

**ВОСПРИИМЧИВОСТЬ ЛЕСНЫХ НАСАЖДЕНИЙ К РАЗВИТИЮ ВСПЫШЕК
МАССОВОГО РАЗМНОЖЕНИЯ НАСЕКОМЫХ-ВРЕДИТЕЛЕЙ:
ПРОГНОЗ ПО ДАННЫМ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ***

В. Г. Суховольский¹, А. В. Ковалев², С. А. Астапенко³

¹Институт леса им. В. Н. Сукачева СО РАН

Российская Федерация, 660036, г. Красноярск, Академгородок, 50/28

²Красноярский научный центр СО РАН

Российская Федерация, 660036, г. Красноярск, Академгородок, 50

³Центр защиты леса Красноярского края

Российская Федерация, 660036, г. Красноярск, Академгородок, 50а

E-mail: ¹soukhovolsky@yandex.ru, ²sunhi.prime@gmail.com, ³serega3000@inbox.ru

Предложены методы анализа восприимчивости насаждений к нападению лесных насекомых на основе данных дистанционного зондирования Земли. В качестве индикатора состояния насаждений предложено использовать показатель восприимчивости вегетативного индекса растительности в течение сезона (NDVI) к изменению радиационной температуры территории (LST), получаемые по спутниковым данным системы Terra/Aqua. Показатель рассчитывался как передаточная спектральная функция отклика в интегральном уравнении, связывающем изменения NDVI и LST.

*Анализ проводился для трех опытных объектов. В первом случае исследовались пихтовые насаждения таежной зоны Красноярского края – территории, которые с 2015 г. повреждались гусеницами сибирского шелкопряда *Dendrolimus sibiricus* Tschetv. и соседние неповрежденные участки. Во втором случае объектом исследования были горные пихтовые древостои в Ермаковском районе на юге Красноярского края, поврежденные в 2013 году черным пихтовым усачем *Monochamus uralensis* Fischer. Наконец, рассматривалось состояние пихтовых лесов в Бирилюкском районе Красноярского края в 2023 г., когда повреждений насаждений еще не наблюдалось, но в феромонных ловушках были найдены особи сибирского шелкопряда.*

Показано, что показатель восприимчивости насаждения на изучаемых пробных площадях значительно изменился за 2–3 года до начала вспышки массового размножения вредителя. Предложенный показатель может быть использован при прогнозе вспышек массового размножения насекомых-вредителей.

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

Conifers of the boreal area. 2024, Vol. XLII, No. 2, P. 30–37

**SUSCEPTIBILITY OF FOREST PLANTATIONS TO THE DEVELOPMENT OF OUTBREAKS
OF INSECT PESTS: FORECAST BASED ON REMOTE SENSING DATA**

V. G. Soukhovolsky¹, A. V. Kovalev², S. A. Astapenko³

¹V. N. Sukachev Institute of Forest SB RAS

50/28, Akademgorodok, Krasnoyarsk, 660036, Russian Federation

²Krasnoyarsk Scientific Center, SB RAS

50, Akademgorodok, Krasnoyarsk, 660036, Russian Federation

³Center of forest protection for Krasnoyarsk region

50a, Akademgorodok, Krasnoyarsk, 660036, Russian Federation

E-mail: ¹soukhovolsky@yandex.ru, ²sunhi.prime@gmail.com, ³serega3000@inbox.ru

Methods are proposed for analyzing the susceptibility of forest stands to attack by forest insects based on Earth remote sensing data. As an indicator of the state of trees, it is proposed to use the indicator of the susceptibility of the vegetative vegetation index during the season (NDVI) to changes in the radiative temperature of the territory (LST), obtained from satellite data of the Terra/Aqua system. The indicator was calculated as the spectral response transfer function in the integral equation relating changes in NDVI and LST.

*The analysis was carried out for three experimental objects. In the first case, fir stands of the taiga zone of Krasnoyarsk Krai were studied. Those were territories that have been damaged by caterpillars of the Siberian silkmoth *Dendrolimus sibiricus* Tschetv since 2015 and adjacent undamaged areas. In the second case the object of the study*

* Работа поддержана грантом РФФИ 23-66-10015 (This work was supported by RSF grant 23-66-10015).

was mountain fir stands in the Ermakovsky District in the south of Krasnoyarsk Krai, damaged in 2013 by the black fir longhorned beetle *Monochamus urussovi* Fischer. Finally, the state of fir forests in the Birilyussky District of Krasnoyarsk Krai was examined in 2023, when no damage to the stands had yet been observed, but individuals of the Siberian silkmoth were found in pheromone traps.

It was shown that the indicator of plant susceptibility in the studied sample areas changed significantly 2–3 years before the outbreak of the pest. The proposed indicator can be used to predict outbreaks of insect pests.

