

УДК 528.88.041.3:632.3

DOI 10.33764/2411-1759-2024-29-2-51-61

Определение состояния темнохвойных лесов, поврежденных энтомовыми вредителями, по спутниковым данным

О. А. Слинкина^{1,2✉}

¹ Научная лаборатория «Защита леса», Сибирский государственный университет науки и технологий им. акад. М. Ф. Решетнева, г. Красноярск, Российская Федерация

² Институт фундаментальной биологии и биотехнологии, г. Красноярск, Российская Федерация
e-mail: sloa@mail.ru

Аннотация. Объектом исследования данной работы являлась вспышка размножения сибирского шелкопряда – опасного энтомового вредителя, поражающего хвойные леса Урала, Сибири и Дальнего Востока. Вспышка наблюдалась в 2018–2020 гг. на территории Ирбейского района Красноярского края и охватила 42 тыс. га темнохвойной тайги. Целью работы являлось изучение возможностей использования спутниковой съемки среднего пространственного разрешения для количественной оценки поврежденных сибирским шелкопрядом деревьев. Для решения поставленной задачи мы рассчитали на основе съемки Sentinel-2 спектральные индексы поврежденных древостоев, такие как NDVI, dNDVI, NBR, dNBR, NDMI, EVI, TCG и сопоставили их с данными наземных измерений. Для связи наземных и спутниковых данных применялись линейные регрессионные модели. В результате работы определен ряд спектральных индексов, позволяющих с высокой точностью определить долю погибших при вспышке размножения сибирского шелкопряда деревьев. Обозначены критерии выбора спутниковых снимков, наилучшим образом подходящих для решения поставленных задач.

Ключевые слова: спутниковая съемка, Sentinel-2, спектральные индексы, энтомовые вредители, сибирский шелкопряд, темнохвойные леса, погибшие лесные насаждения

Введение

Сибирский шелкопряд (*Dendrolimus sibiricus* Tschetv.) – один из наиболее опасных хвое-листогрызущих энтомологических вредителей, поражающих леса Сибири, Дальнего Востока и Урала. Кормовой базой сибирского шелкопряда преимущественно является хвоя пихты, кедра и лиственницы, в меньшей степени – ели и сосны [1–4]. Вспышки массового размножения сибирского шелкопряда ведут к усыханию древостоев на обширных территориях и последующим лесным пожарам, вызывающим гибель не поврежденных насекомыми окружающих лесных насаждений [3, 5, 6]. Климатические изменения, наблюдаемые в последние десятилетия, создают погодные условия, способствующие увеличению частоты и площади вспышек массового размножения сибирского шелкопряда [7–10]. Наиболее крупные вспышки, зафиксированные на территории Сибири за

последние 70 лет, наблюдались в Красноярском крае и Томской области и достигали площади более миллиона гектаров [11, 12]. В 2015–2019 гг. в Красноярском крае наблюдались вспышки размножения сибирского шелкопряда на территории Енисейского (800 тыс. га) [13] и Ирбейского районов (42 тыс. га).

Одним из главных параметров, обуславливающих изменения лесных экосистем, вызванных вспышкой размножения энтомологических вредителей, является доля погибших в лесном насаждении деревьев. Рослесхоз при оценке ущерба, причиненного лесным насаждениям, использует показатель, определяемый как потери стволовой древесины относительно ее общего запаса на единице площади (отпад по запасу, далее – отпад). Отпад влияет на динамику лесовосстановления, видовой состав и структуру древостоя, почвенного покрова [1, 3, 14]. Основываясь на данных об отпаде, можно оценить образовавшиеся запасы лесных горючих мате-

риалов, что позволяет прогнозировать вероятность возникновения лесных пожаров, часто возникающих на нарушенных энтомовредителями территориях [5, 15]. Также информация о доле отпада в лесном насаждении является ключевой при принятии решений о необходимости проведения санитарных рубок [16, 17]. Таким образом, получение количественных оценок состояния нарушенных древостоев важно как с экологической, так и с точки зрения ведения лесного хозяйства, и является элементом системы поддержки принятия управленческих решений хозяйствующими субъектами.

В последние годы активно развивается направление исследований, связанных с дистанционной оценкой состояния лесов, нарушенных энтомовредителями, основанной на съемке различных сенсоров и различных методологических подходах. Согласно обзорному исследованию [18], количество таких работ резко возрастает с 2005 г., и большая их часть (около 60 %) использует данные среднего пространственного разрешения (в основном съемку Landsat). В работах [19–24] показана применимость съемки среднего пространственного разрешения для анализа состояния и оценки смертности деревьев, поврежденных различными видами энтомовредителей.

Съемка Sentinel-2/MSI является относительно новым продуктом на рынке спутниковых данных (программа стартовала в 2015 г.), и в настоящее время является съемкой с самым высоким пространственным и временным разрешением, доступной бесплатно. Изучение возможностей применения съемки

данного спутника для решения задачи количественной оценки состояния древостоев, поврежденных вспышкой массового размножения энтомовредителей, явилось целью нашей работы. Для решения поставленной задачи мы планируем рассчитать ряд спектральных индексов поврежденных древостоев, сопоставить их с данными наземных измерений и найти взаимосвязи.

