

ИСПОЛЬЗОВАНИЕ КОСМИЧЕСКОЙ ИНФОРМАЦИИ О ЗЕМЛЕ

УДК 528.873

СЪЕМКА NOAA/AVHRR В МОНИТОРИНГЕ ВСПЫШЕК СИБИРСКОГО ШЕЛКОПРЯДА

© 2001 г. В. И. Харук, А. Г. Кожуховская, И. А. Пестунов*,
К. Дж. Рансон, Г. М. Цибульский

Институт леса Сибирского отделения РАН, Красноярск

*Институт вычислительного моделирования Сибирского отделения РАН, Красноярск
НАСА, Гринбелт, США

Красноярский государственный технический университет

*Тел.: (3912)43-26-56

Поступила в редакцию 16.02.2000 г.

Выполнен анализ крупномасштабной вспышки массового размножения сибирского шелкопряда (*Dendrolimus sibiricus*) в лесах Нижнего Приангарья (1993-1996 гг.) на основе материалов съемки системой NOAA/AVHRR. Показана применимость данного вида съемки для обнаружения очагов повреждения древостоев с выделением сильных (50-75%) и очень сильных (>75%) усыхающих и усохших деревьев. Прослежена динамика развития вспышки. Установлена применимость данных зимней съемки при обнаружении поврежденных древостоев. Летние/зимние изображения использованы для демаркации северной границы очагового распространения сибирского шелкопряда.

Леса Енисейского меридионального трансекта (~90° в.д.) представляют собой местообитание многочисленных видов насекомых-вредителей, периодические вспышки размножения которых приводят к уменьшению продуктивности, деградации и гибели лесов на обширных территориях. Основной вредитель таежных лесов - сибирский шелкопряд *Dendrolimus sibiricus*. Вспышки его массового размножения охватывают леса на площади до нескольких миллионов гектар. Это насекомое повреждает древостои пихты (*Abies sibirica*), сосны сибирской кедровой (*Pinus sibirica*) (предпочитаемые виды) и лиственницы (*Larix sibirica*). На максимуме вспышки повреждается также ель (*Picea obovata*) [1]. На территории Енисейского меридиана вспышки массового размножения *Dendrolimus sibiricus* наблюдались в пределах от 52° до 59° с.ш. на востоке и до 62° с.ш. на западе.

Крупномасштабная вспышка сибирского шелкопряда наблюдалась на юге Енисейского меридионального трансекта (Нижнее Приангарье) в 1993-1996 гг. Поврежденные участки представлены мозаично расположенными очагами, ограниченными 57° и 59° с.ш. и 93° и 98° в.д. Катастрофические масштабы повреждений требуют разработки адекватных методов мониторинга. Ранее [2, 3] была показана возможность эффективного применения материалов спектральной аэрофотосъемки для автоматизированного дешифрирования поврежденных насекомых древостоев. Появление датчиков NOAA/AVHRR позволило наметить возможности использования этого вида съемки в обнаружении крупномасштабных вспышек массового размножения насекомых [4].

Цель данной работы - создание метода мониторинга вспышек массового размножения сибирского шелкопряда по материалам съемки NOAA/AVHRR.

ОБЪЕКТ ИССЛЕДОВАНИЙ

В 1993-1996 гг. в темнохвойных лесах южной тайги Красноярского края (Нижнее Приангарье) наблюдалась крупная вспышка массового размножения *Dendrolimus sibiricus*, общая площадь которой составила около 700 тыс. га, в том числе ~300 тыс. га с 50-100% погибших древостоев. Рельеф большей части территории представляет собой слабоволнистое плато. Почвы преимущественно подзолистые. Климат континентальный, годовое количество осадков составляет 400-500 мм, среднегодовая температура 2.6°C с абсолютным минимумом -54°C (декабрь) и максимумом 36°C (июль). Период вегетации длится около 100 дней. Преобладающая древесная порода - пихта сибирская; произрастают также ель, кедр, сосна, лиственница, осина (*Populus tremula*), береза (*Betula pendula*). Древостои III-IV классов бонитета с запаса древесины 200-230 м³/га, средний возраст 135 лет.

МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЙ

В анализе использовали временную серию (1995-1996 гг.) снимков, полученных со спутника NOAA/AVHRR в диапазонах 0.58-0.68; 0.725-1.1; 3.55-3.93; 10.3-11.3 и 11.5-12.5 мкм. Полоса обзора системы составляет ~2400 км, наземное разрешение

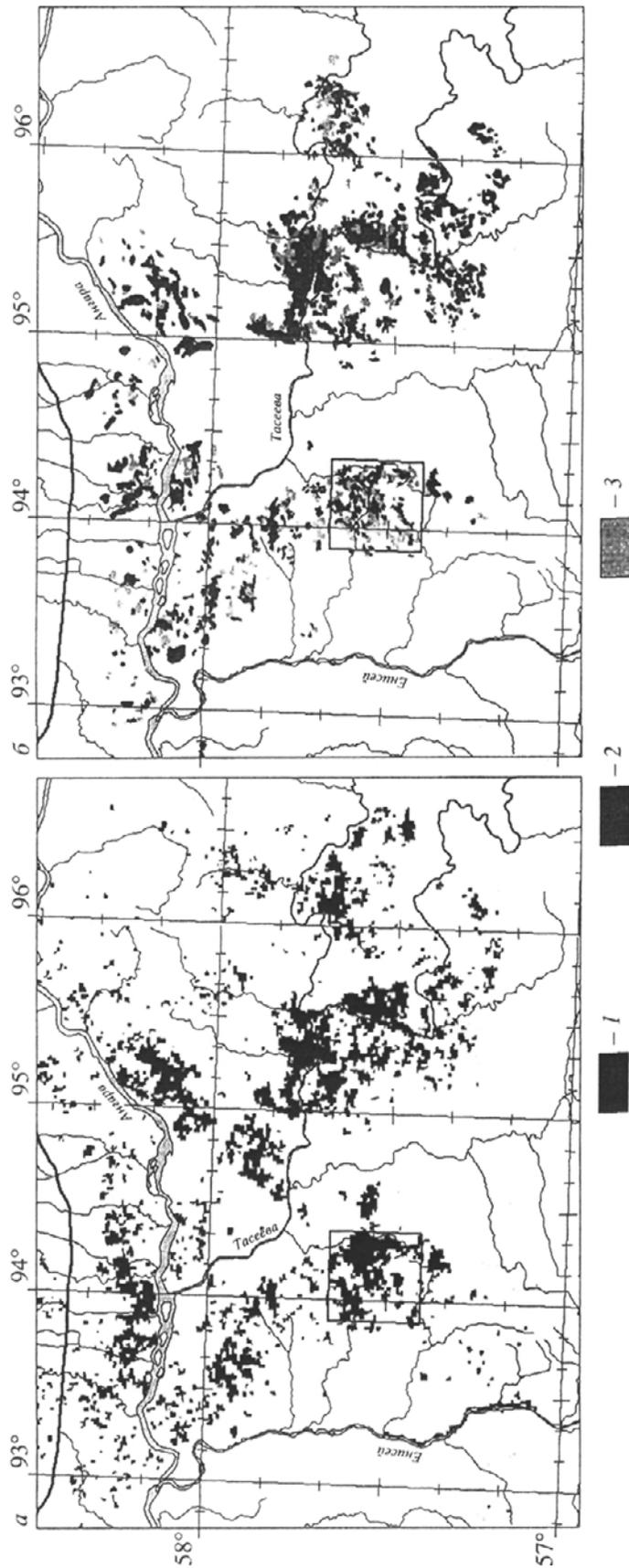


Рис. 1. Сопоставление карт повреждений лесов: а - картохема поврежденных древостоев, полученная на основе анализа зимних снимков AVHRR, б - карта, полученная по данным аэрофотосъемки; 1 - повреждения, выделение по зимним снимкам, 2, 3 - градации повреждений (очень сильные и сильные); верхняя линия - изотерма (1400-1600°C).

