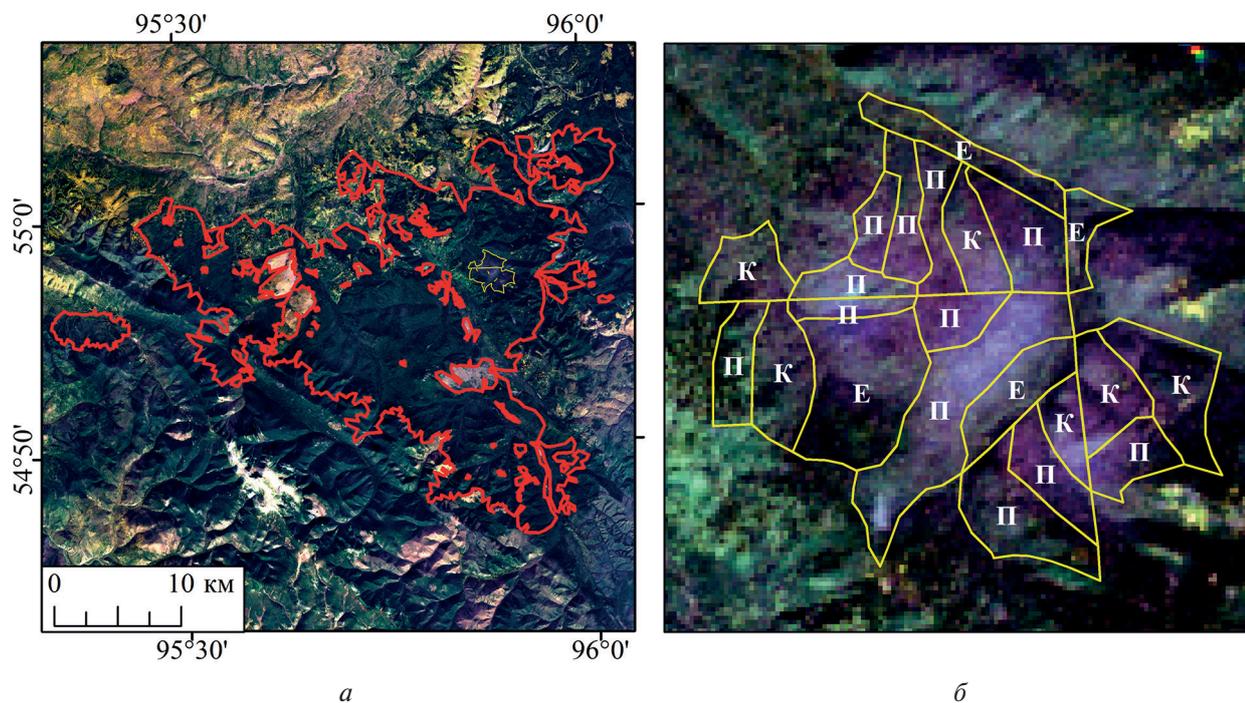


Рис. 2. Определение выделов начальной стадии дефолиации древостоев в Ирбейском лесничестве на снимках Landsat-8 OLI/TIRS от 29.09.2018 (композиция каналов 4-3-2, естественные цвета): а — снимок участка с выделением зоны первичного очага вспышки шелкопряда (жёлтый контур) и финальной зоны нарушения (красный контур); б — границы выделов, отнесённых к области первичного очага вспышки на площади 88,9 га, с указанием преобладающего древостоя (К — сосна сибирская (кедр), П — пихта, Е — ель)

Для всех отобранных снимков Landsat-8 OLI/TIRS проводилась предварительная радиометрическая калибровка с использованием файла метаданных (Guha, Govil, 2020). Преобразование изображений с безразмерными значениями (*англ.* digital numbers — DN) в значения спектрального излучения (<https://www.usgs.gov/landsat-missions/using-usgs-landsat-level-1-data-product>) позволяет сравнивать мозаики спутниковых снимков (Teixeira Pinto et al., 2020) и повышает надёжность результатов последующей классификации. После предварительной обработки выполняли попиксельный расчёт индекса NDVI (*англ.* Normalized Difference Vegetation Index — нормализованный разностный вегетационный индекс), косвенно характеризующего состояние растительного покрова:

$$\text{NDVI} = \frac{(\text{NIR} - \text{RED})}{(\text{NIR} + \text{RED})},$$

где NIR (*англ.* near infrared, ближний инфракрасный, $\lambda = 0,63\text{--}0,69$ мкм) и RED (красный, $\lambda = 0,76\text{--}0,90$ мкм) — отражательные характеристики каналов в указанных диапазонах длин волн.