Объект исследования

Объектом исследования являлась вспышка размножения сибирского шелкопряда на площади 42 тыс. га, наблюдаемая в 2018–2020 гг. на территории Ирбейского района Красноярского края (рис. 1). Вспышка развивалась по классическому сценарию: длилась три года, первые нарушения возникли в августе 2018 г., максимальные повреждения наблюдались в течение лета 2019 г., окончание вспышки – июнь 2020 г.

Поврежденные древостои расположены в междуречье Кана и Агула, в труднодоступном районе, лишенном населенных пунктов, с практически отсутствующей дорожной сетью. Участок относится к Алтае-Саянскому горно-таежному лесному району, характеризуется среднегорным рельефом с высотами 400–800 м над уровнем моря. Леса представлены преимущественно темнохвойными насаждениями с преобладанием пихты и кедра и приурочены к зеленомошным типам леса. По возрастной структуре преобладают спелые и перестойные древостои, средней полноты и бонитета [25, 26].

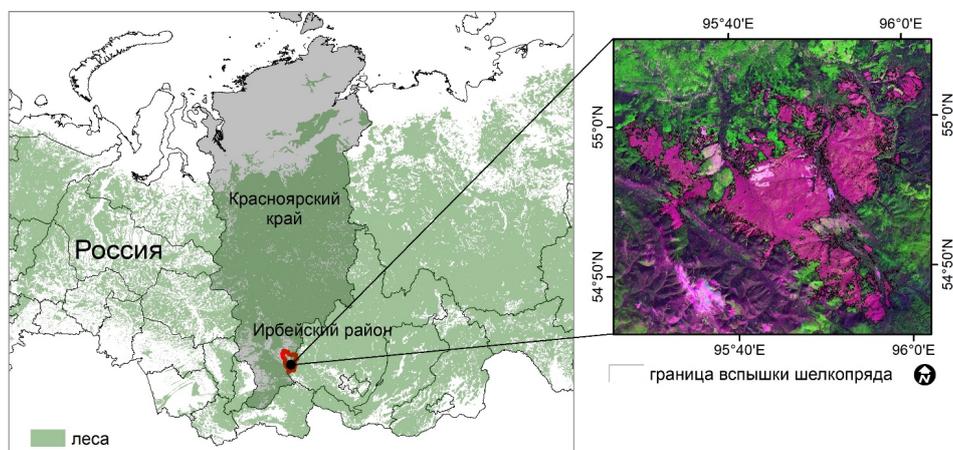


Рис. 1. Местоположение района исследования и границы вспышки размножения сибирского шелкопряда на снимке Sentinel-2 (RGB-композит каналов 12-8-4)

Данные полевых исследований

Для определения отпада в поврежденных шелкопрядом древостоях были проведены полевые исследования, в ходе которых заложены пробные площади. Пробные площади закладывались по методике, разработанной совместно учеными Института леса им. В. Н. Сукачева СО РАН (Красноярск) и Института биогеохимии им. Макса Планка (г. Йена, Германия) [27], и представляли собой круговые площадки постоянного радиуса, в границах которых проводился пересчет живых и погибших деревьев, валежа, давалось описание живого напочвенного покрова, подроста и подлеска.

При выборе участков для закладки пробных площадей мы старались равномерно охватить весь диапазон повреждений – от нескольких процентов до полной гибели древостоя. Центр пробной площади выбирался так, чтобы участок имел одинаковую степень повреждения на расстоянии минимум 2-х радиусов пробной площади от центра. Минимальное расстояние между пробными площадями – 120 м. Пробные площади были заложены на второй и третий год после окончания вспышки (2022, 2023 гг.). Всего в границах объекта исследования по описанной выше методике было заложено 37 пробных площадей.

В процессе камеральной обработки полевых данных были определены таксационные показатели древостоя. При определении отпада использовались данные общего запаса древостоя, запасы сухостоя и валежа первого класса разложения (принимая, что эти деревья погибли при вспышке и вывалились в пятилетний период, к моменту проведения полевых работ). Для каждой пробной площади рассчитаны потери стволовой древесины относительно ее общего запаса, в процентах (отпад).

Спутниковые данные

Границы и площадь территорий, поврежденных сибирским шелкопрядом, определялись по данным продукта «Карта потерь лесов» (Forest cover loss map), программы Global Forest Watch 2000–2022 (Hansen GFW v1.10). Это информационный продукт, осно-

ванный на сериях разновременных снимков Landsat, имеющий пространственное разрешение 30 м, определяющий «потерю леса» как переход лес – не лес в рамках наблюдаемого временного интервала. Производители продукта для зоны бореальных лесов определяют точность пользователя в 88 %, точность производителя 94 % [28].

Состояние поврежденных энтомогенными насаждений определялось на основе данных съемки спутников Sentinel-2A/2B. На борту спутников установлен многоспектральный сканер MSI, ведущий съемку в 12 спектральных каналах, в диапазоне от 420 до 2 200 нм. Каналы сканера MSI охватывают видимую, ближнюю инфракрасную (ИК) и среднюю ИК-зоны электромагнитного спектра.

Снимки были подобраны с учетом возможности оценки состояния древостоев до и после нарушений. Применяемые снимки – ближайшие к периоду вспышки безоблачные изображения, полученные в течение периода вегетации до начала вспышки (июнь 2018 г.) и после ее окончания (август 2020 г. и далее), всего использовано 12 сцен. Все снимки имели уровень обработки Level-2A, который включает радиометрическую, геометрическую и атмосферную коррекцию.

