

# АНАЛИЗ ОЧАГОВ ПОВРЕЖДЕНИЯ ТАЕЖНЫХ ЛЕСОВ СИБИРСКИМ ШЕЛКОПРЯДОМ ПО ДАННЫМ МЕЛКОМАСШТАБНОЙ КОСМОСЪЕМКИ\*

С. Т. ИМ, Е. В. ФЕДОТОВА, В. И. ХАРУК

*Институт леса им. В.Н. Сукачева СО РАН, Красноярск, Россия*

e-mail: elfed@ksc.krasn.ru, kharuk@ksc.krasn.ru

This research is aimed at the use of the TERRA/MODIS data for the dark needle forests monitoring. The study was motivated by recent Siberian silkmoth outbreaks. The MODIS data allows to observe the increase of damaged areas during the vegetation period using NDVI as an informative parameter. The use of digital elevation model provides a possibility to determine the location of silkmoth pestholes.

## Введение

Сибирский шелкопряд (*Dendrolimus superans sibiricus* Tschetw) — основной вредитель хвойных лесов азиатской части России. Вспышки его массового размножения особенно разрушительны в темнохвойной тайге с доминированием пихты и кедра. Резкий скачок численности гусениц индуцируется сочетанием благоприятных погодных условий (оптимальная температура, низкий уровень осадков и влажности). В пределах Енисейского меридиана вспышки наблюдаются с периодичностью 15–25 лет, и в темнохвойных лесах Красноярского края в период с 1878 по 2004 г. они зафиксированы десять раз. На территории Нижнего Приангарья вспышка произошла в 1993–1996 гг. Гусеницы шелкопряда повредили леса на площади около 1 млн га. Последняя вспышка массового размножения произошла в 1998–2004 гг. на сопредельных территориях Красноярского края и Иркутской области в междуречье Туманшета и Агула. Около 15 250 га насаждений имели повреждения крон свыше 50 %.

Данные среднемасштабного зондирования Landsat применялись для оценки состояния растительного покрова и хода восстановительных сукцессий на территориях бывших шелкопрядников [1–3]. Практический интерес представляет исследование возможностей применения данных мелкомасштабной съемки для целей мониторинга вспышек массового размножения насекомых-вредителей, так как информацию о конкретной территории с таким масштабом можно получать не реже одного раза в сутки. Поскольку спектральные характеристики погибших древостоев и здоровой растительности различны, идентификация повреждений растительного покрова, особенно участков леса,

---

\*Работа выполнена при финансовой поддержке Интеграционного проекта СО РАН № 86.

© Институт вычислительных технологий Сибирского отделения Российской академии наук, 2007.

полностью погибших в результате вспышки, возможна. Ограничение в данном случае связано с пространственным разрешением этой съемки: массивы поврежденных насаждений должны иметь площадь несколько сотен гектаров.

В работах [4, 5] показано, как по данным NOAA/AVHRR с пространственным разрешением 1 км для территории Нижнего Приангарья были выделены погибшие от сибирского шелкопряда насаждения. Более того, по этим данным удалось проследить увеличение площади поврежденных лесов в течение одного вегетационного периода. Выделение погибших насаждений возможно осуществить в том числе и по снимкам, полученным в зимний период. Более современным прибором с близким пространственным разрешением является спектрорадиометр MODIS, установленный на платформе TERRA. Этот прибор в большей степени ориентирован на исследование наземных объектов, чем AVHRR. К достоинствам съемки TERRA/MODIS можно отнести: 1) большую ширину полосы съемки (около 2300 км); 2) 36 спектральных каналов в видимом и инфракрасном диапазоне, ориентированных на согласованное изучение параметров атмосферы, океана и суши; 3) пространственное разрешение 250...1000 м в надире; 4) возможность оперативного приема данных наземными станциями, что позволяет осуществлять мониторинг; 5) бесплатное распространение данных через портал EOS Data Gateway [6], систему архивов NASA и архивы многих наземных станций.

Цель работы состояла в том, чтобы по материалам съемки MODIS выделить леса, поврежденные в 1994–1996 и 1998–2004 гг. сибирским шелкопрядом, а также, используя цифровую модель рельефа, определить особенности расположения таких лесов по элементам рельефа (высота над уровнем моря, экспозиция и крутизна склонов).

Таким образом, можно сопоставить результаты для территорий, где вспышки произошли с интервалом около 10 лет, используя близкие по характеристикам средства космосъемки.