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

ВВЕДЕНИЕ

Одним из основных факторов ослабления древостоев являются вспышки массового размножения насекомых. Значительные экономические и экологические потери при усыхании и гибели лесов при воздействии насекомых делают крайне важным оценку текущего состояния и устойчивости насаждений к атакам вредителей. Не менее важен краткосрочный прогноз ситуации на ближайшие годы. Однако наземные учеты численности вредителей и оценки риска возникновения вспышек массового размножения насекомых в лесах бореальной зоны крайне затруднительны в связи с гигантскими площадями лесов и труднодоступностью лесных территорий, а оценки по визуальным признакам (состоянию кроны, повреждениям стволов) появляются на поздних этапах повреждений, когда возможности управления состоянием этих насаждений становятся практически невозможными.

Единственной реальной возможностью оценки 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 определения нанесенного насекомыми ущерба. При этом одним из основных методов, используемых при анализе, является измерение различных вариантов вегетационного индекса растительности, основанного на разнице отражения красного и ближнего инфракрасного излучения [Tucker, Sellers 1986]. Вегетационный индекс NDVI позволяет оценить продуктивность и физиологические свойства растительной компоненты экосистемы [Liu et al., 2017; Rechid et al., 2009] 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]. Данные ДЗЗ широко используются для картирования пространственной динамики уже реализовавшихся очагов вспышек насекомых [Liang et al., 2014; Senf et al., 2017; Verbesselt et al., 2012]. Основной целью таких исследований является оценка ущерба, нанесенного вспышкой, и расчет площади потери. Такой индекс достоверно и оперативно показывает деградацию кроны деревьев в ходе развития вспышки массового размножения насекомых. В то же время ослабление деревьев, уменьшение интенсивности защитных реакций и противодействия дерева нападению насекомых развивается в течение нескольких лет до начала резкого подъема численности вредителя, но

не регистрируется по показателям NDVI и попытки использовать данные дистанционного зондирования для оценки устойчивости лесных насаждений к внешним воздействиям не приводят к успеху [Spruce et al., 2011; Thayn, 2013; Olsson et al., 2016].

Однако разработка методов заблаговременной оценки устойчивости деревьев к нападению насекомых 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. В настоящей работе рассмотрена возможность использования оригинального метода обработки данных дистанционного зондирования для прогнозирования зон вспышек массового размножения лесных насекомых в лесах Сибири.

ОБЪЕКТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

1. Анализ проводился для пихтовых насаждений таежной зоны в очаге массового размножения сибирского шелкопряда на территории Енисейского и Северо-Енисейского районов Красноярского края. Данная вспышка массового размножения реализовалась в 2015–2017 гг. В ходе вспышки вредитель повредил и уничтожил около 1 млн га леса. Реализация мер по пресечению вспышки обошлось краевому бюджету минимум в 300 млн рублей.

Рассматривались площадки, которые с 2015 г. повреждались гусеницами сибирского шелкопряда *Dendrolimis sibiricus* Tschetv. и соседние неповрежденные участки. На схеме на рис. 1 показано местоположение пробных площадок размером 250×250 м в пределах очага массового размножения сибирского шелкопряда (бассейн р. Енисей вблизи п. Усть-Пит, координаты 58.721310°N, 90.421236°E) и контрольных неповрежденных пробных площадей.

2. Также в качестве опытного объекта рассматривались пихтовые древостои горной тайги на юге Ермаковского района Красноярского края. Данные участки были значительно повреждены черным пихтовым усачем *Monochamus urussovi* Fischer. в 2013 г. (координаты 52.408660°N, 93.582923°E). Пробные площадки расположены на двух соседних поврежденных склонах гор, ближайшие склоны с неповрежденными насаждениями использовались в качестве контроля.

Необходимо учитывать, что сибирский шелкопряд является филлофагом и питается только хвоей, в то время как черный пихтовый усач – стволовой вредитель. Это накладывает определенные отличия в динамики ослабления древостоя этими видами насекомых-вредителей.



Рис. 1. Пробные площади:

- 1 – вблизи очага массового размножения сибирского шелкопряда (бассейн р. Енисей вблизи п. Усть-Пит);
- 2 – вблизи очагов массового размножения черного пихтового усача в Ермаковском районе;
- 3 – в пихтовых насаждениях в Бирюлюсском районе Красноярского края

3. В 2023 г. на территории Бирюлюсского района Красноярского края в феромонных ловушках в небольшом количестве были найдены особи самцов сибирского шелкопряда (56.9971 N, 91.5227 E). Эта находка поставила вопрос о возможностях развития в этой зоне вспышки массового размножения этого вредителя. Для оценки восприимчивости пихтовых насаждений на этой территории было проведено дистанционное зондирование на 10 выбранных пробных площадках размером 250×250 м. Пять пробных площадок в зоне А были выбраны непосредственно в зоне, где были расставлены феромонные ловушки, а пять других пробных площадок в зоне Б – на расстоянии около 7 км от зоны феромонного мониторинга.