Методы

Применимость спутниковой съемки в оценке состояния растений обусловлена особенностями спектрального отражения (альбедо), меняющегося в зависимости от длины волны и состояния растительности. В видимой части спектра основное влияние на спектральные отражательные свойства растений оказывает хлорофилл. Полосы поглощения хлорофилла лежат в синей (450–480 нм) и красной (660–690 нм) областях спектра и определяют низкое отражение зеленой растительностью в этих частях спектра. В состоянии стресса количество хлорофилла в растениях уменьшается, и следствием этого является уменьшение поглощения (и увеличение отражения) в соответствующих диапазонах спектра. В ближнем ИК-диапазоне наблюдается максимальное отражение для растительности. В определенных частях среднего ИК-

диапазона (1 400, 1 900, 2 500 нм) вода сильно поглощает энергию, и, следовательно, содержание влаги в листьях растений оказывает значимое влияние на отражение в этих диапазонах [29–31].

Значительное количество исследований показало эффективность применения дистанционного зондирования для оценки состояния древостоев после различных нарушений, в частности, для оценки деревьев, погибших вследствие вспышек массового размножения насекомых-вредителей [18–25]. Значения аль-

bedo, полученные по спутниковым данным в различных диапазонах спектра, преобразуют в спектральные индексы, соотносимые далее с состоянием растений.

Исходя из анализа вышеперечисленных работ, были выбраны спектральные индексы NDVI, dNDVI, NBR, dNBR, NDMI, EVI2 [32–37] как наиболее часто используемые для решения такого рода задач. В табл. 1 приведены формулы, применяемые для расчета данных индексов, и используемые каналы спутников Sentinel.

Таблица 1

Формулы расчета используемых спектральных индексов

Индекс	Формула
NDVI	$(NIR - RED) / (NIR + RED)$
dNDVI	$NDVI_{pre} - NDVI_{post}$
NBR	$(NIR - SWIR2) / (NIR + SWIR2)$
dNBR	$NBR_{pre} - NBR_{post}$
NDMI	$(NIR - SWIR1) / (NIR + SWIR1)$
EVI2	$2,5(NIR - RED) / (NIR + 2,4RED + 1)$

Для всех используемых в работе снимков были рассчитаны индексы, приведенные в табл. 1. Значения индексов извлечены для точек, соответствующих координатам центров пробных площадей. Построены линейные регрессионные модели, связывающие значения индексов, рассчитанных по спутниковым данным, с отпадом, измеренным в ходе полевых работ. Для оценки качества регрессионных моделей определены коэффициенты детерминации R^2 и уровни значимости. Регрессионная модель с наиболее высоким значением R^2 использована для пересчета значений индекса в значения отпада для всей нарушенной территории.

Результаты

Практически все использованные нами индексы показали высокие уровни корреляции с полевыми измерениями отпада для снимков, полученных сразу после окончания вспышки. Коэффициенты детерминации R^2 и уровни значимости для линейной регрессии между индексами, рассчитанными по спутниковым данным, и полевыми измерениями отпада приведены в табл. 2. Знаком * в таблице выделены максимальные значения R^2 каждого индекса. Всем рассчитанным индексам соответствуют уровни значимости $p < 0,001$, что говорит о высокой достоверности результатов и низкой вероятности случайности полученных регрессионных моделей.

Наиболее высокое значение R^2 между спутниковыми и наземными данными показал индекс NBR, рассчитанный для снимка 22 сентября 2020 г. Полученная для этого индекса линейная регрессионная модель была использована для пересчета значений индекса в значения отпада. В результате пересчета для каждого пикселя спутникового изображения размером 10×10 м, находящегося в границах вспышки размножения сибирского шелкопряда, определен отпад. Полученная карта отпада показана на рис. 2.

Таблица 2

Коэффициенты детерминации R^2 и уровни значимости для линейной регрессии между индексами и полевыми измерениями

Дата съемки / индекс	NDVI	dNDVI	NBR	dNBR	NDMI	EVI2
10.08.2020	0,617	0,632	0,722	0,714	0,711	0,578
22.09.2020	0,802*	0,815*	0,853*	0,846*	0,85*	0,773*
01.06.2021	0,51	0,579	0,629	0,675	0,605	0,541
04.07.2021	0,558	0,609	0,673	0,678	0,633	0,353
28.08.2021	0,733	0,747	0,824	0,822	0,821	0,613
17.10.2021	0,68	0,701	0,582	0,547	0,542	0,65
12.05.2022	0,648	0,663	0,768	0,784	0,765	0,694
11.06.2022	0,726	0,731	0,739	0,754	0,712	0,44
08.08.2022	0,765	0,763	0,785	0,771	0,783	0,57
19.09.2022	0,703	0,693	0,827	0,826	0,833	0,756
16.06.2023	0,648	0,652	0,653	0,631	0,679	0,413
25.08.2023	0,682	0,675	0,794	0,775	0,772	0,567