Попиксельные значения NDVI усредняли для отдельных выделов темнохвойных. Этот подход позволил, во-первых, оперировать усреднёнными значениями для относительно больших участков в сравнении с размером одного пикселя, во-вторых — снизить вероятность ошибок при анализе данных разного времени съёмки с возможной пространственной невязкой пикселей в разных кадрах, а в-третьих — в дальнейшем выполнить интегральную оценку нарушенности выделов в терминах вероятного уровня дефолиации с возможностью оценки уязвимости в ряду выделов с доминированием насаждений сосны сибирской, пихты и ели.

Далее переходили к анализу относительных отклонений ($\Delta_{\text{отн}}$, %), характерных для нарушенных участков, в сравнении с фоновыми значениями:

$$\Delta_{\text{отн}} = \frac{(\text{NDVI}_{\text{ф}} - \text{NDVI}_{\text{ц}})}{\text{NDVI}_{\text{ф}}} \times 100\%,$$

где $\text{NDVI}_{\text{ф}}$ — усреднённая величина NDVI для фоновых участков растительности с привязкой к доминирующему древостою; $\text{NDVI}_{\text{ц}}$ — усреднённое значение NDVI для выдела с рассматриваемым вариантом древостоя с признаками дефолиации.

Фоновые значения $\text{NDVI}_{\text{ф}}$ были определены посредством усреднения значений NDVI неповреждённых выделов с учётом лесотаксационных характеристик и с привязкой к доминирующим древостоям. Таким образом, значения вегетационного индекса для фоновых выделов являлись усреднением по серии выделов общей площадью 5640,12 га (для выделов с насаждениями сосны сибирской), 5087,88 га (с доминированием пихты) и 963,18 га (для выделов с преобладанием ели). Мы также учитывали внутрисезонные изменения усреднённых значений $\text{NDVI}_{\text{ф}}$ ненарушенных участков, которые определялись фенологическим состоянием растительности в течение вегетационного периода. Так, на снимках середины вегетационного периода (июль) значения $\text{NDVI}_{\text{ф}}$ варьировали в диапазоне 0,47–0,7, в то время как по съёмкам, выполненным в августе, $\text{NDVI}_{\text{ф}} = 0,35\text{--}0,60$.

Пороговые критерии для выделения участков различной степени дефолиации были заданы из фиксируемого уровня относительной аномалии $\Delta_{\text{отн}}$: 10, 25, 50 % для слаборазрушенных, среднеразрушенных и сильно нарушенных выделов соответственно. В силу того, что на нарушенных участках происходит занижение значений NDVI на величину не менее 20–50 % от статистической нормы, характерной для здоровой растительности, такие пороговые значения обоснованы для задачи классификации степени дефолиации (Жиринов и др., 2016; Князева и др., 2019; Kharuk et al., 2004).

Соотношение площадей участков с различной степенью нарушенности, косвенно характеризующее динамику дефолиации в 2019–2020 гг., определяли по количеству пикселей, соответствующих заданному пороговому критерию аномалии $\Delta_{\text{отн}}$. При этом результаты анализировались отдельно для групп выделов с преобладанием: 1) сосны сибирской (*Pinus sibirica*), 2) пихты (*Abies sibirica*), 3) ели (*Picea obovata*). Пространственно-временная статистика рассчитывалась стандартными методами в приложении Quantum GIS.

Результаты и обсуждение

Пространственная локализация зоны поражения сибирским шелкопрядом в границах Ирбейского лесничества и временная динамика за период 2018–2020 гг., выявленная по материалам спутниковой съёмки Landsat, представлены на *рис. 3*. В течение сезона 2018 г. изменения спектральных характеристик растительного покрова были зафиксированы на незначительной части территории лесничества. Основные проявления дефолиации отмечены на снимках 2019 г. на площади 20,1 тыс. га и в 2020 г. на площади 50,8 тыс. га (см. *рис. 3б*).