МЕТОДЫ

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

На сегодняшний день существуют спутниковые комплексы, с использованием которых возможно получить оперативные данные о характеристиках окружающей среды на локальной площади. Ключевым факторами при выборе такой системы является периодичность получения данных ДЗЗ, достаточное пространственное разрешение, наличие необходимых спектральных, оптических и лидарных каналов передачи данных. В данной работе выбор был сделан в пользу спутников Terra/Aqua действующих в рамках программы NASA EOS (Earth Observing System). Оборудование этих двух спутников в достаточной степени дублируется, что позволяет восстанавливать получаемую информацию, убирая атмосферные помехи для одного из спутников. Исходные данные ДЗЗ со

спутников Terra/Aqua доступны для свободного скачивания на сервере NASA. Основным прибором сбора необходимой информации на спутнике является спектрорадиометр среднего разрешения MODIS (Moderate-Resolution Imaging Spectroradiometer).

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 (AppEEARS) <https://lpdaacsvc.cr.usgs.gov/appeears/>. В рамках запроса к базе данных указывается 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.

В качестве показателя, характеризующего состояние насаждений, в настоящей работе предложено использовать показатель восприимчивости вегетационного индекса растительность (NDVI) в течение сезона к изменению радиационной температуры территории (LST).

Для анализа были использованы следующие продукты системы Terra/Aqua:

- Продукты MOD11A1 и MYD11A1. Содержат информацию о температуре подстилающей поверхности LST. Данный показатель хорошо коррелирует с метеонаблюдениями о температуре воздуха. Наблюдения ежедневные. Пространственное разрешение 1×1 км.

- Исходные спектральные каналы `sur_refl_b01` (красный) и `sur_refl_b02` (ближний инфракрасный) для расчета вегетативного индекса NDVI, содержащиеся в продуктах MOD09Q1 и MYD09Q1. Они представляют собой восьмидневный композит (очищенные и селектированные данные за период в восемь дней). Пространственное разрешение – 250×250 метров.

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).

Поскольку рост и состояние кроны деревьев существенно зависит от изменений температуры окружающей среды, то анализ связей между NDVI и LST позволит оценить адаптивный ресурс деревьев в насаждении. В этом случае изменение NDVI можно рассматривать как некоторую функцию от изменений погодных условий и для отдельного года переменную LST можно рассматривать как входную в системе, а переменную NDVI – как выходную. Если предполагать, что выходной сигнал линейно зависит от входного, то эту связь можно записать через некоторый линейный оператор F :

$$NDVI = F(LST). \quad (2)$$

На оператор F можно наложить естественное условие причинности: значение $NDVI(t)$ в момент t будет зависеть только от значений $LST(t-\tau)$ в прошлые моменты времени $(t-\tau)$. Так как сезонная динамика $NDVI(t)$ и $LST(t)$ характеризуется наличием немонотонного нелинейного тренда, то для расчетов линейного оператора F следует перейти от рядов немонотонных переменных NDVI и LST к рядам первых разностей

$$\Delta NDVI(t) = NDVI(t) - NDVI(t-1)$$

и

$$\Delta LST(t) = LST(t) - LST(t-1),$$

и при описании связи между этими переменными учитывать возможное запаздывание отклика NDVI на изменение LST.

Рассмотрим кросс-корреляционную функцию Φ_{yx} , связывающую $\Delta NDVI(t)$ и $\Delta LST(t)$ [Ким, 2007; Краснова и др., 2007]:

$$\begin{aligned} \Phi_{yx} &= E[\Delta LST(t-\tau) \cdot \Delta NDVI(\tau)] = \\ &= E\left[\int_0^t h(\tau)x(t-\tau)x(t)d\tau\right], \end{aligned} \quad (3)$$

где E – оператор математического ожидания; y – $\Delta NDVI$; x – ΔLST .

Так как операции математического ожидания E и линейного преобразования F можно переставить, то можно записать [Макс, 1983; Морс, Фешбах, 1960]:

$$E\left[\int_0^t h(\tau)x(t-\tau)x(t)d\tau\right] =$$

$$= \int_0^t h(\tau)E[x(t)x(t-\tau)]d\tau = \int_0^t h(\tau)\Phi_{xx}d\tau, \quad (4)$$

где $h(\tau)$ – так называемая весовая функция (ядро интегрального уравнения (4), функция отклика); Φ_{xx} – автокорреляционная функция ΔLST .

Тогда из (3) и (4) получим:

$$\Phi_{yx} = \int_0^t h(\tau)\Phi_{xx}d\tau, \quad (5)$$

Так как временные ряды $\Delta NDVI$ и ΔLST в течение сезона известны, то по их значениям однозначно рассчитываются кросс- и автокорреляционные функции и в уравнении (5) неизвестна только весовая функция (функция отклика) $h(\tau)$, характеризующая восприимчивость NDVI к изменению LST.