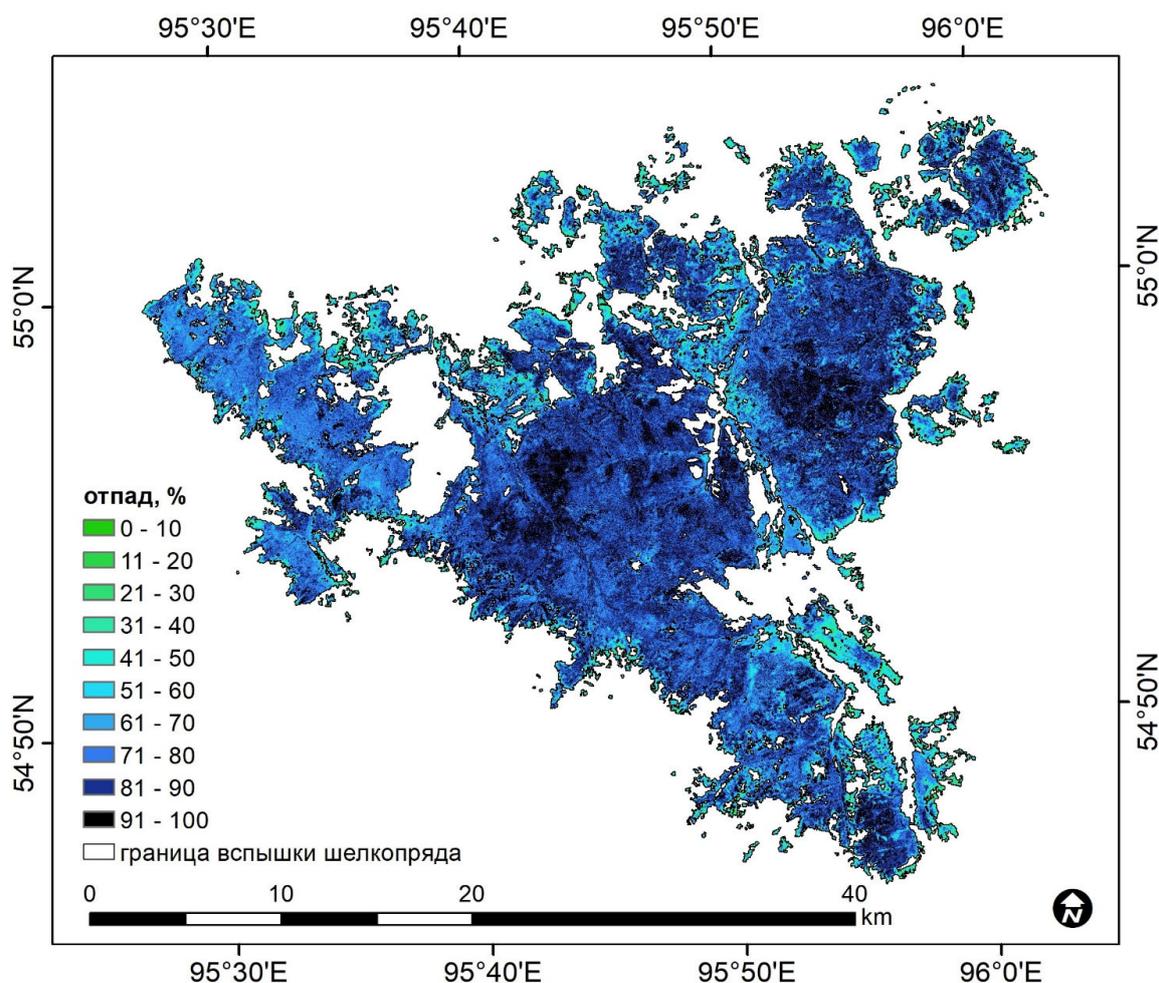


Рис. 2. Карта отпада, рассчитанная по индексу NBR

Площади, занимаемые древостоями с разными значениями отпада, приведены на рис. 3. Данные сгруппированы в классы с шагом в 10 % по отпаду, на диаграмме приведены абсолютные значения площадей в гектарах, а также доля относительно общей площади вспышки, занятая каждым классом (выделена синим цветом). Из диаграммы следует, что преобладающая часть нарушенной шелкопрядом площади имеет высокий процент гибели лесных насаждений. Так, на 80 % территории вспышки отпад составил более 60 % запасов стволовой древесины.

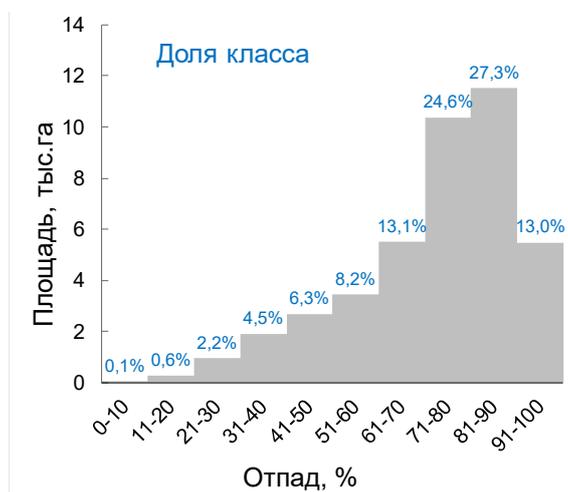


Рис. 3. Площади, занимаемые древостоями с разными значениями отпада

Выводы

Наиболее высокие корреляции между спутниковыми данными и наземными измерениями отпада наблюдаются для индексов, рассчитанных по снимкам, полученным сразу после окончания вспышки шелкопряда. Это объясняется тем, что вскоре после гибели древостоя травяно-кустарничковый ярус начинает получать гораздо больше солнечного света и влаги, происходит его бурный рост, что вносит существенный вклад в увеличение значений фотосинтетической активности на нарушенных территориях уже на следующий год после гибели древостоя [1, 6]. Теми же причинами скорее всего можно объяснить, почему корреляции для снимков начала и конца вегетационного периода выше, чем для середины: отсутствие вклада травяно-кустарничкового яруса в значения альбедо позволяет точнее оценить состояние древостоя.

