

УДК 630\*57:630\*453:528.855

## АНАЛИЗ УСТОЙЧИВОСТИ ЛЕСНЫХ НАСАЖДЕНИЙ К ПОВРЕЖДЕНИЯМ СИБИРСКИМ ШЕЛКОПРЯДОМ ПО ДАННЫМ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ

А. В. Ковалев

Федеральный исследовательский центр «Красноярский научный центр СО РАН»  
660036, Красноярск, Академгородок, 50

E-mail: sunhi.prime@gmail.com

Поступила в редакцию 16.04.2021 г.

Для оценки состояния насаждений на обширных территориях бореальных лесов необходимы современные методы, позволяющие оперативно получать информацию с минимальными трудозатратами. Существующие методы связаны с трудоемкими наземными обследованиями либо позволяют на основе дистанционных данных (спутниковые, авиационные методы наблюдения) измерить уже свершившийся ущерб. В работе предложен метод оценки чувствительности древостоев к возможным повреждениям насекомыми-вредителями на основе данных дистанционного зондирования земли. В качестве индикатора состояния насаждений использован показатель восприимчивости вегетативного индекса растительности в течение сезона (NDVI) к изменению радиационной температуры территории (LST), получаемый по спутниковым данным системы Terra/Aqua. Он рассчитан как передаточная спектральная функция отклика в интегральном уравнении, связывающем изменения NDVI и LST и показывает не столько повреждение древостоя, сколько нарушение протекающих в нем биологических процессов. Анализ проведен для пихтовых насаждений таежной зоны Красноярского края двух типов – территории, на которых с 2015 г. реализовалась сильная вспышка массового размножения сибирского шелкопряда (*Dendrolimus sibiricus* Tschetv.) с практически 100%-й дефолиацией древостоев, и соседние неповрежденные участки. Установлено, что показатель восприимчивости насаждения к изменениям окружающей среды на изучаемых пробных площадях значительно изменился за 2–3 года до резкого подъема плотности популяции насекомого-вредителя и может в дальнейшем учитываться при оценке риска возникновения вспышек. Это отличает предложенный показатель от оценок состояния растительного покрова, которые регистрируют существенную дефолиацию древостоев и не могут использоваться при прогнозе.

**Ключевые слова:** лесные насекомые, оценка состояния леса, вспышки массового размножения, наземные методы ДЗЗ.

DOI: 10.15372/SJFS20210508

### ВВЕДЕНИЕ

Контроль и мониторинг состояния насаждений в лесах бореальной зоны крайне затруднителен в связи с большими размерами и труднодоступностью лесных территорий. Одним из основных факторов ослабления древостоев являются вспышки массового размножения насекомых. Значительные экономические и экологические потери при усыхании и гибели лесов делают крайне важным оценку текущего состояния и устойчивости насаждений к атакам насекомых-вредителей (Lewis et al., 2010; Nelson et al., 2013). Не менее важен краткосрочный прогноз ситуации на ближайшие годы. К сожалению,

оценки по визуальным признакам (состоянию кроны, повреждениям стволов) появляются на тех этапах повреждений, когда управление состоянием этих насаждений становятся практически невозможным.

Единственной реальной возможностью анализа состояния насаждений на больших площадях (таких как таежные территории) является использование данных дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ). В настоящий момент такие исследования используются в основном для оценки нанесенного ущерба. При этом одним из основных методов, используемых при анализе, является измерение различных вариантов вегетационного индекса растительности, осно-

ванного на разнице отражения красного и ближнего инфракрасного излучения (Tucker, Sellers, 1986). Такой индекс достоверно и оперативно показывает деградацию кроны деревьев в ходе развития вспышки массового размножения насекомых. В то же время ослабление древостоев, снижение химического противодействия насекомым развивается в течение нескольких лет до начала резкого подъема численности вредителя. Таким образом, получаемая оценка состояния запаздывает на 2–3 года.

Вегетационный индекс позволяет оценить продуктивность и физиологические свойства растительной компоненты экосистемы (Rechid et al., 2009; Liu et al., 2017) и представляет собой спектральный индикатор фотосинтеза и интенсивности метаболизма растений (Bayarjargal et al., 2006; Cunha, Richter, 2014). При изучении динамики вегетационных индексов растительного покрова рассматриваются как внутригодовые, так и межгодовые изменения, связанные с изменчивостью климата (Jacquin et al., 2010; Nelson et al., 2013).