Для нахождения функции отклика произведем фурье-преобразование FT левой и правой частей уравнения (5):

$$\begin{aligned} FT(\Phi_{yx}) &= FT\left(\int_0^t h(\tau)\Phi_{xx}d\tau\right) = \\ &= FT(h(\tau) \cdot FT(\Phi_{xx})) = H(f)FT(\Phi_{xx}), \end{aligned} \quad (6)$$

где $H(f) = FT(h(\tau))$.

Из (6) можно найти значение спектра $H(f)$ функции отклика:

$$H(f) = \frac{FT(\Phi_{yx})}{FT(\Phi_{xx})}. \quad (7)$$

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.

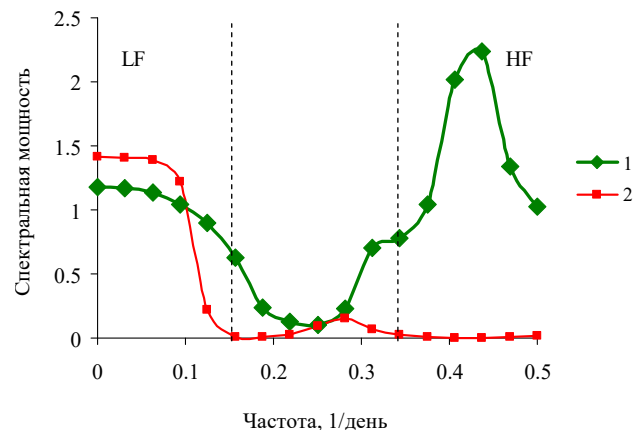


Рис. 2. Типичные виды спектра функции $H(f)$ отклика NDVI на изменение LST:

1 – контроль; 2 – год вспышки сибирского шелкопряда в Енисейском районе

Значение спектральной функции отклика $H(f_0)$ на некоторой частоте f характеризуют интенсивность и скорость $v = 1/f$ отклика NDVI на изменение LST. Составляющие спектра $H(f)$ на низких частотах (вблизи $f = 0$) характеризуют сильно инерционную реакцию

NDVI на изменение LST; составляющие спектра $H(f)$ на высоких частотах (вблизи $f = 0,5$) характеризуют быстрый отклик NDVI на изменение LST.

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

$$S(t) = \int_0^{0,5} H(f, t) df. \quad (8)$$

В дальнейшем анализе используются относительные мощности в низкочастотной (LF) составляющей ($0 < f < 0,16$ 1/день) и в высокочастотной (HF) составляющей ($0,35 < f < 0,5$ 1/день) спектра функции отклика $H(f)$;

$$LF(t) = \frac{\int_0^{0,16} H(f, t) df}{S(t)}; \quad HF(t) = \frac{\int_{0,35}^{0,50} H(f, t) df}{S(t)}. \quad (9)$$

Пары значений сравниваются для поврежденных и контрольных насаждений.

Для автоматизированного расчета спектральной функции отклика в течение сезона использовалась оригинальная программа расчета. Программа представляет 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 (облачности и др. эффектов) 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/день для каждого года наблюдения. Далее по этим данным вычисляются относительные значения низко- и высокочастотных составляющих $LF(t)$ и $HF(t)$ спектра функции отклика.

РЕЗУЛЬТАТЫ

Сезонные данные NDVI и LST в 2009–2019 гг. были собраны для 7 поврежденных пробных площадках и 8 контрольных неповрежденных пробных площадках) для территории, поврежденной в 2015 г. сибирским шелкопрядом. В очаге черного пихтового усача 2013 г. измерялись показатели с 16 пробных и 16 контрольных площадок. Для повышения точности измерений на каждой площади рассматривалось 6 участков 250×250 м, что соответствует минимальному пространственному разрешению системы AQUA/MODIS для выбранных спектральных каналов.

Насколько величины NDVI в течение сезона характеризуют состояние насаждений? Для поврежденных и контрольных пробных площадей были вычислены средние значения фотосинтетического индекса в течение сезона:

$$SNDVI = \frac{1}{t_c - t_0} \int_{t_0}^{t_c} NDVI(t) dt. \quad (10)$$

где t_0 и t_c – начальный и конечный моменты сезона.

Полученные данные NDVI и LST усреднялись для поврежденных и контрольных участков. На рис. 3 приведены средние сезонные значения NDVI для очагов и контроля.

Как видно из рис. 3, до начала вспышки (2015 г.) 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, по суммарным показателям NDVI не удастся получить заблаговременную оценку рисков нападения насекомых на насаждения.

Далее рассмотрим возможность использования для заблаговременной оценки рисков нападения вредителей на насаждения спектральных функций отклика из уравнения (8). Для сопоставления спектральных функций отклика поврежденных и неповрежденных пробных площадей удобно «свернуть» эту функцию и представить ее в виде двух параметров, характеризующих относительные мощности спектра в LF и HF-диапазонах.