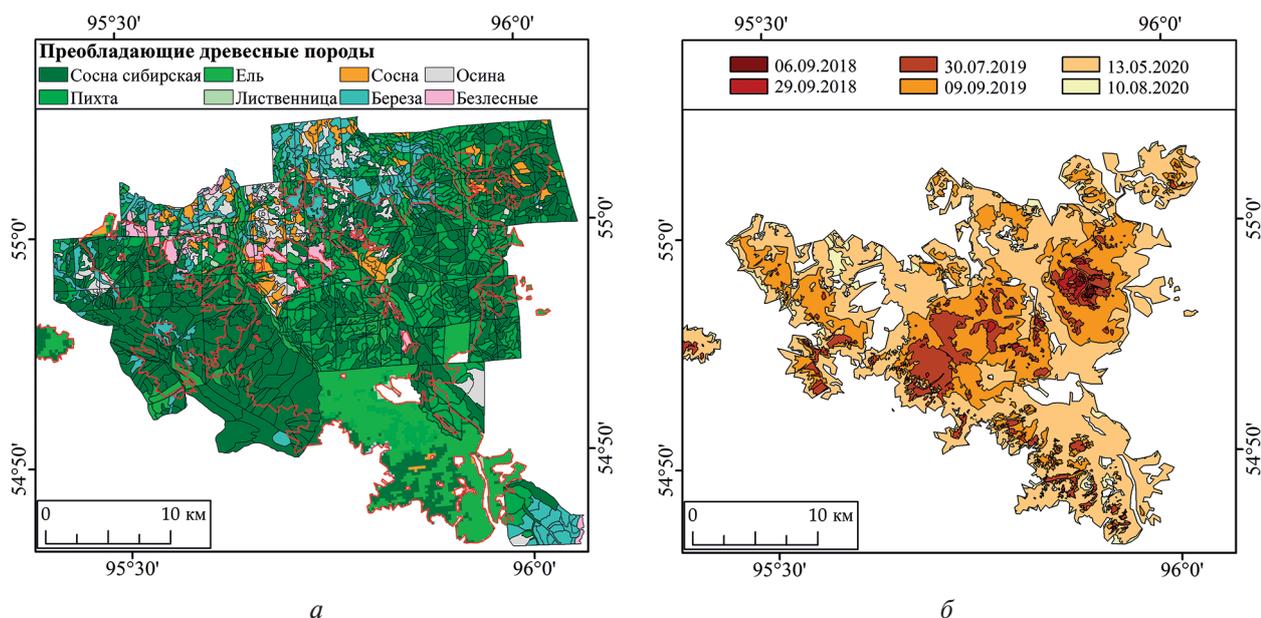


Рис. 3. Зона поражения сибирским шелкопрядом: *а* — карта-схема доминирующих древостоев Ирбейского лесничества, чёрными линиями показаны границы выделов, красным цветом выделена финальная граница распространения вспышки шелкопряда; *б* — динамика распространения шелкопряда в Ирбейском лесничестве в 2018–2020 гг.

Предварительный анализ по состоянию на август 2020 г. показал, что в Ирбейском лесничестве нарушенная территория включала 85 кварталов и 2068 выделов. Площадь, подвергшаяся частичной или полной дефолиации, включает в основном насаждения темнохвойных (>76 %), на остальные (в том числе смешанные) древостои суммарно приходится около 24 % нарушенной территории. Далее в работе мы анализировали информацию только по выделам с преобладанием темнохвойных, площади нарушений в которых составили: 56,8 % (43,5 % всех выделов) — для сосны сибирской; 37,2 % (49,1 %) — для пихты; 5,9 % (7,4 %) — для ели (см. *рис. 3*).

Изменения спектральных признаков для трёх вариантов темнохвойных древостоев района исследований обобщены в *табл. 1*. В среднем относительное снижение вегетационного индекса в сезон 2019 г. составляло 21,2–29,8 % относительно фоновых значений. При этом признаки дефолиации проявились не более чем на 35 % площади, пройденной шелкопрядом, что согласуется с опубликованными данными (Sultson et al., 2021). Существенный прирост участков с признаками дефолиации фиксируется весной 2020 г., когда дешифрируемая зона фактически достигает максимума и выделяется в качестве итоговой площади поражения (см. *рис. 2, 3*). Относительное снижение вегетационного индекса в течение 2020 г. составляло 33,9–40,3 % (со спорадическими максимумами до 99 %) на общей площади темнохвойных древостоев ~50,8 тыс. га.

Медианные значения для относительной аномалии вегетационного индекса составили: в 2019 г. — 5,5, 17 и 11 %, в 2020 г. — 45, 52 и 47 % в выделах с преобладанием сосны сибир-

ской, пихты и ели соответственно. Зафиксировано характерное смещение максимума $\Delta_{отн}$ с 10–20 % в 2019 г. до ~50 % на заключительном этапе в 2020 г. (рис. 4).

Таблица 1. Значения вегетационного индекса и относительной аномалии ($\Delta_{отн}$, %) нарушенных участков в сравнении с фоновыми значениями

Параметр	Сосна сибирская			Пихта			Ель		
	NDVI _ц	NDVI _ф	$\Delta_{отн}$	NDVI _ц	NDVI _ф	$\Delta_{отн}$	NDVI _ц	NDVI _ф	$\Delta_{отн}$
<i>По состоянию на 2019 г.</i>									
Среднее	0,41	0,47	21,2	0,36	0,50	29,8	0,39	0,48	22,7
σ	0,10	0,07	17,6	0,09	0,07	17,4	0,09	0,07	17,1
<i>По состоянию на 2020 г.</i>									
Среднее	0,26	0,36	36,6	0,24	0,36	40,3	0,26	0,35	33,9
σ	0,11	0,06	19,8	0,11	0,09	19,2	0,09	0,06	18,2