Таблица 1. Расстояния Джеффриса-Матусита для одномерного пространства признаков

Признак	Пары классов			
	<i>Bg/SI</i>	<i>Bg/Hv</i>	<i>Hv/SI</i>	<i>Md/SI</i>
Канал 1	2.000	1.548	2.000	2.000
Канал 2	1.998	2.000	1.964	0.868
Канал 3	0.346	1.634	0.673	0.156
Канал 5	1.178	1.865	1.491	0.971
NDVI	2.000	2.000	1.999	1.991
VI	1.999	2.000	2.000	1.975

Примечание. Здесь и в табл. 2: *Bg* - фон (неповрежденные), *SI* - слабые, *Md* - умеренные, *Hv* - сильные повреждения.

Таблица 2. Расстояния Джеффриса-Матусита для двумерного пространства признаков

Комбинация признаков	Пары классов			
	<i>Bg/SI</i>	<i>Bg/Hv</i>	<i>Hv/SI</i>	<i>Md/SI</i>
Каналы 1 и 2	2.000	1.414	2.000	2.000
Каналы 1 и 3	2.000	1.411	2.000	2.000
Каналы 1 и 5	2.000	2.000	2.000	2.000
Канал 1 и NDVI	2.000	1.414	2.000	2.000
Канал 1 и VI	2.000	2.000	2.000	2.000
Каналы 2 и 3	1.414	1.414	1.414	1.060
Каналы 2 и 5	1.414	1.414	1.414	0.750
Канал 2 и NDVI	2.000	1.414	2.000	2.000
Канал 2 и VI	2.000	2.000	2.000	2.000
Каналы 3 и 5	1.414	1.407	1.294	1.013
Канал 3 и NDVI	1.414	1.414	1.414	1.379
Канал 3 и VI	1.414	2.000	2.000	1.381
Канал 5 и NDVI	1.414	1.414	1.414	1.315
Канал 5 и VI	1.414	2.000	2.000	1.317

снимков ~1.1 км. Для дешифрирования материалов съемки AVHRR использовали карту повреждений, полученную Восточно-Сибирским лесоустроительным предприятием (рис. 1б). Она составлена на основе дешифрирования материалов спектральной аэрофотосъемки (М 1 : 15000) по стандартной методике. Степень повреждения древостоя определяли по соотношению усыхающих плюс погибших деревьев к неповрежденным. На исходной карте были представлены следующие градации повреждения лесов: очень сильные (>75% усыхающих и погибших деревьев), сильные (75-50%), умеренные (50-25%), слабые (<25%) и неповрежденные (<10% усыхающих и погибших деревьев); отметим, что на рис. 1б умеренные и слабые повреждения не представлены. Точность классификации данных NOAA/AVHRR оценивали двумя

методами: 1) по равномерно распределенным по исходной карте и классификационной картосхеме (генерированной по снимкам) тестовым участкам был подсчитан процент пропуска пораженных и включения неповрежденных участков; 2) по величинам κ -статистики, позволяющим сравнить соответствующие площади на карте и картосхеме [5, 6]. Значения $\kappa < 0.4$ соответствуют низкому уровню совпадения; $0.4 < \kappa < 0.55$ - удовлетворительному; $0.55 < \kappa < 0.7$ - хорошему; $\kappa > 0.7$ - очень хорошему.

Обработка снимков с целью обнаружения, локализации и картирования поврежденных территорий включает несколько этапов. На первом этапе производится предварительная обработка, предназначенная для коррекции геометрических искажений и улучшения визуальных характеристик изображения. Геометрическая коррекция основана на вычислении коэффициентов полинома 3-го порядка по 12 опорным точкам, опознанным на исходной карте [6]. Для улучшения визуальных характеристик изображения используются преобразования эквализации и линейного растяжения гистограммы. Для устранения импульсных шумов, обусловленных сканирующей аппаратурой, применяют процедуры медианной и модальной фильтраций.