На рис. 4 приведены средние по всем поврежденным и контрольным участкам значения LF-и HF-составляющих в разные годы.

Из рис. 4 видно, что за 4–9 лет до начала повреждений (2015 г.) характеристики спектра функций отклика в насаждениях, в будущем поврежденных, были близки к характеристикам спектров функций отклика контрольных неповрежденных насаждений. Непосредственно перед началом повреждений наблюдались отклонения параметров спектра функции отклика насаждений в будущих очагах массового размножения сибирского шелкопряда от характеристик спектров функций отклика в контрольных насаждениях. После повреждения древостоя насекомыми в 2015–2016 гг. показателя спектров функций отклика существенно упали по отношению к контролю.

Аналогичные расчеты были проделаны для очагов черного пихтового усача и контрольных неповрежденных насаждениях в районе Ергаков (рис. 5).

Представленные на рис. 5 показатели LF и HF для территории, поврежденной черным пихтовым усачем, качественно схожи с аналогичными данными для очагов сибирского шелкопряда: характеристики спектров функций отклика у насаждений, которые затем будут повреждены вредителями, за 3 года до начала вспышки не отклоняются от характеристик в контроле, за 2 года до начала видимых повреждений деревьев наблюдается сдвиги LF- и HF-показателей, которые остаются такими же в год начала видимых повреждений, на следующий год после начала вспышки черного пихтового усача, точно так же, как и при вспышке сибирского шелкопряда, наблюдается резкий сдвиг в сторону более высоких значений LF-показателей и уменьшения HF-параметра.

Можно ли говорить о прогнозе вспышек массового размножения еще до начала видимых повреждений деревьев? Для анализа возможности такого прогноза по дистанционным характеристикам, и в частности, по параметрам спектра функций отклика, рассмотрим данные для пихтовых насаждений в Бирилюсском районе Красноярского края.

Насаждения на территории Бирилюсского района к настоящему времени не повреждались насекомыми, однако в связи с обнаружением имаго сибирского шелкопряда в феромонных ловушках эти территории рассматриваются как зоны возможного риска вспышек вредителя. Для оценки состояния насаждений были выбраны насаждения в двух зонах. Зона А включала 5 пробных площадок вблизи точек, где были установлены феромонные ловушки, зона Б вклю-

чала 5 пробных площадок на расстоянии примерно 5 км от зоны А. Точно так же, как и для описанных выше вспышек сибирского шелкопряда в Енисейском районе и черного пихтового усача в Ергаках был проведен анализ дистанционных данных в зонах А и Б на территории Бирилюсского района с 2014 по 2023 гг. На рис. 6 приведены расчеты средних характеристик спектров функций отклика для насаждений в этих зонах в 2014–2023 гг.

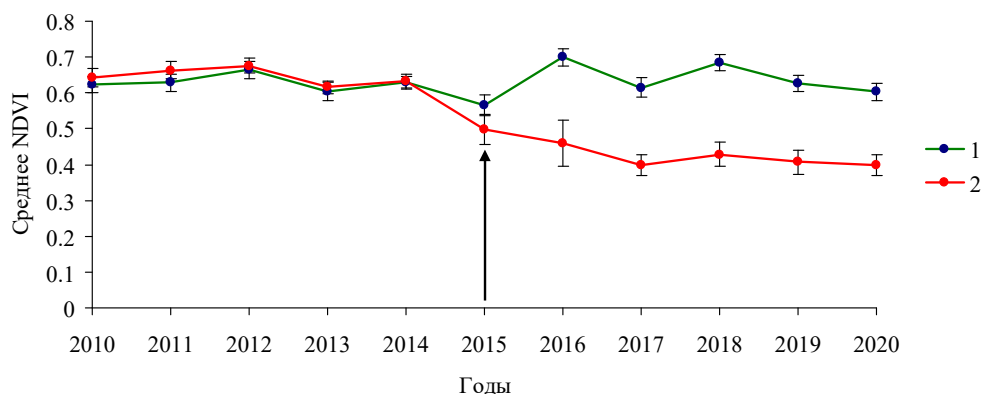


Рис. 3. Динамика средних сезонных значений NDVI в контрольных насаждениях (1) и в очагах массового размножения сибирского шелкопряда (2). Стрелка – год начала вспышки