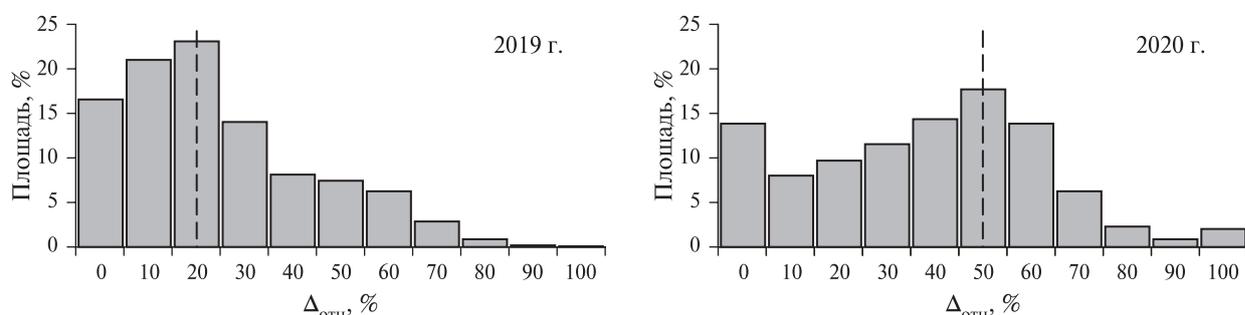


Рис. 4. Процентное соотношение площадей зоны поражения, соответствующих вычисленным диапазонам $\Delta_{отн}$ в 2019 и 2020 гг.

Пространственное распределение значений $\Delta_{отн}$ в границах зоны поражения представлено на рис. 5.

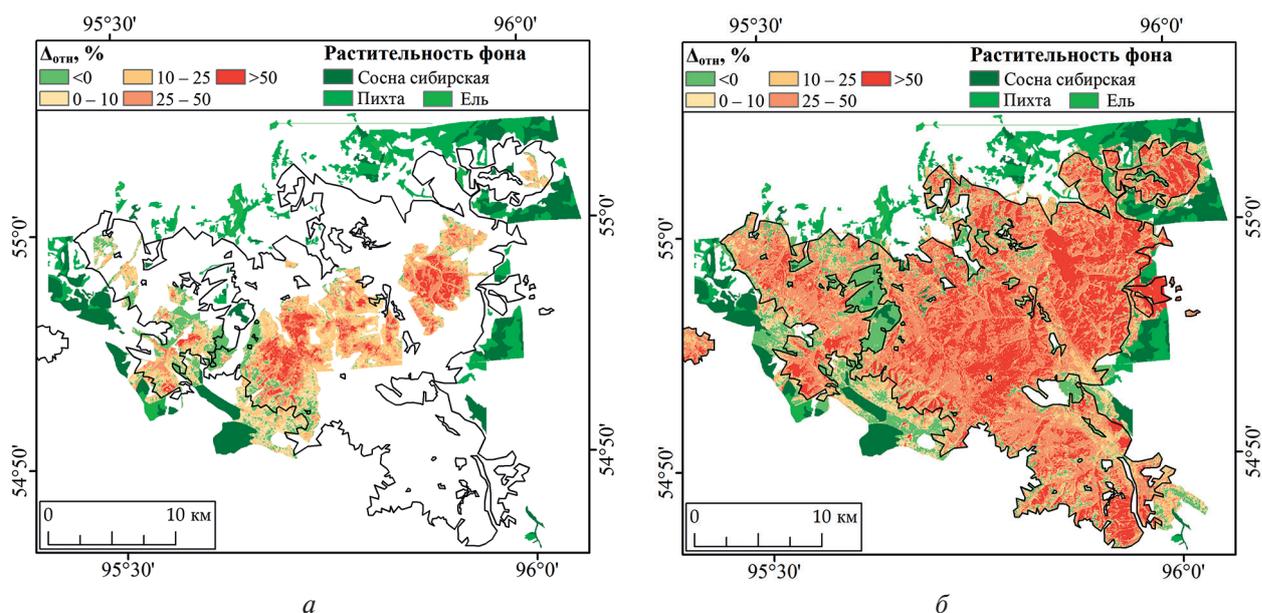


Рис. 5. Классификация зоны поражения в Ирбейском лесничестве по степени нарушенности в терминах $\Delta_{отн}$ (%) для участков с преобладанием сосны сибирской, пихтовых и еловых насаждений по данным Landsat-8: а — за 30.07.2019; б — за 10.08.2020