На втором этапе осуществляется выбор наиболее информативных признаков для обнаружения и классификации повреждений. В качестве критерия отбора признаков использовалось расстояние Джеффриса-Матусита (JM) [6]. Информативным будем считать тот признак (набор признаков), для которого расстояние JM в случаях наиболее трудно разделимых пар классов будет наибольшим. Применительно к рассматриваемой задаче к таким парам классов относятся следующие: неповрежденные и слабо поврежденные; неповрежденные и сильно поврежденные; слабо и умеренно поврежденные; слабо и сильно поврежденные.

Исходный набор признаков включал значения яркостей, измеренных в каналах 1, 2, 3, 5 AVHRR, и два вегетационных индекса: нормализованный NDVI = $(I_{ir} - I_r) / (I_{ir} + I_r)$ и ненормализованный VI = I_{ir} / I_r , где I_r , I_{ir} - значения сигналов, регистрируемые соответственно в каналах 1 и 2 AVHRR. Значения вегетационных индексов принадлежат интервалу [-1, +1]. Для удобства обработки их значения были преобразованы к интервалу [0, 100].

Расположение обучающих выборок (площадок) на спутниковом снимке определялось с учетом карты повреждений. Результаты вычислений расстояний JM для одно- и двумерного случаев приведены в табл. 1 и 2 соответственно. Из анализа этих таблиц следует, что для одномерного пространства признаков наиболее информативными являются каналы 1 и 2, NDVI и VI, а для двумерного - пары {каналы 1 и 5}, {канал 1 и VI} и {2-й канал и VI}. Проведенные исследования

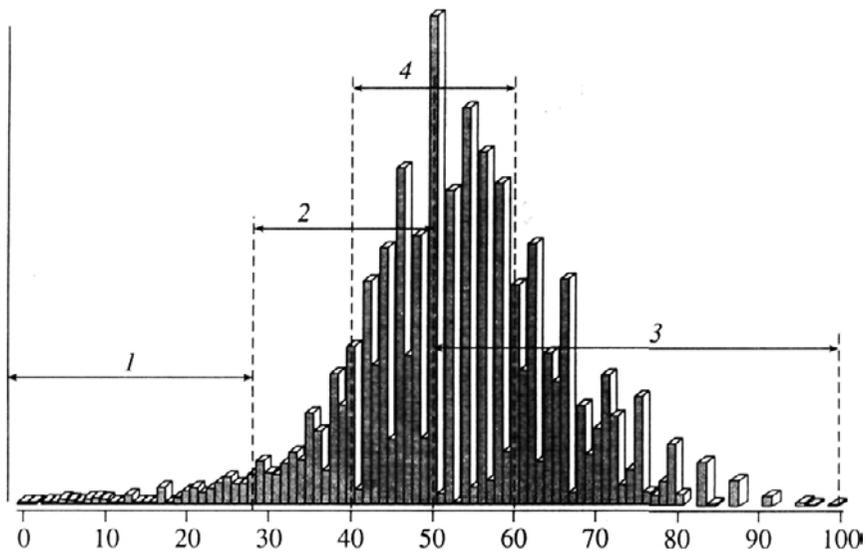


Рис. 2. Гистограмма значений вегетационного индекса: 1 - территории без растительности; 2 - возможные повреждения; 3 - растительность; 4 - снег.

показали, что использование набора из трех признаков является избыточным.

На третьем этапе обработки обнаруживаются и локализуются повреждения с помощью пороговой процедуры сегментации изображения на основе одного из двух вегетационных индексов. Для летних снимков устанавливаются два порога (рис. 2): первый служит для выделения нелесных территорий (реки, озера, минерализованные участки и т.п.); второй позволяет отделить вероятные повреждения от неповрежденных древостоев. Для зимних снимков вводится третий порог, позволяющий выделить покрытые снегом нелесные территории.