Значения индексов, рассчитанных по данным ближнего и среднего ИК-диапазона, лучше коррелируют с наземными данными, чем индексы, рассчитанные по видимым и ближним ИК-диапазонам. Таким образом,

значения R^2 между спутниковыми и наземными данными для индексов NBR, dNBR, NDMI в среднем выше, чем для индексов NDNI, dNDVI, EVI2.

Также выявлено, что использование пары изображений до/после вспышки не приводит к увеличению корреляции по сравнению с одиночными снимками, полученными сразу после окончания вспышки.

В целом наблюдается тенденция, при которой с увеличением времени, прошедшего между нарушением и датой съемки, корреляция между спутниковыми данными и полевыми измерениями отпада уменьшается.

Основываясь на результатах данной работы, планируется провести оценки эмиссий углерода, происходящие при деструкции погибших деревьев, что является важной задачей в аспекте изучения цикла углерода и глобального изменения климата. Помимо этого, результаты работы могут применяться в лесном хозяйстве в качестве информационной основы при принятии решений о необходимости проведения противопожарных мероприятий, санитарных рубок, искусственного лесовосстановления и т. п. на поврежденных шелкопрядом территориях.

Работа выполнена в рамках государственного задания Министерства науки и высшего образования РФ, проект «Эффективные оценки современных климатических и экологических рисков для Центральной Сибири: Эко-Климатический Центр» (№ FSRZ-2023-007).

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Коломиец Н. Г. Сибирский шелкопряд – вредитель равнинной тайги // Тр. по лесному хозяйству Западной Сибири. Вып. 3 : Экономика лесного хозяйства, лесоведение, лесоводство и агролесомелиорация. – Новосибирск, 1957. – С. 61–76.
2. Кондаков Ю. П. Закономерности массовых размножений сибирского шелкопряда // Экология популяций лесных животных Сибири. – Новосибирск : Наука. Сиб. отд-ние, 1974. – С. 206–265.
3. Гродницкий Д. Л. Сибирский шелкопряд и судьба пихтовой тайги // Природа. – 2004. – № 11. – С. 49–56.
4. Павлов И. Н., Литовка Ю. А., Голубев Д. В., Астапенко С. А., Хромогин П. В. Новая вспышка массового размножения *Dendrolimus sibiricus* Tschetv. в Сибири (2012–2017 гг.): закономерности развития и перспективы биологического контроля // Сибирский экологический журнал. – 2018. – Т. 25, № 4. – С. 462–478.
5. Харук В. И., Антамошкина О. А. Воздействие сибирского шелкопряда на горимость лесных территорий // Сибирский экологический журнал. – 2017. – Т. 24, № 5. – С. 647–654.
6. Фуряев В. В. Шелкопрядники тайги и их выжигание. – М. : Наука, 1966. – 92 с.
7. Исаев А. С., Пальникова Е. Н., Суховольский В. Г., Тарасова О. В. Динамика численности лесных насекомых филофагов: модели и прогнозы. – М. : Тов-во науч. изд. КМК, 2015. – 262 с.
8. Isaev A. S., Soukhovolsky V. G., Tarasova O. V., Palnikova E. N., Kovalev A. V. Forest insect population dynamics, outbreaks and global warming effects. – New York : Wiley, 2017. – 304 p.
9. Суховольский В. Г., Ковалев А. В., Пальникова Е. Н., Тарасова О. В. Моделирование рисков воздействия насекомых на лесные насаждения при возможных климатических изменениях // Компьютерные исследования и моделирование. – 2016. – Т. 8, № 2. – С. 241–253.
10. Demidko D. A., Goroshko A. A., Slinkina O. A., Mikhaylov P. V., Sultson S. M. The Role of Forest Stands Characteristics on Formation of Exterior Migratory Outbreak Spots by the Siberian Silk Moth *Dendrolimus sibiricus* (Tschetv.) during Population Collapse // Forests. – 2023. – Vol. 14(6). – P. 1078. – DOI 10.3390/f14061078.
11. Кондаков Ю. П. Массовые размножения сибирского шелкопряда в лесах Красноярского края // Энтомологические исследования в Сибири. Вып. 2. – Красноярск : РЭО, 2002. – С. 25–74.
12. Эпова В. И., Плешанов А. С. Зоны вредоносности насекомых-филофагов Азиатской России. – Новосибирск : Наука. Сиб. изд. фирма РАН, 1995. – 147 с.
13. 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.
14. Franklin J. F., Lindenmayer D. B., MacMahon J. A., McKee A., Magnusson J., Perry D. A., et al. Threads of continuity: Ecosystems disturbances, biological legacies, and ecosystem recovery // Conservation Biology in Practice. – 2000. – Vol. 1. – P. 8–17.
15. Валендик Э. Н., Верховец С. В., Киселяхов Е. К., Лантух А. Ю. Роль шелкопрядников в горимости лесов Нижнего Приангарья // Лесное хозяйство. – 2004. – № 6. – С. 27–29.
16. Jonasova, M., Prach, K. The influence of bark beetles outbreak vs. salvage logging on ground layer vegetation in Central European mountain spruce forests // Biological Conservation. – 2008. – Vol. 14. – P. 1525–1535.
17. Niemela, J. Management in relation to disturbance in the boreal forest // Forest Ecology and Management. – 1999. – Vol. 115. – P. 127–134.