Согласно опубликованным результатам (Kharuk et al., 2020; Князева et al., 2019), используемые на практике индексы имеют разную чувствительность к дефолиации древостоя после шелкопряда. В частности, было показано (Князева и др., 2019), что такие индексы, как SWVI (*англ.* Short Wave Vegetation Index — коротковолновый вегетационный индекс) и NDVI, на участках шелкопрядников характеризуются снижением на 25–50 % относительно статистической нормы для фона: с 0,40–0,42 до 0,25–0,30 для SWVI и с 0,75–0,81 до 0,63–0,68 для NDVI. Аналогичным образом полная дефолиация и участки с частичным повреждением крон идентифицируются на основе индекса NDII (*англ.* Normalized Difference Infrared Index — нормализованный разностный инфракрасный индекс) в исследовании (Kharuk et al., 2020), где значения в диапазоне $0,1 \leq NDII < 0,3$ использовались как пороговые при классификации нарушенных древостоев. Полученные в нашем исследовании значения относительной аномалии $\Delta_{отн}$ согласуются с приводимыми в литературе и определяются скачкообразным изменением значений вегетационного индекса при дискретных съёмках участков, на которых развивается процесс дефолиации. При этом необходимо учитывать, что каждый рассматриваемый выдел в итоге может содержать темнохвойные насаждения различной степени нарушенности, а характеристику вероятного уровня дефолиации следует рассматривать как интегральную (*табл. 2*).

Таблица 2. Соотношение площадей в зоне поражения, классифицированных по степени нарушенности пороговым методом для выделов с преобладанием темнохвойных древостоев

$\Delta_{отн}, \%$	Вероятный уровень дефолиации	Доля от общей площади, %					
		Пихта	Кедр	Ель	Пихта	Кедр	Ель
		2019 г.			2020 г.		
0	Отсутствует	2,9	22,8	11,6	12,6	17,8	15,7
<10	Низкая	8,5	25,7	21,2	6,3	9,8	10,2
25	Средняя	39,7	27,1	38,3	14,3	14,2	18,3
25–50	Высокая	32,8	17,0	19,7	35,4	36,2	38,1
>50	Чрезвычайная	16,1	7,4	9,2	31,3	22,0	17,8

Очевидно, что уникальность каждого описываемого случая вспышки шелкопряда не позволяет говорить, что заданные пороговые значения могут быть унифицированы для решения задачи разделения категорий нарушенности темнохвойных древостоев. Результаты описывают общую закономерность, но могут существенно различаться в абсолютных значениях. В данной работе мы классифицировали выделы с преобладанием темнохвойных древостоев по степени нарушенности в зависимости от уровня относительной аномалии индекса растительности $\Delta_{отн}$ (см. *табл. 2*), основываясь на пороговых значениях, указанных выше и согласующихся с опубликованными подходами (Жиринов и др., 2016; Князева и др., 2019; Kharuk et al., 2020).

На этапе распространения вспышки в 2019 г. самые значительные изменения спектральных характеристик в результате дефолиации ($\Delta_{отн} = 25–50 \%$) наблюдались в массивах пихты и ели, где средний и высокий уровень дефолиации зафиксирован на более 70 и 57 % площади соответственно. В выделах с преобладанием кедра (сосны сибирской), напротив, свыше 75 % территории характеризовались низким уровнем дефолиации. В последующий 2020 г. во всех выделах темнохвойных насаждений преобладает высокий, а также чрезвычайный уровень дефолиации, а уровень относительной аномалии $\Delta_{отн}$ достигает более 50 %. Соотношение площадей, характеризующихся чрезвычайным уровнем дефолиации, на момент съёмки в 2020 г. для выделов пихты, кедра (сосны сибирской) и ели составляло 31, 22 и 18 % соответственно (см. *табл. 2*), что можно интерпретировать как косвенный показатель устойчивости различных темнохвойных насаждений района исследований к воздействию шелкопряда.

Заключение

Относительные аномалии вегетационного индекса $\Delta_{\text{отн}}$ и их обобщение на уровне выделов с преобладанием темнохвойных насаждений позволяют характеризовать процессы дефолиации после воздействия сибирского шелкопряда (*Dendrolimus sibiricus*).

Показано, что пороговые значения относительной аномалии $\Delta_{\text{отн}}$ на уровне 10, 25, 50 % позволяют детализировать степень дефолиации с выделением пяти классов состояния повреждённых участков.

При этом сопряжённый анализ с привлечением лесотаксационных данных в масштабе выделов позволяет подчеркнуть различия в скорости проявления признаков дефолиации на материалах спутниковой съёмки, а также косвенно оценить устойчивость к воздействию шелкопряда доминирующих темнохвойных древостоев пихты, кедра (сосны сибирской) и ели, для которых соотношение площадей, характеризующихся чрезвычайным уровнем дефолиации на 2020 г., составляло соответственно 31, 22 и 18 % от общей площади каждого древостоя в зоне поражения.

Полученные результаты представляются основой для выполнения дальнейшего мониторинга нарушенных участков, а также могут быть использованы при диагностике новых территорий горной темнохвойной тайги Сибири, потенциально подверженных воздействию шелкопряда.