## 1. Объекты исследования

Приангарский район Средне-Сибирской равнинной лесорастительной области характеризуется южно-таежным ландшафтным комплексом типов леса (рис. 1). Рельеф местности представляет собой холмистое плато. Климат района континентальный. Среднегодовое количество осадков около 400...450 мм. Среднегодовая температура  $+2.6^{\circ}\text{C}$  с абсолютным минимумом в декабре ( $-54^{\circ}\text{C}$ ) и абсолютным максимумом ( $+36^{\circ}\text{C}$ ) в июле. Продолжительность вегетационного периода 100 дней. Леса покрывают 95% территории, их породный состав представлен всеми основными видами: пихта (*Abies sibirica*), кедр (*Pinus sibirica*), ель (*Picea obovata*), сосна (*Pinus silvestris*), лиственница (*Larix sibirica*), осина (*Populus tremula*), береза (*Betula verrucosa*). Насаждения III–IV бонитета с запасом древесины 200...230 м<sup>3</sup>/га и средним возрастом 135 лет. Основной кормовой культурой сибирского шелкопряда в данном регионе является пихта [7].

Второй объект исследования находится в Алтае-Саянской горной лесорастительной области и соответствует Восточно-Саянской провинции кедровых лесов (Агул-Туманшетскому округу таежно-черневых пихтовых и горно-таежных кедровых лесов) [8]. Территория располагается по северному макросклону Восточного Саяна, имея значительное протяжение с северо-запада на юго-восток. Климат во многом обуславливается направлением хребтов. Провинция находится в тени основных влагонесущих ветров. Это определяет высокую континентальность климата. В западной части водораздел хребта

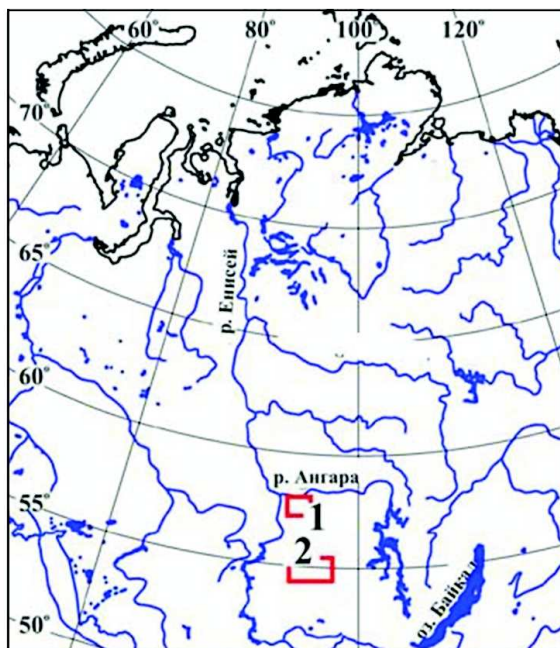


Рис. 1. Схема расположения районов исследования: 1 — Нижнее Приангарье, 2 — Восточный Саян

Манское Белогорье представляет основной климатический рубеж. Выступ к северу в бассейн рек Агул и Туманшет получает наибольшее количество осадков (540 мм/год). Обширное водораздельное пространство с относительно сглаженным рельефом и с абсолютными отметками высот до 700 м занято преимущественно пихтовыми и кедрово-пихтовыми лесами. Очаги сибирского шелкопряда приурочены к зеленомошным типам леса. Общая площадь насаждений, поврежденных в разной степени сибирским шелкопрядом, составляет 16 524 га. Переход на одногодичный цикл развития почти полностью реализовало поколение, отродившееся в 2002 г. [9].

## 2. Материалы для исследования

Для классификации данных MODIS и анализа пространственной приуроченности насаждений, пострадавших в результате вспышки сибирского шелкопряда в Нижнем Приангарье, применялась карта, составленная по материалам наземных обследований и данным дешифрирования аэрофотоснимков [10]. На карте выделены четыре градации повреждений насаждений: слабые повреждения (обесхвоивание до 25%), средние (25–50%), сильные (50–75%) и сплошные (100% обесхвоивания деревьев).