18. 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. – P. 49–60.
19. Meng R., Gao R., Zhao F., Huang C., Sun R., Lv Z., Huang Z. Landsat-based monitoring of southern pine beetle infestation severity and severity change in a temperate mixed forest // *Remote Sensing of Environment*. – 2022. – Vol. 269. – P. 112847.
20. Pasquarella V., Bradley B., Woodcock C. Near-real-time monitoring of insect defoliation using Landsat time series // *Forests*. – 2017. – Vol. 8. – P. 275.
21. Havasova M., Bucha T., Ferencik J., Jakus R. Applicability of a vegetation indices-based method to map bark beetle outbreaks in the High Tatra Mountains // *Annals of Forest Research*. – 2015. – Vol. 58. – P. 295–310.
22. 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. – P. 49–58.
23. Meigs G. W., Kennedy R. E., Cohen W. B. A Landsat time series approach to characterize bark beetle and defoliator impacts on tree mortality and surface fuels in conifer forests // *Remote Sensing of Environment*. – 2011. – Vol. 115. – P. 3707–3718.
24. Hart S. J., Veblen T. T. Detection of spruce beetle-induced tree mortality using high- and medium-resolution remotely sensed imagery // *Remote Sensing of Environment*. – 2015. – Vol. 168. – P. 134–145.
25. Смагин В. Н., Ильинская С. А., Назимова Д. И., Новосельцева И. Ф., Чередникова Ю. С. Типы лесов гор Южной Сибири. – Новосибирск : Наука, 1980. – 336 с.
26. Поликарпов Н. П., Чебакова Н. М., Назимова Д. И. Климат и горные леса Южной Сибири. – Новосибирск : Наука, 1986. – 227 с.
27. Schulze E.-D., Heimann M., Harrison S., Holland E., Lloyd J. *Global Biogeochemical Cycles in the Climate System*. – Jena : Academic Press, 2010. – P. 345.
28. Hansen M. C., Potapov P. V., Moore R., Hancher M., Turubanova S. A., Tyukavina A., Thau D., Stehman S. V., Goetz S. J., Kommareddy A., Egorov A., Chini L., Justice C. O., Townshend J. R. G. High-resolution global maps of 21st-century forest cover change // *Science*. – 2013. – Vol. 342 (6160). – P. 850–853.
29. Дейвис Ш., Ландгребе Д. А., Филипс Т. Л. Дистанционное зондирование: количественный подход / под ред. Ф. Свейна и Ш. Дейвис ; пер. с англ. – М. : Недра, 1983. – 415 с.
30. Выгодская И. Н., Горшкова И. И. Теория и эксперимент в дистанционных исследованиях растительности. – М. : Гидрометеиздат, 1987. – 246 с.
31. Кронберг П. Дистанционное изучение Земли. – М. : Мир, 1988. – 350 с.
32. Tucker C. J. Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation // *Remote Sensing of Environment*. – 1979. – Vol. 8. – P. 127–150.
33. Zhu Z., Key C., Ohlen D., Benson N. Evaluate sensitivities of burn severity mapping algorithms for different ecosystems and fire histories in the United States // *Final Report to the Joint Fire Science Program, Project JFSP 01-1-4-12*. – 2006. – P. 35.
34. Key C. H., Benson N., Ohlen D., Howard S., McKinley R., Zhu Z. The normalized burn ratio and relationships to burn severity: ecology, remote sensing and implementation // *Proceedings of the Ninth Forest Service Remote Sensing Applications Conference. American Society for Photogrammetry and Remote Sensing, Bethesda, MD, 2002*.
35. Key C. H. Ecological and sampling constraints on defining landscape fire severity // *Fire Ecology*. – 2006. – No. 2 (2). – P. 34–59.
36. 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. – P. 257–266.
37. Jiang Z., Huete A. R., Didan K., Miura T. Development of a two-band enhanced vegetation index without a blue band // *Remote Sensing of Environment*. – 2008. – Vol. 112 (10). – P. 3833–3845.

Об авторах

Ольга Александровна Слинкина – старший научный сотрудник, Научная лаборатория «Защита леса», Сибирский государственный университет науки и технологий им. акад. М. Ф. Решетнева; старший научный сотрудник, Институт фундаментальной биологии и биотехнологии, Сибирский федеральный университет.

Получено 08.11.2023

© О. А. Слинкина, 2024

Determining the state of dark coniferous forests damaged by insect pests according to satellite data

O. A. Slinkina^{1,2}✉

¹ Reshetnev Siberian State University of Science and Technology, Krasnoyarsk, Russian Federation

² Siberian Federal University, Krasnoyarsk, Russian Federation

e-mail: sloa@mail.ru

Abstract. The object of the study was an outbreak of the Siberian silkworm – a dangerous insect, affecting coniferous forests of Urals, Siberia and the Far East. The Siberian silkworm outbreak was observed in 2018-2020 on the territory of the Irbeysky district of the Krasnoyarsk Krai, and covered 42 thousand hectares of dark conifer taiga forests. Our research was aimed at analyzing the possibilities of using satellite data of medium spatial resolution to quantify Siberian silkworm damage to forest stands. To achieve this aim, we compared spectral indices, such as NDVI, dNDVI, NBR, dNBR, NDMI, EVI, TCG, based on albedo of forest vegetation received from Sentinel-2 imagery with field measurements. Linear regression models were built that connect the values of indices calculated from satellite data with ground truth data. As a result, a number of spectral indices were identified that enable one to accurately estimate the percentage of dead trees over Siberian silkworm outbreak. The searching criteria for satellite images used for these tasks are determined.