Работа выполнена по госзаданию Министерства науки и высшего образования Российской Федерации «Фундаментальные основы защиты лесов от энтомо- и фитовредителей в Сибири» (FEFE-2020-0014). Материалы спутникового мониторинга получены и обработаны в Центре коллективного пользования Федерального исследовательского центра «Красноярский научный центр СО РАН» в рамках госзадания FWES-2022-0001.

Литература

1. *Барталев С. А., Ершов Д. В., Исаев А. С.* Оценка дефолиации лесов по многоспектральным спутниковым изображениям методом декомпозиции спектральных смесей // Исслед. Земли из космоса. 1999. № 4. С. 76–86.
2. *Журин В. М., Князева С. В., Эйдлина С. П.* Многолетняя динамика вегетационных индексов темнохвойных лесов после повреждения Сибирским шелкопрядом // Лесоведение. 2016. № 1. С. 3–14.
3. *Им С. Т., Федотова Е. В., Харук В. И.* Спектрорадиометрическая космосъемка в анализе зоны вспышки массового размножения сибирского шелкопряда // Техника и технологии. 2008. № 1. С. 346–358.
4. *Князева С. В., Королева Н. В., Эйдлина С. П., Соколова Е. Н.* Оценка состояния растительности в очаге массового размножения Сибирского шелкопряда по спутниковым данным // Лесоведение. 2019. № 5. С. 385–398. <https://doi.org/10.1134/S1995425519070114>.
5. *Кондаков Ю. П.* Закономерности массового размножения сибирского шелкопряда // Экология популяций лесных животных Сибири. 1974. С. 206–265.
6. *Харук В. И., Антамошкина О. А.* Воздействие Сибирского шелкопряда на горимость лесных территорий // Сибирский эколог. журн. 2017. Т. 24. № 5. С. 647–654. DOI: 10.15372/SEJ20170510.
7. *Creeden E. P., Hicke J. A., Buotte P. C.* Climate, weather, and recent mountain pine beetle outbreaks in the western United States // Forest Ecology and Management. 2014. V. 312. P. 239–251. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2013.09.051>.
8. *Flø D., Rafoss T., Wendell M., Sundheim L.* The Siberian moth (*Dendrolimus sibiricus*), a pest risk assessment for Norway // Forest Ecosystems 2020. V. 7. Article 48. <https://doi.org/10.1186/s40663-020-00258-9>.
9. *Foster J. R., Townsend P. A., Mladenoff D. J.* Spatial dynamics of a gypsy moth defoliation outbreak and dependence on habitat characteristics // Landscape Ecology. 2013. V. 28. P. 1307–1320. <https://doi.org/10.1007/s10980-013-9879-8>.
10. *Guha S., Govil H.* Land surface temperature and normalized difference vegetation index relationship: A seasonal study on a tropical city // SN Applied Sciences. 2020. V. 2. Article 1661. <https://doi.org/10.1007/s42452-020-03458-8>.
11. *Kharuk V. I., Ranson K. J., Kozuhovskaya A. G., Kondakov Y. P., Pestunov I. A.* NOAA/AVHRR satellite detection of Siberian silkmoth outbreaks in eastern Siberia // Intern. J. Remote Sensing. 2004. V. 25. No. 24. P. 5543–5555. <https://doi.org/10.1080/01431160410001719858>.

12. Kharuk V. I., Im S. T., Soldatov V. V. Siberian silkmoth outbreaks surpassed geoclimatic barrier in Siberian Mountains // *J. Mountain Science*. 2020. V. 17. P. 1891–1900. <https://doi.org/10.1007/s11629-020-5989-3>.
13. Kirichenko N. I., Baranchikov Y. N., Vidal S. Performance of the potentially invasive Siberian moth *Dendrolimus superans sibiricus* on coniferous species in Europe // *Agricultural and Forest Entomology*. 2009. V. 11. No. 3. P. 247–254. <https://doi.org/10.1111/j.1461-9563.2009.00437.x>.
14. Kovalev A., Soukhovolsky V. Analysis of Forest Stand Resistance to Insect Attack According to Remote Sensing Data // *Forests*. 2021. V. 12. Article 1188. <https://doi.org/10.3390/f12091188>.
15. Loupian E., Burtsev M., Proshin A. et al. Usage Experience and Capabilities of the VEGA-Science System // *Remote Sensing*. 2022. V. 14. Article 77. <https://doi.org/10.3390/rs14010077>.
16. Möykkynen T., Pukkala T. Modelling of the spread of a potential invasive pest, the Siberian moth (*Dendrolimus sibiricus*) in Europe // *Forest Ecosystems*. 2014. V. 1. Article 10. <https://doi.org/10.1186/s40663-014-0010-7>.
17. Niinemets Ü. Responses of forest trees to single and multiple environmental stresses from seedlings to mature plants: Past stress history, stress interactions, tolerance and acclimation // *Forest Ecology and Management*. 2010. V. 260. No. 10. P. 1623–1639. DOI: 10.1016/j.foreco.2010.07.054.
18. Pavlov I. N., Litovka Y. A., Golubev D. V. et al. New outbreak of *Dendrolimus sibiricus* tschetv. in Siberia (2012–2017): monitoring, modeling and biological control // *Contemporary Problems of Ecology*. 2018. V. 11. No. 4. P. 406–419. <https://doi.org/10.1134/S1995425518040054>.
19. Soukhovolsky V., Kovalev A., Tarasova O. et al. Wind Damage and Temperature Effect on Tree Mortality Caused by *Ips typographus* L.: Phase Transition Model // *Forests*. 2022. V. 13. Article 180. <https://doi.org/10.3390/f13020180>.
20. Sultson S. M., Goroshko A. A., Verkhovets S. V. et al. Orographic Factors as a Predictor of the Spread of the Siberian Silk Moth Outbreak in the Mountainous Southern Taiga Forests of Siberia // *Land*. 2021. V. 10. Article 115. <https://doi.org/10.3390/land10020115>.
21. Teixeira Pinto C., Jing X., Leigh L. Evaluation Analysis of Landsat Level-1 and Level-2 Data Products Using *in situ* Measurements // *Remote Sensing*. 2020. V. 12. Article 2597. <https://doi.org/10.3390/rs12162597>.