В анализе использованы два типа продуктов MODIS. Во-первых, это 16-дневные композиты (MODIS13) с 12 по 28 августа 2000 г. Изображения содержат шесть слоев: вегетационный индекс нормированной разности NDVI, улучшенный вегетационный индекс EVI, красный (620...670 нм), ближний инфракрасный (841...876 нм), синий (459...479 нм) и средний инфракрасный (1628...1652 нм) каналы датчика. Второй вид продуктов — это также 16-дневные композиты с 28 июля по 12 августа 2002 г., изображения с четырьмя слоями: NDVI, красный, ближний и средний инфракрасные каналы MODIS. Наземное разрешение снимков 500 м.

Выделение погибших древостоев осуществлялось на основе карты повреждений [10] и с помощью снимка Landsat 7 ETM+ от 22 июля 1999 г.

При анализе вспышки массового размножения, произошедшей в 1998–2004 гг. на территории Восточного Саяна, использовались лесоустроительные материалы Кесовского лесхоза 1996 г. и топографические карты М 1:200 000. Данные дистанционного зондирования представлены 38 снимками MODIS с июля 2000 г. по август 2004 г. [6, 11]. Продукт MOD09A1 содержит семь каналов (470, 555, 648, 858, 1240, 1640 и 2130 нм) с пространственным разрешением 500 м.

Цифровая модель рельефа для обоих участков получена по данным микроволновой съемки с космического корабля Shuttle (2000 г). Использованный материал представлен изображениями, охватывающими территорию размером по  $1 \times 1^\circ$ , и имеет исходное пространственное разрешение 90 м, точность определения высоты составляет около 20 м. При приведении снимка в географическую проекцию Ламберта разрешение цифрового рельефа составило 50 м, что определяется географической широтой местности.

Экспозиции представлены восемью градациями: север ( $338-23^\circ$ ), северо-восток ( $24-68^\circ$ ), восток ( $69-113^\circ$ ), юго-восток ( $114-158^\circ$ ), юг ( $159-203^\circ$ ), юго-запад ( $204-248^\circ$ ), запад ( $249-293^\circ$ ) и северо-запад ( $294-338^\circ$ ). Градации крутизны склонов не проводилось.

### 3. Методика обработки данных

**Нижнее Приангарье.** Для выделения погибших и оставшихся темнохвойных насаждений использовался композит MODIS из четырех каналов — NDVI, красного, ближнего и среднего инфракрасного. Обработка проводилась по следующей методике. Обучающие выборки для погибших древостоев определялись по карте [10]. С целью выделения обучающих выборок для темнохвойных насаждений использовались карты-схемы лесхозов (Усольского и Чунского) [12, 13]. Особенность задачи выделения погибших насаждений состояла в том, что поскольку они неоднородны в природе, то и сигнатуры, им соответствующие, определенные на разных участках изображения, статистически разделимы при оценке с помощью расстояния Джеффриса — Матусита [14]. Так как цель классификации состояла в выделении только погибших насаждений, а с другой стороны, значения в обучающих выборках не распределены по закону нормального распределения, классификация проводилась методом параллелепипеда. Границы интервалов редактировались, в данной работе использовался интервал  $2\sigma$  относительно среднего значения обучающей выборки.

После проведения классификации на изображении убиралась ошибочно классифицируемые как погибшие насаждения территории, так как за пределами поврежденного района и внутри него имеются области, которые спектрально плохо разделяются с погибшими от шелкопряда насаждениями. К таким областям относятся гари и вырубки, а также болота, поля и другие нелесные территории с низким значением NDVI.

На втором этапе классификация проводилась с использованием цифрового рельефа местности. Размер пикселя анализируемого изображения MODIS был приведен к размеру пикселя изображения рельефа и составил 50 м. В классификации использовалось семь слоев: четыре вышеперечисленных спектральных слоя и три слоя рельефа: высота местности над уровнем моря, экспозиция и угол уклона. Классификация проводилась по аналогичной схеме. Оценка точности классификации выполнялась по областям, заведомо относящимся к погибшим древостоям (тем же, что и в предыдущем случае).

Точность классификатора составила 81 %, пользователя — также 100 %. Снижение точности классификации объясняется техническим увеличением пространственного разрешения спектральных данных при том же масштабе картографического материала, а также независимостью положения погибших древостоев от экспозиции и крутизны склонов, как показал дальнейший анализ.

Темнохвойные насаждения выделялись для того, чтобы оценить их первоначальное распределение до вспышки 1994 г. и изменения, происшедшие в результате гибели лесов. Классификация проводилась методом параллелепипеда с интервалом  $2\sigma$ . Точность классификации оценивалась по десяти областям темнохвойных насаждений с размерами, аналогичными обучающим выборкам (две из них — обучающие выборки). В класс темнохвойных насаждений на снимке 2002 г. попадают и насаждения, которые были повреждены в слабой или средней степени и восстановились полностью или в достаточной степени к моменту съемки, чтобы их спектральные характеристики совпадали с таковыми для здоровых темнохвойных насаждений.