Keywords: satellite data, Sentinel-2, spectral indices, insect pests, Siberian silkworm, dark coniferous forests, dead forest stands

REFERENCES

1. Kolomiets, N. G. (1957). Siberian silkworm – a pest of the lowland taiga. In *Trudy po lesnomu khozyaystvu Zapadnoy Sibiri [Proceedings on Forestry of Western Siberia]*, 3, 61–76 [in Russian].
2. Kondakov, Y. P. (1974). Mass reproduction of Siberian silk moth. In *Ekologiya populyatsiy lesnykh zivotnykh Sibiri [Population Ecology of Forest Animals in Siberia]* (pp. 206–264). Novosibirsk: Nauka. Siberian branch Publ. [in Russian].
3. Grodnitsky, D. L. (2004). Siberian silkworm and the fate of fir taiga. *Priroda [Nature]*, 11, 49–56 [in Russian].
4. Pavlov, I. N., Litovka, Y. A., Golubev, D. V., Astapenko, S. A., & Chromogin, P. V. (2018). New outbreak of *Dendrolimus sibiricus* tschetv. in Siberia (2012–2017): Monitoring, modeling and biological control. *Contemporary Problems of Ecology*, 11, 406–419.
5. Kharuk, V. I., & Antamoshkina, O. A. (2017). Impact of Silkworm Outbreak on Taiga Wildfires. *Contemporary Problems of Ecology*, 10, 556–562.
6. Furyaev, V. V. (1966). *Shelkopryadniki taygi i ikh vyzhiganie [Forests that Died after Siberian Silk Moth Outbreaks and Their Prescribed Burning]*. Moscow: Nauka Publ., 92 p. [in Russian].

7. Isaev, A. S., Palnikova, E. N., Sukhovolsky, V. G., & Tarasova, O. V. (2015). *Dinamika chislennosti lesnykh nasekomykh fillofagov: modeli i prognozy [Population Dynamics of Defoliating Forest Insects: Models and Forecasts]*. Moscow: KMK Scientific Press Ltd., p. 262 [in Russian].
8. Isaev, A. S., Soukhovolsky, V. G., Tarasova, O. V., Palnikova, E. N., & Kovalev, A. V. (2017). *Forest insect population dynamics, outbreaks and global warming effects*. New York: Wiley, 304 p.
9. Soukhovolsky, V. G., Kovalev, A. V., Palnikova, E. N., & Tarasova, O. V. (2016). Modelling the risk of insect impacts on forest stands after possible climate changes. *Komp'yuternye issledovaniya i modelirovanie [Computer Studies and Modelling]*, 8(2), 241–253. DOI 10.20537/2076-7633-2016-8-2-241-253 [in Russian].
10. Demidko, D. A., Goroshko, A. A., Slinkina, O. A., Mikhaylov, P. V., & Sultson, S. M. (2023). The Role of Forest Stands Characteristics on Formation of Exterior Migratory Outbreak Spots by the Siberian Silk Moth *Dendrolimus sibiricus* (Tschetv.) during Population Collapse. *Forests*, 14(6), P. 1078. DOI 10.3390/f14061078.
11. Kondakov, Y. P. (2002). The outbreaks of Siberian silk moth in Krasnoyarsk krai forests. In *Entomologicheskie issledovaniya v Sibiri. Vyp. 2. [Entomological Researches in Siberia: Issue 2]* (pp. 25–74). Krasnoyarsk: REO Publ. [in Russian].
12. Epova, V. I., & Pleshanov, A. S. (1995). *Zony vredonosnosti nasekomykh-fillofagov Aziatskoy Rossii [Zones of severity of phyllophagous insects in Asian Russia]*. Novosibirsk: Nauka. Siberian RAS Publ., 147 p. [in Russian].
13. Kharuk, V. I., Im, S. T., & Yagunov, M. N. (2018). Migration of the Northern Boundary of the Siberian Silk Moth. *Contemporary Problems of Ecology*, 11, 26–34. DOI 10.1134/S1995425518010055.
14. Franklin, J. F., Lindenmayer, D. B., MacMahon, J. A., McKee, A., Magnusson, J., Perry, D. A., Waide, R., & Foster, D. (2000). Threads of continuity: Ecosystems disturbances, biological legacies, and ecosystem recovery. *Conservation Biology in Practice*, 1, 8–17.
15. Valendik, E. N., Verkhovets, S. V., Kisilyakhov, E. K., & Lantukh, A. Yu. (2004). The role of forests damaged by the Siberian silkmoth in forest fires in the Lower Angara region. *Lesnoe khozyaystvo [Forest Management]*, 6, 27–29 [in Russian].
16. Jonasova, M., & Prach, K. (2008). The influence of bark beetles outbreak vs. salvage logging on ground layer vegetation in Central European mountain spruce forests. *Biological Conservation*, 14, 1525–1535.
17. Niemela, J. (1999). Management in relation to disturbance in the boreal forest. *Forest Ecology and Management*, 115, 127–134.
18. Senf, C., Seidl, R., & Hostert, P. (2017). Remote sensing of forest insect disturbances: Current state and future directions. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 60, 49–60.
19. Meng, R., Gao, R., Zhao, F., Huang, C., Sun, R., Lv, Z., & Huang, Z. (2022). Landsat-based monitoring of southern pine beetle infestation severity and severity change in a temperate mixed forest. *Remote Sensing of Environment*, 269, P. 112847.
20. Pasquarella, V., Bradley, B., & Woodcock, C. (2017). Near-real-time monitoring of insect defoliation using Landsat time series. *Forests*, 8, P. 275.
21. Havasova, M., Bucha, T., Ferencik, J., & Jakus, R. (2015). Applicability of a vegetation indices-based method to map bark beetle outbreaks in the High Tatra Mountains. *Annals of Forest Research*, 58, P. 295–310.
22. Meddens, A. J. H., Hicke, J. A., Vierling, L. A., & Hudak, A. T. (2013). Evaluating methods to detect bark beetle-caused tree mortality using single-date and multi-date Landsat imagery. *Remote Sensing of Environment*, 132, P. 49–58.
23. Meigs, G. W., Kennedy, R. E., & Cohen, W. B. (2011). A Landsat time series approach to characterize bark beetle and defoliator impacts on tree mortality and surface fuels in conifer forests. *Remote Sensing of Environment*, 115, 3707–3718.