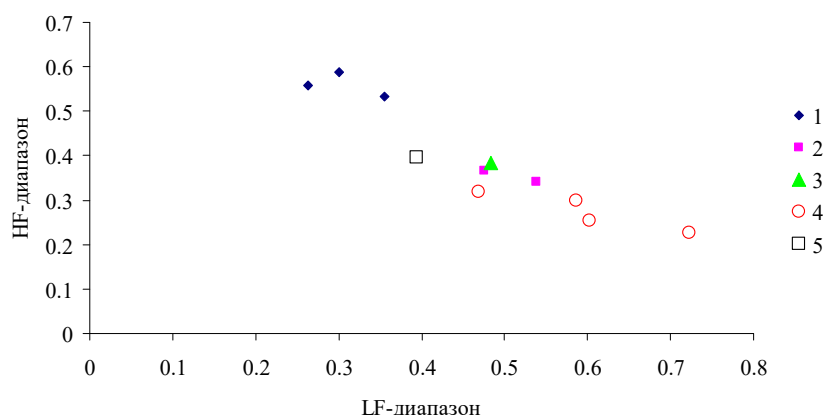


Рис. 4. LF-и HF- составляющих поврежденных и контрольных участков в разные годы: 1 – за 5 лет до начала видимых повреждений крон деревьев вредителями; 2 – за 1–2 года до начала повреждений; 3 – в год начала видимых повреждений крон; 4 – в течение 4 лет после начала вспышки; 5 – контрольные неповрежденные насаждения за год до начала вспышки

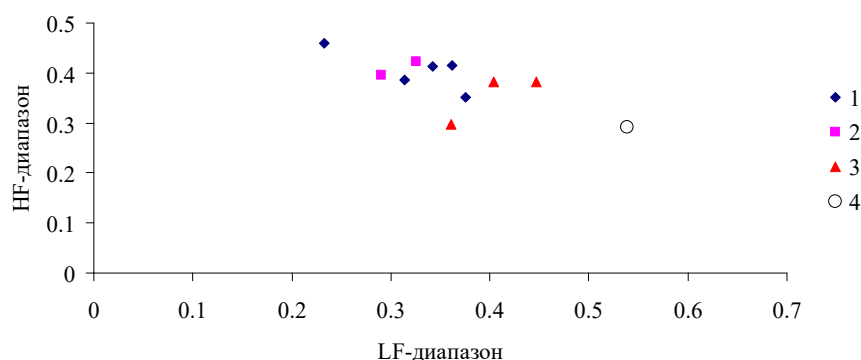


Рис. 5. Показатели LF и HF спектральных функций отклика для территории, поврежденной черным пихтовым усачем, и неповрежденных насаждений: 1 – контрольные насаждения за все годы до и после начала вспышки; 2 – насаждения в зоне вспышки за 3–4 года до начала вспышки (2009–2010 гг.); 3 – насаждения в зоне вспышки за 1–2 года до начала вспышки и в год изменения окраски крон деревьев при повреждении их жуками (2013 г.); 4 – насаждения в зоне вспышки в 2014 г.

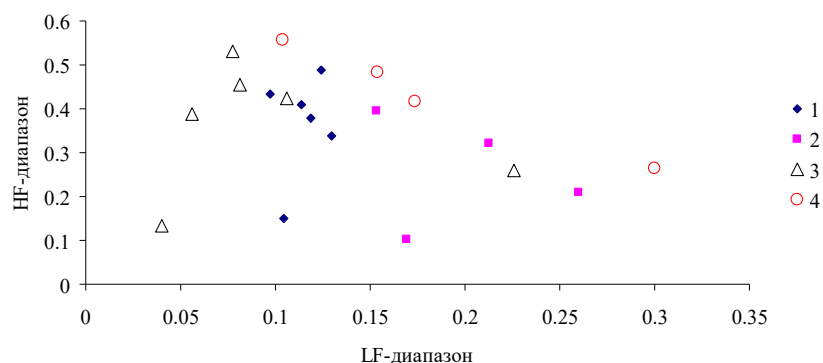


Рис. 6. Значения LF и HF-составляющих для пробных участков зон А и Б:

1 – зона А, 2014–2019 гг.; 2 – зона А, 2020–2023 гг.; 3 – зона Б, 2014–2019 гг.; 4 – зона Б, 2020 – 2023 гг.

Как видно из рис. 6, для пробных площадей в зоне А характерны значительные различия между характеристиками спектров функций отклика в 2014–2019 гг. и в 2020–2023 гг. Для пробных площадей в зоне Б такие различия менее выражены. При этом значимых различий характеристик спектров функций отклика пробных площадей в зонах А и Б в 2014–2019 гг. не наблюдается.

ОБСУЖДЕНИЕ

Как видно из сравнения рис. 4 и 5, в годы, непосредственно предшествующие началу вспышки массового размножения вредителей, и в период повреждений насаждений вредителями, характеристики спектра функций отклика NDVI в ответ на изменение LST отличаются от соответствующих характеристик LF и HF насаждений в периоды времени задолго до начала вспышки. После повреждений насаждений величины LF растут, а значения HF падают, то есть реакция характеристик фотосинтетического аппарата становится более медленной по сравнению с реакцией NDVI задолго до начала вспышки. Величины же HF, напротив, падают в процессе повреждения деревьев насекомыми. Непосредственно перед началом вспышки значения LF и HF достигает промежуточных значений между величинами этих характеристик до начала вспышки и после повреждений вредителями. Таким образом, можно полагать, что сдвиги характеристик спектра функций отклика могут использоваться в качестве индикаторов изменения состояния насаждений и его реакции на внешние воздействия. Если за 3–4 года до начала вспышки величины LF насаждений находятся вблизи значения LF = 0,3, а величины HF – вблизи значения HF = 0,6, то за год – два до начала вспышки эти значения сдвигаются к величинам LF = 0,45 и HF = 0,40.