Данные ДЗЗ широко используются для картирования пространственной динамики очагов вспышек насекомых (Verbesselt et al., 2012; Liang et al., 2014; Senf et al., 2017). Основная цель таких исследований – оценка ущерба, нанесенного вспышкой, и расчет площади потери (Lewis et al., 2010; Kovalev et al., 2020). Вместе с тем попытки использовать данные дистанционного зондирования для оценки состояния (и, самое главное, устойчивости) лесных насаждений к внешним воздействиям не приводят к успеху (Spruce et al., 2011; Thayne, 2013; Olsson et al., 2016).

Разработка таких методов необходима, так как важно определить районы будущих вспышек насекомых, по крайней мере, за один или два сезона до начала повреждения. Такая информация может улучшить прогнозы будущих воздействий и позволит заблаговременно разработать эффективные профилактические меры по снижению потерь в насаждениях.

## МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

В настоящей работе делается попытка перейти от количественных измерений биомассы растений по показателям абсолютных значений NDVI к оценке реакции фотосинтезирующего аппарата на изменения состояния окружающей среды. Входные и выходные параметры для та-

кой модели могут быть получены одновременно по данным ДЗЗ и быть синхронизированы по времени и месту наблюдения.

На сегодняшний день существует достаточно отечественных и зарубежных спутниковых комплексов, которые помогают получить оперативные данные о характеристиках окружающей среды на локальной площади. Ключевыми факторами выбора такой системы являются периодичность получения данных ДЗЗ, достаточное пространственное разрешение, наличие необходимых спектральных, оптических и лидарных каналов передачи данных. Выбор был сделан в пользу спутников Terra/Aqua, действующих в рамках программы NASA EOS (Earth Observing System), оборудование которых в достаточной степени дублируется, что позволяет восстанавливать получаемую информацию, убирая атмосферные помехи для одного из спутников. Исходные данные ДЗЗ с этих спутников доступны для свободного скачивания на сервере NASA. Основным прибором сбора необходимой информации на спутнике является спектрорадиометр среднего разрешения MODIS (MODIS..., 2021).

Вычленение необходимых показателей для выбранной координаты из сырых данных ДЗЗ представляет собой технически сложную ГИС-задачу. Для выбранных продуктов существует серверное программное решение Application for Extracting and Exploring Analysis Ready Samples (AppEARS..., 2021). В рамках запроса к базе данных указываются тип используемого продукта (исходный или расчетный показатель), набор координат мест наблюдения, временной период. Результат формируется также на сервере NASA и может быть скачен в виде текстового файла.

Для получения характеристики состояния насаждений предложено использовать показатель восприимчивости вегетационного индекса растительности (NDVI) в течение сезона к изменению радиационной температуры территории (LST).

Для анализа использованы следующие продукты системы Terra/Aqua:

- MOD11A1 и MYD11A1, содержащие информацию о температуре подстилающей поверхности LST. Этот показатель хорошо коррелирует с данными ежедневных метеонаблюдений температуры воздуха. Пространственное разрешение  $1 \times 1$  км;

- исходные спектральные каналы `sur_refl_b01` (красный) и `sur_refl_b02` (ближний инфракрасный) для расчета вегетативного индекса NDVI, содержащиеся в продуктах MOD09Q1 и

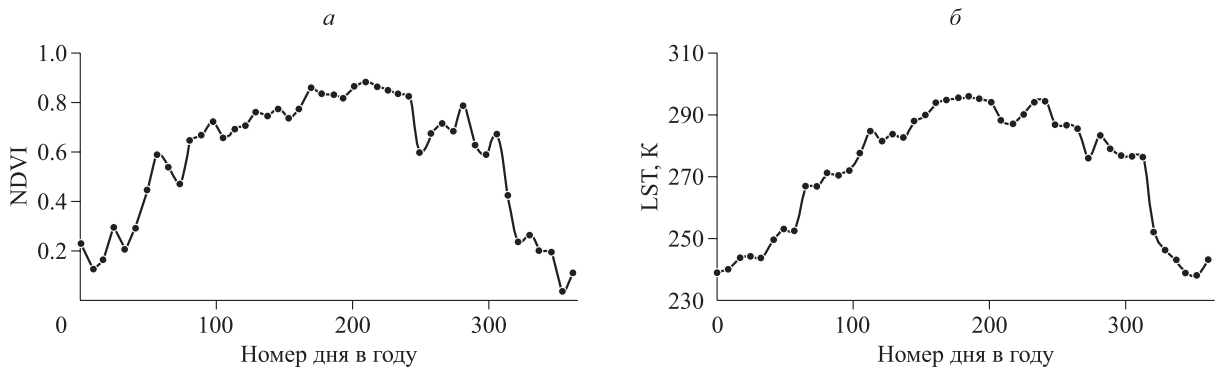


Рис. 1. Типичный временной ряд годичной динамики NDVI (а) и LST (б) (2010 г., площадка № 12).