Estimation of defoliation features in dark coniferous tree stands after the impact of Siberian silk moth according to remote data

E. I. Ponomarev^{1,2,3}, N. D. Yakimov^{1,3}, P. D. Tretyakov^{1,3}, S. M. Sultson³

¹ *Krasnoyarsk Science Center SB RAS, Krasnoyarsk 660036, Russia*
E-mail: nyakimov96@mail.ru

² *Siberian Federal University, Krasnoyarsk 660041, Russia*

³ *Reshetnev Siberian State University of Science and Technology*
Krasnoyarsk 660037, Russia

The paper presents the results of the analysis of defoliation features in the dark coniferous tree stands after the impact of the Siberian silkmoth (*Dendrolimus sibiricus*) in the mountain dark coniferous taiga of the Irbey forestry of the Krasnoyarsk Region of Central Siberia in 2018–2020. Landsat-8 OLI/TIRS (Operational Land Imager/Thermal Infrared Sensor) materials were used, as well as information about forest stands and forest taxation characteristics in the format of a vector layer for taxons within the zone of Siberian silkmoth infestation. The degree of forest stand disturbance was assessed in terms of the relative anomaly of the vegetation index (Δ_{rel} , %) compared with the characteristic background values for three variants of the dominant dark coniferous stands: fir (*Abies sibirica*), Siberian pine (*Pinus sibirica*) and spruce (*Picea obovata*). A transition was made from pixel-by-pixel data to values averaged over taxons and related to dominant tree stands. It is shown that the threshold values of the relative anomaly Δ_{rel} at the level of 10, 25, 50 % make it possible to detail the degree of defoliation according to 5 classes of the state of damaged areas. A conjugated analysis involving forest inventory data made it possible to emphasize the differences in the rate of defoliation features on satellite imagery, as well as to indirectly assess the resistance of the dominant dark coniferous (fir, Siberian pine and spruce stands) to the silkmoth impact, in terms of the portion of the area, with signs of extreme defoliation on final stage of outbreak development in 2020.

Keywords: Siberia, dark coniferous taiga, Siberian silkmoth (*Dendrolimus sibiricus*), satellite data, Landsat, NDVI