Поскольку разные категории элементов рельефа (т. е. территории с определенными азимутами, крутизной и высотой) на территории представлены неравномерно, применялась процедура нормирования данных по площади. При этом площади повреждений для данной категории параметров рельефа (интервалы крутизны, высоты или азимута) были поделены на площадь с такими параметрами в пределах поврежденной территории. Данный подход использован в работе [15]. Нормировка проводилась с использованием следующего коэффициента:

$$\kappa_{\alpha} = S_{\alpha}^f / S_{\alpha},$$

где  $S_{\alpha}^f$  — площадь повреждений с определенным значением параметра рельефа;  $S_{\alpha}$  — площадь с данным значением параметра рельефа на всей территории.

**Восточный Саян.** Все снимки, материалы лесоустройства, топографические карты импортированы в Erdas Imagine и приведены в универсальную поперечную проекцию Меркатора. Из снимков вырезаны фрагменты, соответствующие объекту исследования ( $55^{\circ}40' - 55^{\circ}46'$  с.ш.,  $95^{\circ}11' - 95^{\circ}23'$  в.д., около 3.2 млн га). Для всех снимков подсчитаны NDVI. Проведен предварительный анализ качества снимков, в результате чего часть из них была исключена из дальнейшего анализа из-за облачности; некоторые снимки не использовались при анализе пространственно-временной динамики поврежденных древостоев, но применялись при расчете NDVI. Для каждого анализируемого класса построены диаграммы динамики NDVI и его разности между поврежденными и здоровыми древостоями.

Для анализа пространственно-временной динамики площадей поврежденных сибирским шелкопрядом древостоев применялась следующая методика. На первом этапе генерировалась маска темнохвойных древостоев, которая накладывалась на все оставшиеся снимки. Для ее генерации методом максимального правдоподобия использовалось изображение, полученное 20 августа 2000 г., на котором не было признаков повреждения лесов в результате вспышки массового размножения шелкопряда. В общем, для идентификации темнохвойных древостоев использовано пять обучающих выборок (4318 пикселей, что составляет 3.4 % от изображения). Далее были составлены картосхемы и определены изменения площадей поврежденных древостоев. Следует отметить, что идентификация начальной стадии вспышки на снимках MODIS затруднена присутствием облачности и пространственным разрешением съемки. Поэтому выделение производилось с помощью NDVI. По полученным данным проведен анализ пространственно-временной

динамики площадей поврежденных древостоев в связи с рельефом местности. Для получения независимых от территориальной представленности темнохвойных древостоев по элементам рельефа проведена нормализация площадей поврежденных древостоев с использованием формулы

$$N_i = A_i/B_i,$$

где  $N_i$  — нормализованные значения площадей поврежденных древостоев;  $A_i$  — абсолютные значения площадей поврежденных древостоев;  $B_i$  — абсолютные значения площадей темнохвойных древостоев;  $i$  — индекс, соответствующий дискретным значениям высот, азимутов и углов склонов.

Для выражения нормализованных значений в процентах использовалась модифицированная формула

$$N'_i = (A_i/B_i)100 / \sum_{i=a}^b (A_i/B_i),$$

где  $N'_i$  — нормализованные значения площадей поврежденных древостоев, выраженных в процентах от общей площади поврежденных древостоев, представленной на заданном элементе рельефа;  $[a, b]$  — диапазон изменения индексов  $i$ , соответствующий диапазонам варьирования высот, азимутов и углов склонов.

#### 4. Результаты и обсуждение

**Нижнее Приангарье.** На основе снимка MODIS проведена классификация и получена картосхема погибших насаждений (рис. 2). По масштабам повреждения вспышка носила катастрофический характер. Полностью уничтожено около 250 тыс. га темнохвойных лесов, их восстановление на таких обширных площадях сильно затруднено. Старые очаги размножения сибирского шелкопряда являются очагами размножения стволовых вредителей и потенциальными очагами крупных лесных пожаров, что обусловлено увеличением запасов горючих материалов.