MYD09Q1. Они представляют собой 8-дневный композит (очищенные и селектированные данные за период в 8 дней). Пространственное разрешение –  $250 \times 250$  м.

Показатели NDVI успешно используются для различных оценок состояния и изменений в растительном покрове, поскольку значения NDVI связаны с фотосинтетически активным излучением. В данной работе показатель NDVI вычисляется по стандартной формуле:

$$NDVI = \frac{NIR - RED}{NIR + RED}, \quad (1)$$

где NIR и RED – нормализованные значения интенсивности отражения в ближнем инфракрасном и красном диапазонах спектра для данной точки земной поверхности (каналы `sur_refl_b02` и `sur_refl_b01` продуктов MOD09Q1 и MYD09Q1).

Типичные временные ряды годичной динамики NDVI и LST приведены на рис. 1.

Поскольку рост и состояние кроны деревьев существенно зависят от температуры окружающей среды, то анализ связей между NDVI и LST позволит оценить адаптивный ресурс деревьев в насаждении. При описании данной связи для отдельного года первую переменную можно рассматривать как входную, а вторую – как выходную. При этом необходимо учитывать возможное запаздывание отклика NDVI на изменение LST, тогда такая запаздывающая связь может быть описана с помощью интегрального уравнения Фредгольма, связывающее изменение сезонной динамики  $\Delta NDVI$  с изменением  $\Delta LST$  (Морс, Фешбах, 1960; Макс, 1983; Краснов и др., 2003):

$$\Delta NDVI(t) = \int_0^t h(\tau) \Delta LST(t - \tau) d\tau, \quad (2)$$

где  $h(\tau)$  – ядро интегрального уравнения (функция отклика), характеризующее реакцию систе-

мы на воздействие (Мармарелис П., Мармарелис В., 1981). В данном случае в (2) известны изменения  $\Delta NDVI$  фотосинтетического индекса и  $\Delta LST$  температуры поверхностного слоя и для такой системы с заданным входом и выходом можно найти функцию  $h(\tau)$ , которую следует рассматривать как характеристику системы (Мармарелис П., Мармарелис В., 1981).

Решение этой обратной задачи может быть найдено в спектральной области (Ким, 2007):

$$H(f) = \frac{FFT(CCF(\Delta LST, \Delta NDVI))}{FFT(ACF(\Delta LST))}, \quad (3)$$

где FFT – спектральное преобразование Фурье, CCF – кросс-корреляционная функция, ACF – автокорреляционная функция.

Полученная спектральная функция  $H(f)$  характеризует скорость и интенсивность воздействия погоды на состояние фотосинтетического аппарата древостоя. Типичный вид спектра функции отклика  $h(f)$  представлен на рис. 2.

Спектральная мощность функции отклика есть площадь под кривой спектра на рис. 2:

$$S = \int_0^{0.5} H(f) df. \quad (4)$$

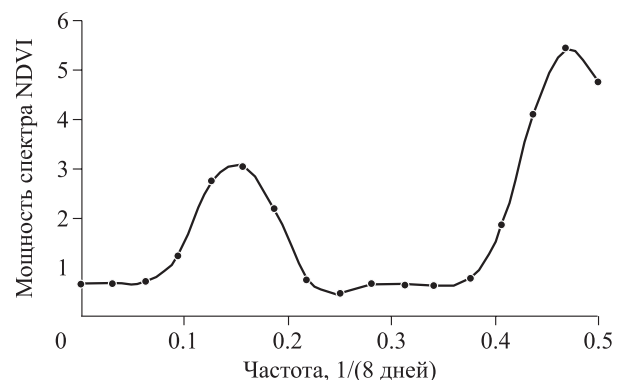
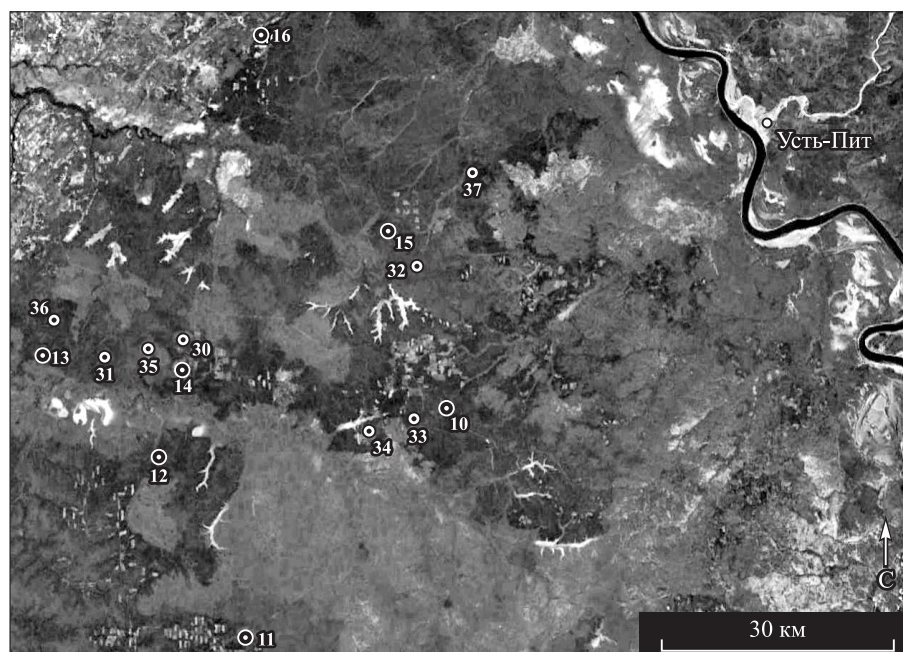


Рис. 2. Типичный вид спектра функции  $h(f)$  отклика NDVI на изменение LST (очаг, площадка № 10, 2010 г.).



**Рис. 3.** Пробные площади вблизи очага массового размножения сибирского шелкопряда (бассейн р. Енисей вблизи п. Усть-Пит).

Темные точки – насаждения, поврежденные вредителем; светлые – неповрежденные.

В дальнейшем анализе используются мощности всего спектра SALL и высокочастотной составляющей спектра SHF в диапазоне  $f = 0.35 - 0.5$  1/(8 дней). Пары этих значений сравниваются для поврежденных и контрольных насаждений.

Для автоматизированного расчета спектральной функции отклика в течение сезона использовалась оригинальная программа расчета, представляющая собой автономную оболочку, исполняемую под операционной системой Windows. В качестве входных данных в программу вводятся временные ряды индексов NDVI и LST. Предварительная подготовка данных требует исправления возможных ошибок и коррекции метеорологических помех наблюдения методом сглаживания по соседним значениям. В программе также убираются из расчета зимние наблюдения, не относящиеся к вегетативному периоду. Результат расчета представляется в виде набора дискретных значений спектральной функции отклика  $H(f)$  в диапазоне частот  $f = 0 - 0.5$  1/(8 дней) для каждого года наблюдения.

Анализ проводился для пихтовых насаждений таежной зоны в очаге массового размножения сибирского шелкопряда (*Dendrolimus sibiricus* Tschetv.) на территории Енисейского и Северо-Енисейского районов Красноярского края. Данная вспышка массового размножения реализовалась в 2015–2017 гг., когда было по-

вреждено и уничтожено около 1 млн га леса. Реализация мер по пресечению вспышки обошлась краю бюджету минимум в 300 млн руб.

Данные об изучаемых участках были предоставлены Центром защиты леса Красноярского края. Рассматривались площадки, которые с 2015 г. повреждались гусеницами сибирского шелкопряда, и соседние неповрежденные участки. На рис. 3 показано местоположение пробных площадей в пределах очага массового размножения сибирского шелкопряда (бассейн р. Енисей вблизи п. Усть-Пит) и контрольных пробных площадей.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Сезонные данные NDVI и LST в 2009–2019 гг. были собраны для 7 пробных площадей, поврежденных в 2015 г. сибирским шелкопрядом и 8 контрольных неповрежденных пробных площадей. Для повышения точности измерений на каждой площади рассматривалось 6 участков  $250 \times 250$  м, что соответствует минимальному разрешению системы AQUA/MODIS для выбранных спектральных каналов.