Подобные же изменения характеристик спектра функций отклика наблюдаются и для пихтовых насаждений, еще не поврежденных сибирским шелкопрядом, но уже классифицируемых как находящиеся в зоне риска вспышки в связи с регистрацией самцов вредителя с помощью феромонных ловушек. Если в 2014–2019 гг. характеристики спектров функций отклика находились в области значений LF $\approx$ 0,1 и HF $\approx$ 0,5, то в 2020–2023 гг. эти значения сдвинулись в область с LF $\approx$ 0,2 и HF $\approx$ 0,4. Дальнейшие исследования, по-видимому, позволят оценить риск возникновения вспышки сибирского шелкопряда в этом районе. Заметим, что для оценок характеристик спектров функций

отклика нам понадобился день работы на компьютере без выезда в лес, так что рассматриваемые показатели возможно использовать для предварительных оценок восприимчивости насаждений к атакам вредителей.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Показано, что восприимчивость характеристик фотосинтетического аппарата дерева к изменению температуры среды в течение сезона может быть описана интегральным уравнением свертки и рассчитана по данным дистанционного зондирования. Это открывает возможность оценок таких показателей для любого участка планеты, покрытого растительностью. Для лесных насаждений Сибири показано, что 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 непосредственно перед вспышкой массового размножения лесных насекомых существенно отличаются от аналогичных показателей предшествующих лет. Используя предложенную методику оценки устойчивости насаждений, можно прогнозировать реализацию вспышки размножения насекомых на определенной территории и оптимизировать лесозащитные мероприятия. Как было сказано ранее, подобные прогнозы не могут быть получены по абсолютным показателям вегетативного состояния древостоев NDVI.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЕ ССЫЛКИ

- Ким Д. П. Теория автоматического управления. Т. 2. М. : Физматлит, 2007. 440 с.
- Краснов М. Л., Киселев А. И., Макаренко Г. И. Интегральные уравнения. М. : КомКнига, 2007. 192 с.
- Макс Ж. Методы и техника обработки сигналов при физических измерениях. М. : Мир, 1983. Т. 1. 312 с.
- Морс Ф. М., Фешбах Г. Методы теоретической физики. М. : ИЛ, 1960. Т. 2. 942 с.
- Общедоступная база данных спутниковых систем MODIS [Электронный ресурс]. URL: <http://modis.gsfc.nasa.gov> [Public database of MODIS satellite systems].
- Bayarjargal Y., Karnieli A., Bayasgalan M., Khudulmur S., Gandush C., Tucker C. J., 2006. A comparative study of NOAA-AVHRR derived drought indices using change vector analysis // Int. J. Remote Sens. 105 (1), 9–22.

Cunha, M., Richter, C., 2014. A time-frequency analysis on the impact of climate variability with focus on semi-natural montane grassland meadows // *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* 52 (10), 6156–6164.

Jacquin, A., Sheeren, D., & Lacombe, J.-P. (2010). Vegetation cover degradation assessment in Madagascar savanna based on trend analysis of MODIS NDVI time series. // *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 12, S3–S10.

Lewis M. A., Nelson W., Xu C. A structured threshold model for mountain pine beetle outbreak // *Bull. Math. Biol.* 2010.72, 565–589.

Liang L., Chen Y., Hawbaker T., Zhu Z., Gong P. Mapping mountain pine beetle mortality through growth trend analysis of time-series landsat data // *Remote Sens.* 2014. 6, 5696–5716.

Liu Yan, Hill Michael J., Zhang Xiaoyang, Wang Zhuosen, Richardson Andrew D., Hufkens Koen, Filippa Gianluca, Baldocchi Dennis D., Ma Siyan, Verfaillie Joseph, Schaaf Crystal B. Using data from Landsat, MODIS, VIIRS and Pheno Cams to monitor the phenology of California oak/grass savanna and open grassland across spatial scales // *Agricultural and Forest Meteorology*, 237–238 (2017), 311–325.

Olsson P. O., Lindstrom J., Eldundh L. Near real-time monitoring of insect induced defoliation in subalpine birch forests with MODIS derived NDVI // *Remote Sens. Environ.* 2016. 181, 42–53.

Rechid D., Raddatz T. J., Jacob D., 2009. 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.* 95, 245–255.