Проведен анализ распределения выделенных темнохвойных насаждений по элементам рельефа. На рис. 3 представлено распределение по высотам над уровнем моря оставшихся темнохвойных насаждений и темнохвойных насаждений до вспышки сибирского

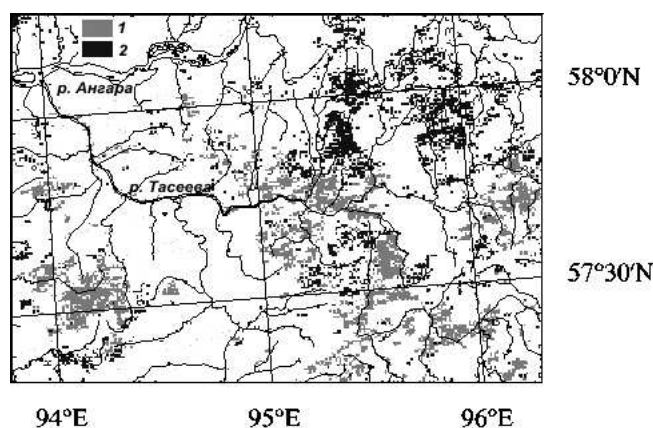


Рис. 2. Нижнее Приангарье. Картосхема погибших древостоев, состояние 2002 г.: 1 — погибшие насаждения, 2 — темнохвойные насаждения

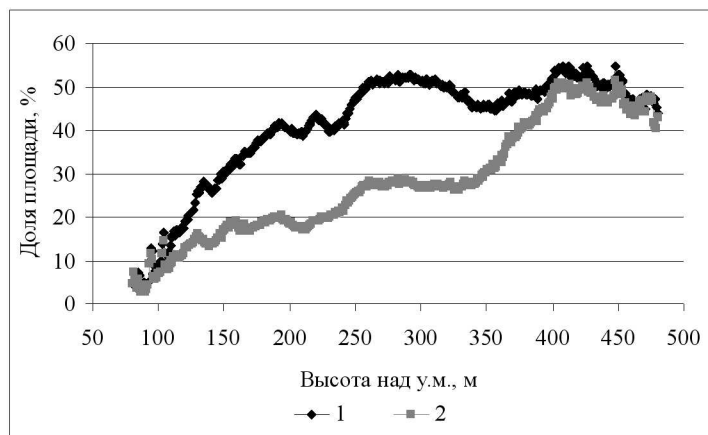


Рис. 3. Доля площади, занятой темнохвойными насаждениями, в зависимости от высоты над уровнем моря: 1 — до вспышки (1994 г.), 2 — после вспышки (2002 г.)

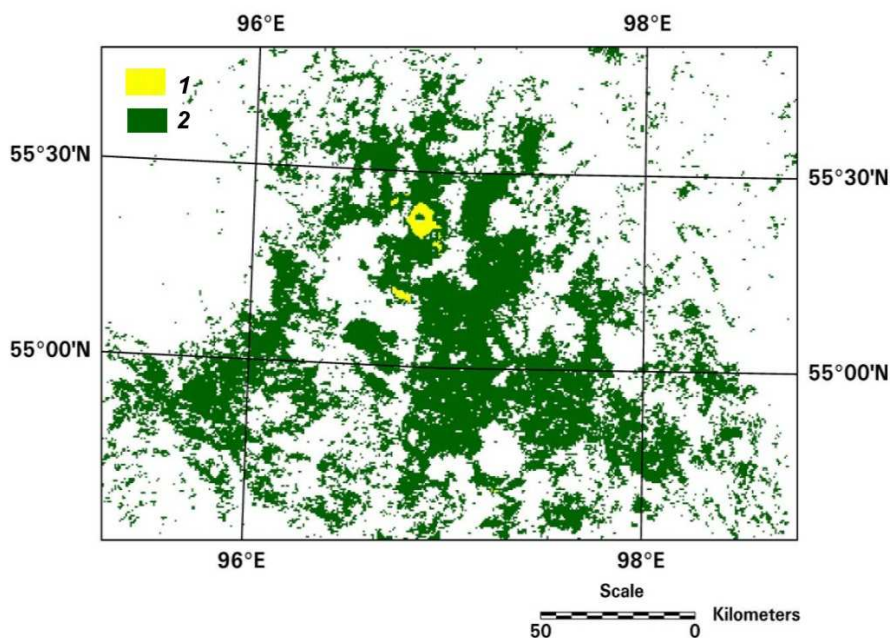


Рис. 4. Картограмма поврежденных древостоев, Восточный Саян: 1 — поврежденные насаждения, 2 — темнохвойные насаждения

шелкопряда (как сумма оставшихся и погибших насаждений). На благоприятных высотах погибла половина пихтовых лесов. Уцелевшие насаждения расположены на более высоких участках. Для распределения по экспозициям склонов и крутизне склонов такой явной зависимости не выделяется: к концу развития вспышки гусеницы шелкопряда занимают все периферийные участки относительно первоначального очага, распространяясь на более крутые склоны, в том числе не только южных экспозиций.