Для поврежденных и контрольных пробных площадей вычислены суммарные значения фотосинтетического индекса в течение сезона:

$$SNDVI = \int_{t_0}^{t_c} NDVI(t) dt. \quad (5)$$

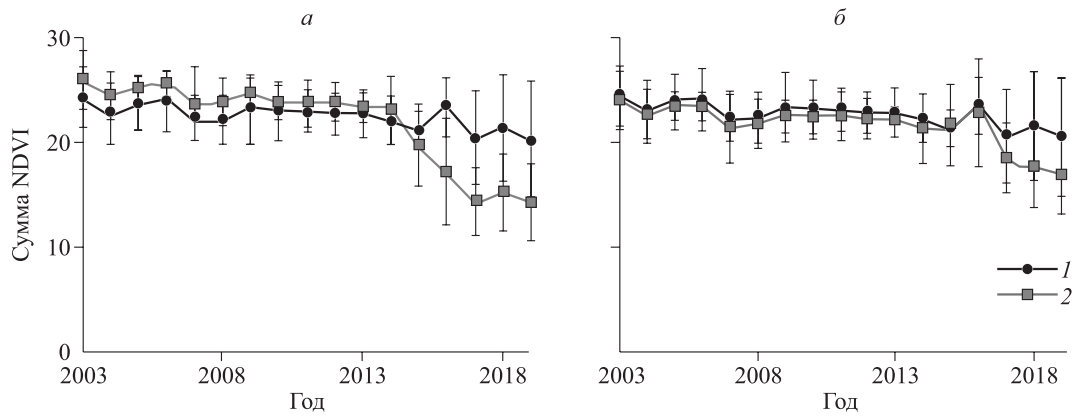


Рис. 4. Отношения суммарной сезонной NDVI сибирского шелкопряда в контрольных насаждениях (1) и в очагах массового размножения (2) на площадках № 10 (а) и 16 (б).

Полученные данные NDVI и LST усреднялись для поврежденных и контрольных участков. На рис. 4 приведены отношения средних сезонных значений NDVI для очагов и контроля.

Как видно из рис. 4, до начала вспышки значимых различий NDVI деревьев в будущих очагах массового размножения и в контрольных неповрежденных насаждениях не наблюдалось. Только после повреждений хвои вредителями такие различия появились. Таким образом, не удалось получить заблаговременную оценку рисков нападения насекомых на насаждения по суммарным показателям NDVI.

Далее рассмотрим возможность использования для заблаговременной оценки рисков нападения вредителей на насаждения спектральных функций отклика из уравнения (2). Для сопоставления спектральных функций отклика поврежденных и неповрежденных пробных площадей удобно «свернуть» эту функцию и представить ее в виде двух параметров, характеризующих общую мощность спектра SALL и мощности SHF на высоких частотах ( $f > 0.35$ ). В дальнейшем анализе использовались усредненные показатели по поврежденным площадкам и площадкам контроля. Таким образом, полученные результаты применимы для оценки процессов для всего очага вспышки.

Для дальнейшего анализа введем следующие усредненные переменные:

- $Ra(t)$  – суммарная мощность спектра функции отклика в очагах.
- $Rc(t)$  – то же в контроле.
- $Ga(t)$  – мощность ВЧ-составляющих ( $f > 0.35$ ) спектра функции отклика в очагах.
- $Gc(t)$  – то же в контроле.

С учетом вариабельности абсолютных значений LST и NDVI в разные годы в качестве итоговых индикаторов изменения состояния насаж-

дений использовались следующие взвешенные показатели:

$Q1(t) = (Ra(t) - Rc(t)) / Rc(t)$  отношение «очаг/контроль» для средних значений суммарных мощностей спектра функции отклика;

$Q2(t) = (Ga(t) - Gc(t)) / Gc(t)$  – то же для ВЧ-составляющих.

При отсутствии различий в средних значениях показателей в очагах и контроле, значения  $Q1$  и  $Q2$  стремятся к нулю.

На рис. 5 в плоскости ( $Q1, Q2$ ) приведены характеристики функций отклика для отношений «очаг/контроль» в разные годы.