Senf C., Seidl R., Hostert P. Remote sensing of forest insect disturbances: Current state and future directions // *Int J Appl Earth Obs Geoinformation*. 2017. 60. 49–60.

Spruce J. P., Sader S., Ryan R. E., Smoot J., Kuper P., Ross, K., Prados D., Russell J., Gasser G., McKellip R., 2011. Assessment of MODIS NDVI time series data products for detecting forest defoliation by gypsy moth outbreaks // *Remote Sens. Environ.* 115, 427–437.

Thayn J. B. Using a remotely sensed optimized Disturbance Index to detect insect defoliation in the Apostle Islands, Wisconsin, USA // *Remote Sens. Environ.* 2013. 136, 210–217.

Tucker C. J., Sellers P. J. Satellite remote sensing of primary production // *Int. J. Remote Sens.* 1986, 7, 1395–1416.

Verbesselt J., Zeileis A., Herold M. Near real-time disturbance detection using satellite image time series // *Remote Sens. Environ.* 2012. 123, 98–108.

REFERENCES

Kim D. P. *Teoriya avtomaticheskogo upravleniya*. T. 2. M. : Fizmatlit, 2007. 440 s.

Krasnov M. L., Kiselev A. I., Makarenko G. I. *Integral'nyye uravneniya*. M. : KomKniga, 2007. 192 s.

Maks Zh. *Metody i tekhnika obrabotki signalov pri fizicheskikh izmereniyakh*. M. : Mir, 1983. T. 1. 312 s.

Mors F. M., Feshbakh G. *Metody teoreticheskoy fiziki*. M. : IL, 1960. T. 2. 942 s.

Obshchedostupnaya baza dannykh sputnikovyykh sistem MODIS [Elektronnyy resurs]. Rezhim dostupa: <http://modis.gsfc.nasa.gov>. [Public database of MODIS satellite systems].

Bayarjargal, Y., Karnieli, A., Bayasgalan, M., Khudumur, S., Gandush, C., Tucker, C.J., 2006. A comparative study of NOAA-AVHRR derived drought indices using change vector analysis // *Int. J. Remote Sens.* 105 (1), 9–22.

Cunha, M., Richter, C., 2014. A time-frequency analysis on the impact of climate variability with focus on semi-natural montane grassland meadows // *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.* 52 (10), 6156–6164.

Jacquin, A., Sheeren, D., & Lacombe, J.-P. (2010). Vegetation cover degradation assessment in Madagascar savanna based on trend analysis of MODIS NDVI time series // *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 12, S3–S10.

Lewis M. A., Nelson W., Xu C. A structured threshold model for mountain pine beetle outbreak // *Bull. Math. Biol.* 2010. 72, 565–589.

Liang L., Chen Y., Hawbaker T., Zhu Z., Gong P. Mapping mountain pine beetle mortality through growth trend analysis of time-series landsat data // *Remote Sens.* 2014. 6, 5696–5716.

Liu Yan, Hill Michael J., Zhang Xiaoyang, Wang Zhuosen, Richardson Andrew D., Hufkens Koen, Filippa Gianluca, Baldocchi Dennis D., Ma Siyan, Verfaillie Joseph, Schaaf Crystal B. Using data from Landsat, MODIS, VIIRS and Pheno Cams to monitor the phenology of California oak/grass savanna and open grassland across spatial scales // *Agricultural and Forest Meteorology*, 237–238 (2017), 311–325.

Olsson P. O., Lindstrom J., Eldundh L. Near real-time monitoring of insect induced defoliation in subalpine birch forests with MODIS derived NDVI // *Remote Sens. Environ.* 2016. 181, 42–53.

Rechid, D., Raddatz, T. J., Jacob, D., 2009. 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.* 95, 245–255.

Senf C., Seidl R., Hostert P. Remote sensing of forest insect disturbances: Current state and future directions // *Int J Appl Earth Obs Geoinformation*. 2017. 60. 49–60.

Spruce, J. P., Sader, S., Ryan, R. E., Smoot, J., Kuper, P., Ross, K., Prados, D., Russell, J., Gasser, G., McKellip, R., 2011. Assessment of MODIS NDVI time series data products for detecting forest defoliation by gypsy moth outbreaks // *Remote Sens. Environ.* 115, 427–437.

Thayn J. B. Using a remotely sensed optimized Disturbance Index to detect insect defoliation in the Apostle Islands, Wisconsin, USA // *Remote Sens. Environ.* 2013. 136, 210–217.

Tucker C. J., Sellers P. J. Satellite remote sensing of primary production // *Int. J. Remote Sens.* 1986, 7, 1395–1416.

Verbesselt J., Zeileis A., Herold M. Near real-time disturbance detection using satellite image time series // *Remote Sens. Environ.* 2012. 123, 98–108.

© Суховольский В. Г., Ковалев А. В., Астапенко С. А., 2024