**Восточный Саян.** На рис. 4 приведена схема поврежденных на этой территории насаждений по состоянию на 2004 г.

Представленный на рис. 5 график динамики NDVI с июля 2000 г. по август 2004 г. отражает естественный ход этого показателя для здоровых древостоев (уменьшение его в зимний период для мелколиственных лесов, более высокие значения NDVI тем-

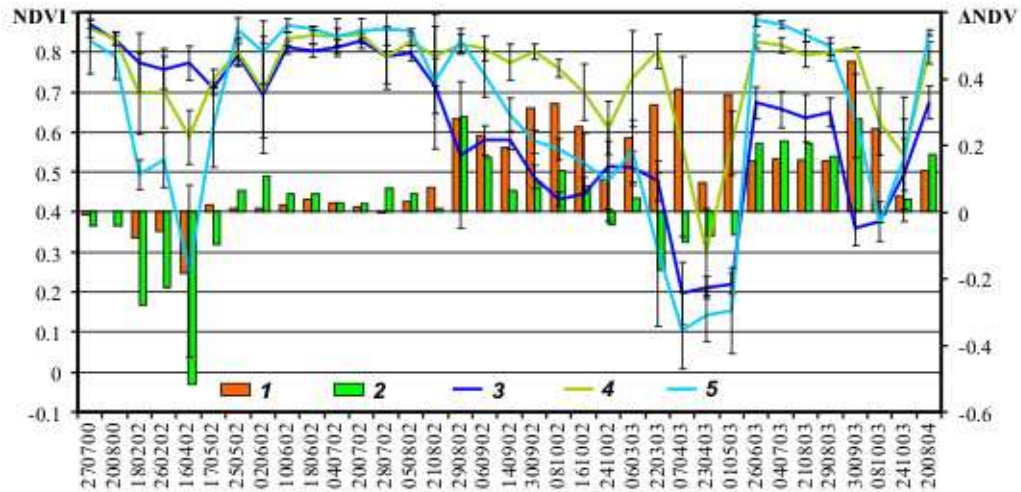


Рис. 5. Динамика NDVI по данным MODIS (Восточный Саян): 1 — разница между NDVI темнохвойных и поврежденных насаждений; 2 — разница между NDVI мелколиственных лесов и поврежденных насаждений; 3 — поврежденные насаждения; 4 — темнохвойные насаждения; 5 — мелколиственные насаждения