При применении пороговой процедуры сегментации особая трудность связана с обнаружением нелесных участков (реки, озера, голые склоны южной экспозиции, гари и т.п.), имеющих сходные с повреждениями значения вегетационных индексов. Локализация подобных участков - одна из сложных задач дешифрирования данных дистанционного зондирования. Для выделения таких участков (исключения их из дальнейшего анализа) целесообразно использовать геоинформационные системы (ГИС).

На четвертом, заключительном этапе обработки производится автоматическая классификация локализованных участков с помощью алгоритма Форэля [7] и построение картосхемы результатов классификации. Управляемым параметром в данном алгоритме является значение порога R - радиуса n -мерных сфер, которыми описывается классифицируемое множество в пространстве признаков.

В ходе обработки фрагмента, выделенного рамкой на рис. 1, при $R = 2$ на тестовом участке выделился 31 спектральный класс, при $R = 3$ - 18, а при $R = 7$ - 7 спектральных классов. Итоговое ко-

личество спектральных классов не должно быть большим, так как это усложняет интерпретацию результатов, но не должно быть и слишком маленьким, поскольку при этом возможна потеря значимых классов. На рис. 3 изображена диаграмма распределения центров спектральных классов, представляющая пять категорий состояния лесных территорий.

Предварительная локализация очагов повреждений сокращает объем необходимой для автоматической классификации информации и позволяет обеспечить приемлемое качество получаемых картосхем.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБСУЖДЕНИЕ

Анализ вспышки сибирского шелкопряда, происшедшей в 1992-1996 гг., был выполнен по

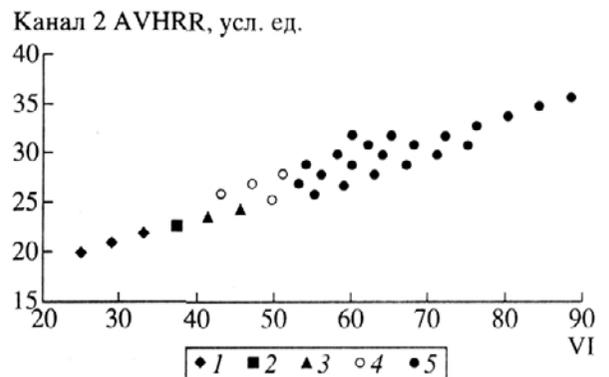


Рис. 3. Диаграммы расположения центров спектральных классов: 1 - очень сильные повреждения; 2 - сильные повреждения; 3 - умеренные повреждения; 4 - слабые повреждения; 5 - фон (неповрежденные).