24. Hart, S. J., & Veblen, T. T. (2015). Detection of spruce beetle-induced tree mortality using high- and medium-resolution remotely sensed imagery. *Remote Sensing of Environment*, 168, 134–145.
25. Smagin, V. N., Ilinskaya, S. A., Nazimova, D. I., Novoseltseva, I. F., & Cherednikova, J. S. (1980). *Tipy lesov gor Yuzhnoy Sibiri [Forest Types of Mountains of Southern Siberia]*. Novosibirsk: Nauka Publ., 336 p. [in Russian].
26. Polikarpov, N. P., Chebakova, N. M., & Nazimova, D. I. (1986). *Klimat i gornye lesa Yuzhnoy Sibiri [Climate and Mountain Forests in Southern Siberia]*. Novosibirsk: Nauka Publ., 227 p. [in Russian].
27. Schulze, E.-D., Heimann, M., Harrison, S., Holland, E., & Lloyd, J. (2010). *Global Biogeochemical Cycles in the Climate System*. Jena: Academic Press, P. 345.
28. Hansen, M. C., Potapov, P. V., Moore, R., Hancher, M., Turubanova, S. A., Tyukavina, A., Thau, D., Stehman, S. V., Goetz, S. J., Kommareddy, A., Egorov, A., Chini, L., Justice, C. O., & Townshend, J. R. G. (2013). High-resolution global maps of 21st-century forest cover change. *Science*, 342(6160), 850–853.
29. Davis, S. M., Landgrebe, D. A., Phillips, T. L., Swain, P. H., Hoffer, R. M., Lindenlaub, J. C., & Silva, L. F. (1978). *Remote Sensing: The Quantitative Approach*. USA, New York: McGraw-Hill International Book Co.
30. Vygodskaya, I. N., & Gorshkova, I. I. (1987). *Teoriya i eksperiment v distantsionnykh issledovaniyakh rastitel'nosti [Theory and experiment in remote-sensing studies of vegetation]*. Moscow: Gidrometeoizdat Publ., 246 p. [in Russian].
31. Kronberg, P. (1988). *Distantsionnoe izuchenie Zemli [Remote Sensing Study of the Earth]*. Moscow: Mir Publ., 350 p. [in Russian].
32. Tucker, C. J. (1979). Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation. *Remote Sensing of Environment*, 8, 127–150.
33. Zhu, Z., Key, C., Ohlen, D., & Benson, N. (2006). Evaluate sensitivities of burn severity mapping algorithms for different ecosystems and fire histories in the United States. *Final Report to the Joint Fire Science Program, Project JFSP 01-1-4-12*, P. 35.
34. Key, C. H., Benson, N., Ohlen, D., Howard, S., McKinley, R., & Zhu, Z. (2002). The normalized burn ratio and relationships to burn severity: ecology, remote sensing and implementation. *Proceedings of the Ninth Forest Service Remote Sensing Applications Conference. American Society for Photogrammetry and Remote Sensing, Bethesda, MD*.
35. Key, C. H. (2006). Ecological and sampling constraints on defining landscape fire severity. *Fire Ecology*, 2(2), 34–59.
36. Gao, B.-C. (1996). NDWI – A normalized difference water index for remote sensing of vegetation liquid water from space. *Remote Sensing of Environment*, 58, 257–266.
37. Jiang, Z., Huete, A. R., Didan, K., & Miura, T. (2008). Development of a two-band enhanced vegetation index without a blue band. *Remote Sensing of Environment*, 112(10), 3833–3845.

Author details

Olga A. Slinkina – Senior Researcher, Scientific Laboratory of Forest Health, Reshetnev Siberian State University of Science and Technology; Senior Researcher, Institute of Fundamental Biology and Biotechnology, Siberian Federal University.

Received 08.11.2023

© O. A. Slinkina, 2024