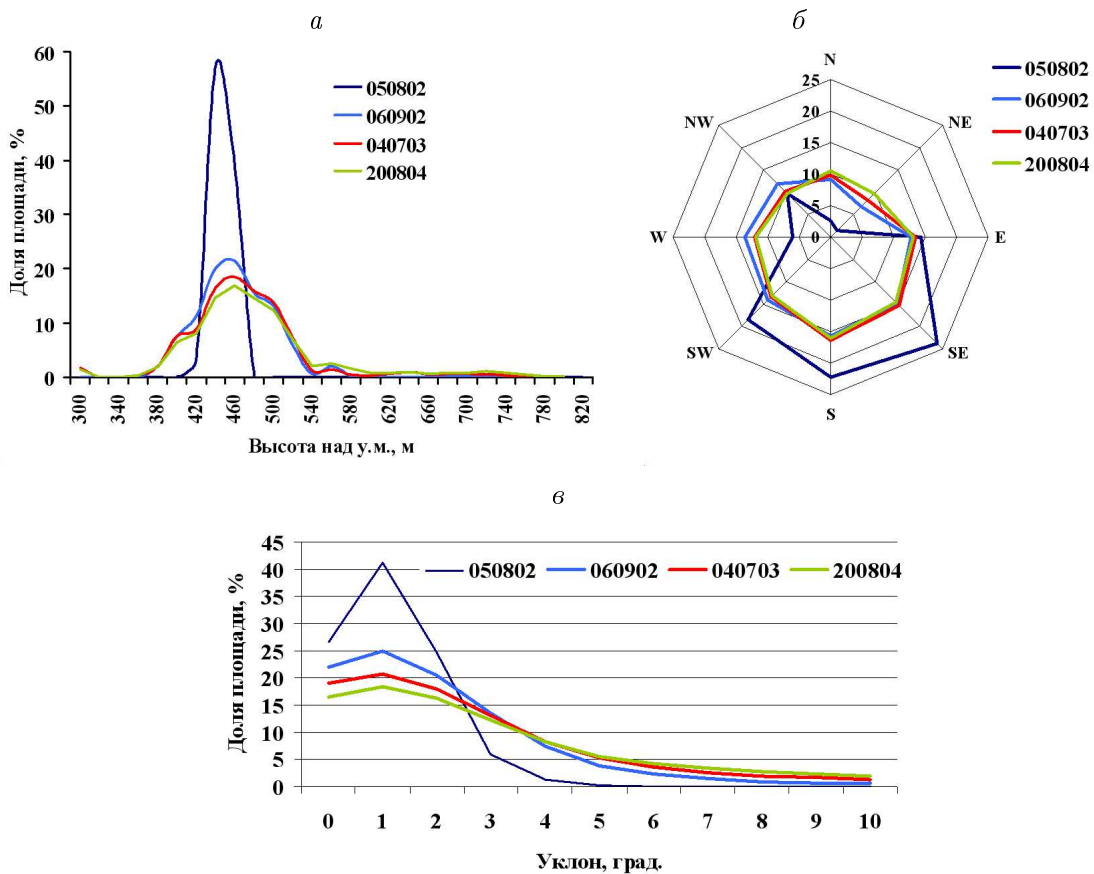


Рис. 6. Нормализованные значения распределения площадей поврежденных древостоев в зависимости от высоты над уровнем моря (а), от азимутального направления склона (б), от крутизны склона (в)



нохвойных насаждений в зимний период). Для поврежденных древостоев наблюдается резкое уменьшение значений индекса в конце вегетационного периода 2002 г., когда была уничтожена хвоя деревьев на достаточной для съемки такого пространственного разрешения площади. В период вегетации 2003–2004 гг. значения индекса остаются низкими, характерными для территорий с малым количеством биомассы. Отметим, что график демонстрирует стабильное состояние NDVI погибших древостоев ниже, чем у темнохвойных насаждений, в том числе и в зимний период.

Оценка площади пострадавших древостоев проводилась по результатам классификаций снимков 2002–2004 гг. В августе 2002 г. она составила 250 га, к началу сентября увеличилась до 11 тыс. га, к марту 2003 г. их площадь составила около 19 тыс. га. За вегетационный период 2003 г. площадь увеличилась на 7 тыс. га, а к концу вегетационного сезона 2004 г. она уже составила почти 25 тыс. га лесов. Основной этап вспышки реализовался в 2002–2003 гг. Последующее отмирание деревьев является инерционным процессом, связанным с неблагоприятными для их восстановления условиями, деятельностью стволовых вредителей (например, пихтового усача) и пожарами.

Из анализа распределения прироста площадей поврежденных древостоев в зависимости от рельефа местности следует, что в начале вспышки шелкопряд охватил древостои, расположенные на высотах около 450 м над уровнем моря, преимущественно на склонах южных экспозиций (рис. 6), что соответствует его оптимальной зоне. Далее шелкопряд распространился на периферийные участки, расширив высотный диапазон и охватив склоны северной ориентации с углами уклона до 5–6 град.

## Заключение

Проведенные исследования показывают, что регулярные съемки территории сибирских лесов из космоса даже в мелком масштабе (NOAA/AVHRR, TERRA/MODIS) позволяют вести мониторинг состояния древостоев в очаге вспышки массового размножения сибирского шелкопряда. Привлечение цифровой модели рельефа и данных о положении первичных очагов вредителя позволяет сосредоточить мониторинг на ограниченных территориях с наибольшей вероятностью возникновения вспышки массового размножения. Первые признаки повреждений древостоев заметны в конце вегетационного периода года с катастрофическим увеличением численности вредителя. Это особенно четко просматривается на материалах MODIS, так как они имеют суточное временное разрешение съемки. Информативным параметром является NDVI, который позволяет обнаруживать уничтожение зеленой массы хвои в поврежденных кронах деревьев. После затухания вспышки по данным MODIS проводится мониторинг процесса восстановления растительного покрова в шелкопрядниках. Из анализа материалов на территорию Нижнего Приангарья следует, что в течение 5–6 лет после затухания вспышки массового размножения погибшие древостои представляют собой по-прежнему участки с низким значением NDVI, что говорит о малом количестве зеленой биомассы. Такие территории надолго выпадают из хозяйственного оборота. Поврежденные насаждения обычно подвергаются нашествиям стволовых вредителей, а также пожарам.