Видно, что за 4–9 лет до начала повреждений (2015 г.) спектр в будущем поврежденных насаждений был близок к спектру контрольных неповрежденных насаждений. Непосредственно перед началом повреждений наблюдались значительные отклонения спектра функции отклика насаждений в будущих очагах массового размножения сибирского шелкопряда от спектра функции отклика в контрольных насаждениях. После повреждения древостоя насекомыми в

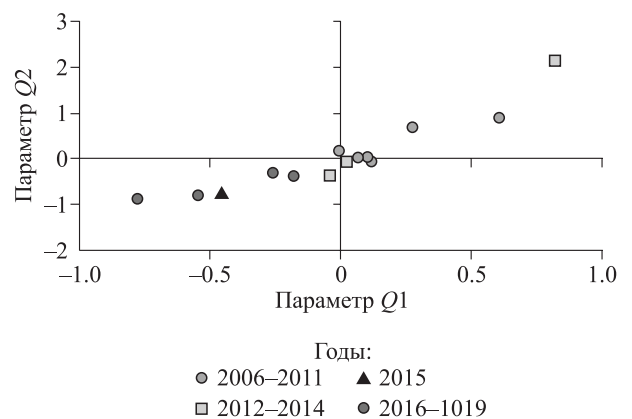
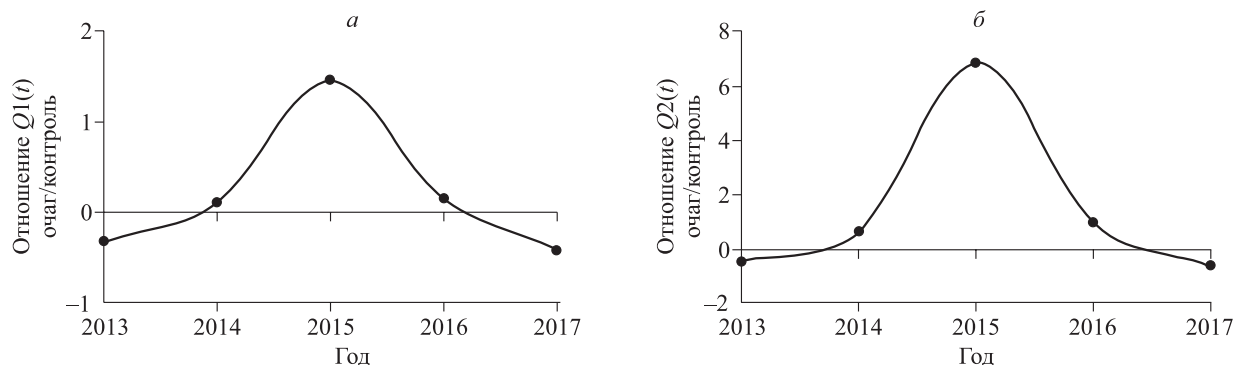


Рис. 5. Показатели спектральных функций  $Q1$ – $Q2$  для изучаемой территории.



**Рис. 6.** Отношения  $Q1$  средних значений суммарных мощностей спектра (а) и  $Q2$  (б) средних значений мощностей ВЧ-составляющих спектра функций отклика на пробных площадях в очагах к контролю.

2015–2016 гг. показателя  $Q1$  и  $Q2$  существенно упали по отношению к контролю и не восстановились за последующие 4 года.

Интересным представляется, казалось бы, парадоксальный вариант обратного расчета спектральной функции отклика LST на изменение NDVI. Однако такая связь может существовать, так как температура поверхностного слоя почвы может измениться после дефолиации древесных растений. В этом случае интегральное уравнение связи между  $\Delta LST$  и  $\Delta NDVI$  запишется следующим образом:

$$\Delta LST(t) = \int_0^t g(\tau) \Delta NDVI(t - \tau) d\tau. \quad (6)$$

Для уравнения (6) функции отклика  $g(\tau)$  изменений температуры поверхностного слоя почвы в ответ на изменение NDVI рассчитывается точно так же, как и функция отклика  $h(\tau)$  и для анализа будут использоваться показатели  $Q1$  и  $Q2$  спектральных мощностей функции отклика  $g(f)$ . Они способны показывать изменение локальной температуры исследуемых площадей при нарушениях растительного покрова. Можно определить, что при сильной дефолиации 2015 г. показатели  $Q1$  и  $Q2$ , рассчитанные для спектральной функции отклика  $g(f)$ , существенно изменялись (рис. 6).

Однако, как видно из рис. 6, уже через год после объедания, значения  $Q1$  и  $Q2$  вернулись на прежний уровень. Скорее всего, это связано с зарастанием поврежденных участков травянистой растительностью. В целом функцию спектрального отклика  $g(f)$  можно рассматривать как чувствительный маркер дефолиации.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

За несколько лет до успешной атаки насекомых реакция древостоя, в будущем подвергшегося нападению вредителей, в ответ на изменение

окружающей среды (в данном случае – температуры подстилающей поверхности) качественно изменяется. Предложенные расчетные показатели существенно отличаются от аналогичных показателей предшествующих лет. Их можно рассматривать как необходимые условия развития вспышки. Используя предложенную методику оценки устойчивости насаждений, можно прогнозировать реализацию вспышки размножения насекомых и оптимизировать лесозащитные мероприятия. Подобные прогнозы не могут быть получены по абсолютным показателям вегетативного состояния древостоев.