Accepted: 25.07.2023

DOI: 10.21046/2070-7401-2023-20-4-175-186

References

1. Bartalev S. A., Ershov D. V., Isaev A. S., Estimation of Forest Defoliation in Multispectral Satellite Images by a Spectral Mixture Decomposition Method, *Issledovanie Zemli iz kosmosa*, 1999, No. 4, pp. 76–86 (in Russian).
2. 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, DOI: 10.1134/S1995425516070118.
3. Im S. T., Fedotova E. V., Kharuk V. I., Spectroradiometer Data in Siberian Silkmouth Outbreak Zone Analysis, *Tekhnika i tekhnologii*, 2008, No. 1, pp. 346–358 (In Russian).
4. Knyazeva S. V., Koroleva N. V., Eidlina S. P., Sochilova E. N., Health of vegetation in the area of mass outbreaks of Siberian moth based on satellite data, *Contemporary Problems of Ecology*, 2019, Vol. 12, No. 7, pp. 743–752, <https://doi.org/10.1134/S1995425519070114>.
5. Kondakov Yu. P., Patterns of mass reproduction of the Siberian silkmouth, *Ecology of Forest Animals in Siberia*, 1974, pp. 206–265 (in Russian).
6. Kharuk V. I., Antamoshkina O. A., Impact of Silkmouth Outbreak on Taiga Wildfires, *Contemporary Problems of Ecology*, 2017, Vol. 10, pp. 556–562, <https://doi.org/10.1134/S1995425517050055>.
7. Creeden E. P., Hicke J. A., Buotte P. C., Climate, weather, and recent mountain pine beetle outbreaks in the western United States, *Forest Ecology and Management*, 2014, Vol. 312, pp. 239–251, <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2013.09.051>.
8. Flø D., Rafoss T., Wendell M., Sundheim L., The Siberian moth (*Dendrolimus sibiricus*), a pest risk assessment for Norway, *Forest Ecosystems*, 2020, Vol. 7, Article 48, <https://doi.org/10.1186/s40663-020-00258-9>.
9. Foster J. R., Townsend P. A., Mladenoff D. J., Spatial dynamics of a gypsy moth defoliation outbreak and dependence on habitat characteristics, *Landscapes Ecology*, 2013, Vol. 28, pp. 1307–1320, <https://doi.org/10.1007/s10980-013-9879-8>.
10. Guha S., Govil H., Land surface temperature and normalized difference vegetation index relationship: A seasonal study on a tropical city, *SN Applied Sciences*, 2020, Vol. 2, Article 1661, <https://doi.org/10.1007/s42452-020-03458-8>.
11. Kharuk V. I., Ranson K. J., Kozuhovskaya A. G. et al., NOAA/AVHRR satellite detection of Siberian silkmouth outbreaks in eastern Siberia, *Intern. J. Remote Sensing*, 2004, Vol. 25, No. 24, pp. 5543–5555, <https://doi.org/10.1080/01431160410001719858>.
12. Kharuk V. I., Im S. T., Soldatov V. V., Siberian silkmouth outbreaks surpassed geoclimatic barrier in Siberian Mountains, *J. Mountain Science*, 2020, Vol. 17, pp. 1891–1900, <https://doi.org/10.1007/s11629-020-5989-3>.
13. Kirichenko N. I., Baranchikov Y. N., Vidal S., Performance of the potentially invasive Siberian moth *Dendrolimus superans sibiricus* on coniferous species in Europe, *Agricultural and Forest Entomology*, 2009, Vol. 11, No. 3, pp. 247–254, <https://doi.org/10.1111/j.1461-9563.2009.00437.x>.
14. Kovalev A., Soukhovolsky V., Analysis of Forest Stand Resistance to Insect Attack According to Remote Sensing Data, *Forests*, 2021, Vol. 12, Article 1188, <https://doi.org/10.3390/f12091188>.
15. Loupian E., Burtsev M., Proshin A. et al., Usage Experience and Capabilities of the VEGA-Science System, *Remote Sensing*, 2022, Vol. 14, Article 77, <https://doi.org/10.3390/rs14010077>.
16. Möykkynen T., Pukkala T., Modelling of the spread of a potential invasive pest, the Siberian moth (*Dendrolimus sibiricus*) in Europe, *Forest Ecosystems*, 2014, Vol. 1, Article 10, <https://doi.org/10.1186/s40663-014-0010-7>.
17. Niinemets Ü., Responses of forest trees to single and multiple environmental stresses from seedlings to mature plants: Past stress history, stress interactions, tolerance and acclimation, *Forest Ecology and Management*, 2010, Vol. 260, No. 10, pp. 1623–1639, DOI: 10.1016/j.foreco.2010.07.054.
18. Pavlov I. N., Litovka Y. A., Golubev D. V., Astapenko S. A., Chromogin P. V., New outbreak of *Dendrolimus sibiricus* tschetv. in Siberia (2012–2017): monitoring, modeling and biological control, *Contemporary Problems of Ecology*, 2018, Vol. 11, No. 4, pp. 406–419, <https://doi.org/10.1134/S1995425518040054>.
19. Soukhovolsky V., Kovalev A., Tarasova O. et al., Wind Damage and Temperature Effect on Tree Mortality Caused by *Ips Typographus* L.: Phase Transition Model, *Forests*, 2022, Vol. 13, Article 180, <https://doi.org/10.3390/f13020180>.

20. Sultson S. M., Goroshko A. A., Verkhovets S. V. et al., Orographic Factors as a Predictor of the Spread of the Siberian Silk Moth Outbreak in the Mountainous Southern Taiga Forests of Siberia, *Land*, 2021, Vol. 10, Article 115, <https://doi.org/10.3390/land10020115>.
21. Teixeira Pinto C., Jing X., Leigh L., Evaluation Analysis of Landsat Level-1 and Level-2 Data Products Using *in situ* Measurements, *Remote Sensing*, 2020, Vol. 12, Article 2597, <https://doi.org/10.3390/rs12162597>.