Полученные данные позволяют констатировать пригодность съемки TERRA/MODIS для обнаружения очагов массового размножения сибирского шелкопряда и отслеживания динамики повреждения и восстановления древостоев, обладая преимуществом получения данных в режиме, близком к реальному времени.

## Список литературы

- [1] ХАРУК В.И., РЭНСОН К.ДЖ., КУЗЬМИЧЕВ В.В. и др. Съёмка Landsat в анализе шелкопрядников южной Сибири // Исследования Земли из космоса. 2002. № 4. С. 1–12.
- [2] KHARUK V.I., RANSON K.J., KUZ'MICHEV V.V., IM S.T. Landsat-based analysis of insect outbreaks in southern Siberia // Can. J. Remote Sensing. 2003. Vol. 29, N 2. P. 286–297.
- [3] БУРЕНИНА Т.А., КУЗЬМИЧЕВ В.В., ХАРУК В.И. Шелкопряд и сукцессии в южной тайге Западной Сибири // Сиб. эколог. журн. 2005. № 1. С. 153–162.
- [4] ХАРУК В.И., ИСАЕВ А.С., КОЖУХОВСКАЯ А.Г. Возможности применения съёмки со спутников NOAA для мониторинга катастрофических повреждений лесов насекомыми // Лесоведение. 1998. № 4. С. 20–25.
- [5] ХАРУК В.И., КОЖУХОВСКАЯ А.Г., ПЕСТУНОВ И.А. и др. Съёмка NOAA/AVHRR в мониторинге вспышек сибирского шелкопряда // Исследование Земли из космоса. 2001. № 1. С. 1–7.
- [6] <http://edcimswww.cr.usgs.gov/pub/imswelcome>
- [7] КОНДАКОВ Ю.П., БАРАНЧИКОВ Ю.Н., ЧЕРКАШИН В.П., КОРЕЦ М.А. Районы массового размножения сибирского шелкопряда в лесах Приенисейской Сибири. Карта масштаба 1 : 800 000. Красноярск: Проект USAID ФОРЕСТ, Институт леса им. В.Н. Сукачева СО РАН, 2003.
- [8] СМАГИН В.Н., ИЛЬИНСКАЯ С.А., НАЗИМОВА Д.И. и др. Типы лесов гор Южной Сибири. Новосибирск: Наука, 1980. 336 с.
- [9] ОТЧЕТ по лесопатологическому обследованию части лесов Ирбейского, Мотыгинского, Пировского, Таежинского, Больше-Муртинского, Канского, Дзержинского и Уярского лесхозов федерального агентства лесного хозяйства по Красноярскому краю, Таймырскому (Долгано-Ненецкому) и Эвенкийскому автономным округам. Пушкино, 2004–2005 гг. 94 с.
- [10] ПОВРЕЖДЕНИЯ лесов сибирским шелкопрядом в 1996 г. Карта масштаба 1 : 800 000. Красноярск. Центр по защите леса.
- [11] <http://modis-land.gsfc.nasa.gov/mod09>
- [12] КАРТА-СХЕМА Усольского лесхоза (масштаб 1 : 200 000). 2000 г.
- [13] КАРТА-СХЕМА Чунского лесхоза (масштаб 1 : 250 000). 1997 г.
- [14] ERDAS IMAGINE Field Guide. 5th Edition. ERDAS INC., Atlanta, Georgia.
- [15] ХАРУК В.И., ЩЕРБИНИНА И.С., ЯКУБАЙЛИК О.Э., КАСИШКЕ Э. Анализ пространственного распределения гарей на острове Сахалин // Лесоведение. 2004. № 5. С. 66–72.
- [16] КОНДАКОВ Ю.П. Фитоценологические особенности массовых размножений хвое- и листогрызущих насекомых в лесах Сибири // Эколог. оценка местообитаний лесных животных. Новосибирск: Наука, 1987. С. 29–40.

*Поступила в редакцию 11 мая 2007 г.*