*Работа поддержана грантом РФФИ и ККФН № 19-44-240003.*

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ (REFERENCES)

- Ким Д. П. Теория автоматического управления: учеб. пособ. Т. 1. Линейные системы. М.: Физматлит, 2007. 312 с. [Kim D. P. Teoriya avtomaticheskogo upravleniya: ucheb. posob. T. 1. Lineynye sistemy (Automatic control theory: Tutorial. V. 1. Linear systems). Moscow: Fizmatlit, 2007. 312 p. (in Russian)].
- Краснов М. Л., Киселев А. И., Макаренко Г. И. Интегральные уравнения. Задачи и примеры с подробными решениями: учеб. пособ. Изд. 3-е, испр. М.: Едиториал УРСС, 2003. 192 с. [Krasnov M. L., Kisilev A. I., Makarenko G. I. Integral'nye uravneniya. Zadachi i primery s podrobnymi resheniyami: ucheb. posob. Izd. 3-e, ispr. (Integral equations. Tasks and examples with detailed solutions: tutorial. 3<sup>rd</sup> ed., revised). Moscow: Editorial URSS, 2003. 192 p. (in Russian)].
- Макс Ж. Методы и техника обработки сигналов при физических измерениях. М.: Мир, 1983. Т. 1. 312 с. [Maks Zh. Metody i tekhnika obrabotki signalov pri fizicheskikh izmereniyakh (Signal processing methods and techniques for physical measurements). Moscow: Mir, 1983. V. 1. 312 p. (in Russian)].
- Мармарелис П., Мармарелис В. Анализ физиологических систем. Метод белого шума. М.: Мир, 1981. 480 с.

- [Marmarelis P., Marmarelis V. Analiz fiziologicheskikh sistem. Metod belogo shuma (Analysis of physiological systems. White noise method). Moscow: Mir, 1981. 480 p. (in Russian)].
- Морс Ф. М., Феибах Г. Методы теоретической физики. М.: Ин. лит-ра, 1960. Т. 2. 886 с. [Mors F. M., Feshbakh G. Metody teoreticheskoy fiziki (Methods of theoretical physics). Moscow: In. lit-ra, 1960. V. 2. 886 p. (in Russian)].
- AppEEARS – Application for Extracting and Exploring Analysis Ready Samples. USGS, 2021. <https://lpdaac.usgs.gov/tools/appeears/>
- Bayarjargal Y., Karnieli A., Bayasgalan M., Khudulmur S., Gandush C., Tucker C. J. A comparative study of NOAA-AVHRR derived drought indices using change vector analysis // *Int. J. Rem. Sens.* 2006. V. 105. Iss. 1. P. 9–22.
- Cunha M., Richter C. A time-frequency analysis on the impact of climate variability on semi-natural montane meadows // *IEEE Trans. Geosci. Rem. Sens.* 2014. V. 52. Iss. 10. P. 6156–6164.
- Jacquin A., Sheeren D., Lacombe J.-P. Vegetation cover degradation assessment in Madagascar savanna based on trend analysis of MODIS NDVI time series // *Int. J. Appl. Earth Observ. Geoinform.* 2010. V. 12. Suppl. 1. P. 3–10.
- Kovalev A. V., Ivanova Yu. D., Sukhovolskiy A. A., Volkov V. E., Sukhovolskiy V. G. Mathematical models for determining the boundaries of forest areas unstable to the appearance of insects using satellite data (MODIS) // *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Engineer. II Int. Sci. Conf. «Adv. Technol. in Aerospace, Mech. Automat. Engineer.»*. MIST: Aerospace – 2019, 18–21 Nov., 2019, Krasnoyarsk, Russia. 2020. V. 734. Article 012091. P. 1–6.
- Lewis M. A., Nelson W., Xu C. A structured threshold model for mountain pine beetle outbreak // *Bull. Math. Biol.* 2010. V. 72. Iss. 3. P. 565–589.
- Liang L., Chen Y., Hawbaker T. J., Zhu Z.-L., Gong P. Mapping mountain pine beetle mortality through growth trend analysis of time-series Landsat data // *Rem. Sens.* 2014. V. 6. Iss. 6. P. 5696–5716.
- Liu Y., Hill M. J., Zhang X., Wang Z., Richardson A. D., Hufkens K., Filippa G., Baldocchi D. D., Ma S., Verfaillie J., Schaaf C. B. Using data from Landsat, MODIS, VIIRS and PhenoCams to monitor the phenology of California oak/grass savanna and open grassland across spatial scales // *Agr. For. Meteorol.* 2017. V. 237–238. P. 311–325.
- MODIS – Moderate-Resolution Imaging Spectroradiometer. NASA, 2021. <http://modis.gsfc.nasa.gov>.
- Nelson W. A., Bjørnstad O. N., Yamanaka T. Recurrent insect outbreaks caused by temperature-driven changes in system stability // *Science*. 2013. V. 341. Iss. 6147. P. 796–799.
- Olsson P.-O., Lindström J., Eklundh L. Near real-time monitoring of insect induced defoliation in subalpine birch forests with MODIS derived NDVI // *Rem. Sens. Environ.* 2016. V. 181. P. 42–53.
- Rechid D., Raddatz T. J., Jacob D. Parameterization of snow-free land surface albedo as a function of vegetation phenology based on MODIS data and applied in climate modelling // *Theor. Appl. Climatol.* 2009. V. 95. Iss. 3–4. P. 245–255.
- Senf C., Seidl R., Hostert P. Remote sensing of forest insect disturbances: Current state and future directions // *Int. J. Appl. Earth Observ. Geoinform.* 2017. V. 60. P. 49–60.
- Spruce J. P., Sader S., Ryan R. E., Smoot J., Kuper P., Ross K., Prados D., Russell J., Gasser G., McKellip R. Assessment of MODIS NDVI time series data products for detecting forest defoliation by gypsy moth outbreaks // *Rem. Sens. Environ.* 2011. V. 115. P. 427–437.
- Thayn J. B. Using a remotely sensed optimized Disturbance Index to detect insect defoliation in the Apostle Islands, Wisconsin, USA // *Rem. Sens. Environ.* 2013. V. 136. P. 210–217.
- Tucker C. J., Sellers P. J. Satellite remote sensing of primary production // *Int. J. Rem. Sens.* 1986. V. 7. Iss. 11. P. 1395–1416.
- Verbesselt J., Zeileis A., Herold M. Near real-time disturbance detection using satellite image time series // *Rem. Sens. Environ.* 2012. V. 123. P. 98–108.

## ANALYSIS OF FOREST STANDS RESISTANCE TO SIBERIAN SILKMOTH ATTACK ACCORDING TO REMOTE SENSING DATA

A. V. Kovalev

*Federal Research Center Krasnoyarsk Scientific Center, Russian Academy of Sciences, Siberian Branch  
Akademgorodok, 50, Krasnoyarsk, 660036 Russian Federation*

---

E-mail: sunhi.prime@gmail.com

To assess the state of plantations in vast areas of boreal forests, modern methods are needed that allow obtaining information quickly with minimal labor costs. The existing assessment methods are either associated with labor-consuming ground-based observations, or they make it possible to measure the damage that has already occurred using remote sensing data (satellite, aeronautical observation methods). Methods for analyzing the state of forest stands in large areas (such as taiga forests in Siberia) based on remote sensing data are proposed. As an indicator of the state of stands, it is proposed to use the susceptibility index of vegetation index during the season (NDVI) to changes in the radiation temperature (LST), obtained from satellite data of the Terra/Aqua system. The index was calculated as the transfer spectral response function in the integral equation between NDVI and LST. The analysis was made for two types fir stands of Krasnoyarsk Region taiga zone – territories that since 2015 were damaged by of the Siberian silkmoth *Dendrolimis sibiricus* Tschetv. caterpillars and nearest intact areas. It is shown that indicators of stands' susceptibility to environmental changes on the studied test plots changed significantly 2–3 years before pest population outbreaks and can be taken into account when assessing the risk of outbreaks. This distinguishes proposed indicator from assessments of the vegetation cover state, which register a significant defoliation of forest stands and cannot be used for forecasting.

**Keywords:** *forest insects, assessment of the forest state, population outbreaks, ground-based remote sensing methods.*

**How to cite:** *Kovalev A. V. Analysis of forest stands resistance to Siberian silkmoth attack, according to remote sensing data // Sibirskij Lesnoj Zurnal (Sib. J. For. Sci.). 2021. N. 5. P. 71–78 (in Russian with English abstract and references).*