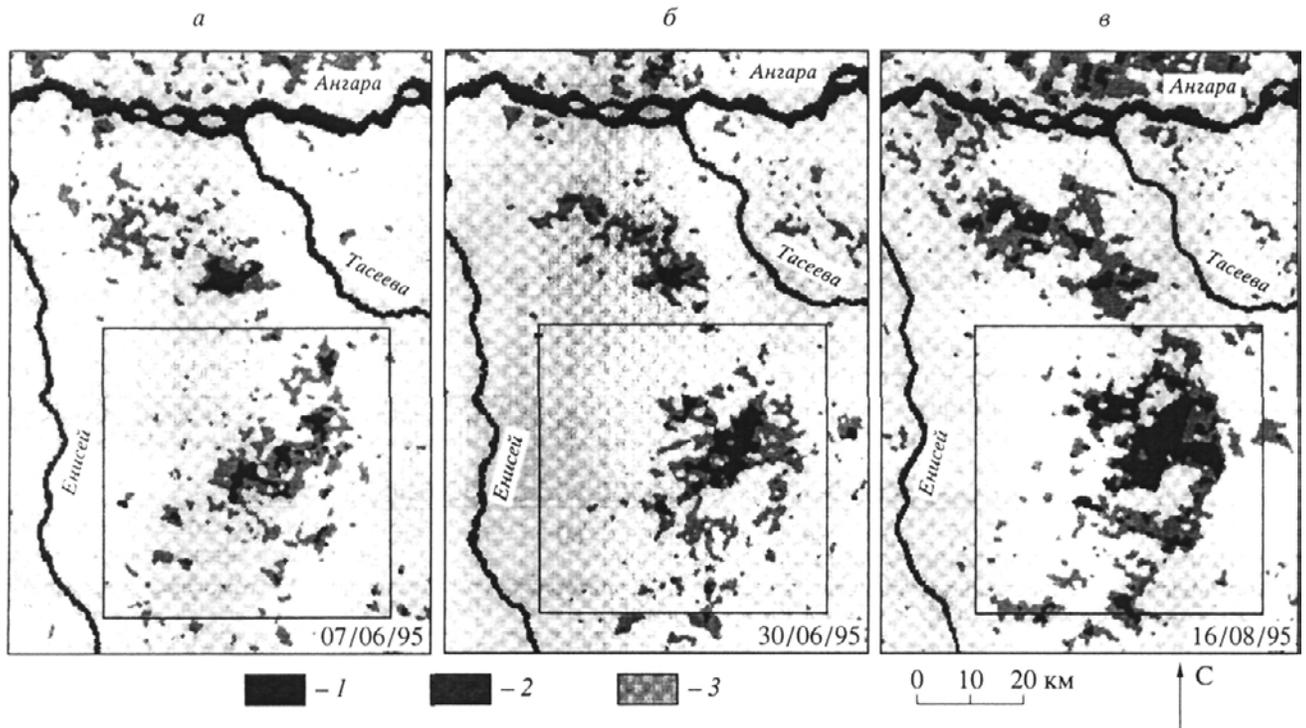


Рис. 4. Динамика вспышки *Dendrolimus sibiricus* в 1995 г.: 1 - сильные повреждения; 2 - умеренные повреждения; 3 - фон (неповрежденные).

данным съемки 1995 г. (год наиболее интенсивных повреждений). На рис. 4 и в табл. 3 отображена динамика развития вспышки (данные таблицы соответствуют территории, ограниченной на рисунке рамкой). В течение вегетационного периода наблюдались драматические изменения состояния древостоев. Например, площадь очень сильных повреждений (>75% усыхающих и погибших деревьев) возросла с 106 964 га в начале июня до 368 566 га в середине августа. Ошибки пропуска и включения составили 7 и 10% соответственно.

Представленные на рис. 4 результаты пороговой сегментации позволили выделить две градации состояния древостоев: сильные (50-75%) и очень сильные (>75%) повреждения. На следующем этапе был определен "верхний предел" возможности использования данных съемки AVHRR в выделении градаций повреждения. Для этой це-

Таблица 3. Площадь повреждений (га) в пределах окна, выделенного на рис. 4

Степень повреждений	Дата съемки		
	7 июня 1995 г.	30 июня 1995 г.	16 августа 1995 г.
Очень сильные	106964	154154	368566
Сильные	393633	389741	483516
Фон (неповрежденные)	2851365	2808047	2499860

ли был изучен фрагмент снимка AVHRR, полученный 16 августа (период максимума повреждения, рис. 3в) и сопоставленный с аналогичным фрагментом исходной карты; оба фрагмента приведены на рис. 5. Обращает на себя визуальное подобие фрагментов. Однако статистический анализ показал, что только для очень сильно поврежденных участков величина χ -статистики удовлетворительна ($\chi = 0.35$). Вероятные причины этого рассматриваются ниже.

На следующем этапе исследований анализировалась возможность обнаружения повреждений по данным зимней съемки. Съемки в этот период времени не используются в лесопатологическом мониторинге. С другой стороны, потенциально зимняя съемка имеет ряд преимуществ (например, уменьшаются ошибки, обусловленные влиянием листопадных пород и напочвенным покровом). Возможности зимней съемки анализировались по снимкам, выполненным в марте и начале апреля 1997 г., когда еще не наблюдается снеготаяния. По сравнению с зимними месяцами к преимуществам этого периода относятся высокие углы стояния Солнца над горизонтом, отсутствие морозных туманов и снега на кронах деревьев (редкие периоды снегопадов могут быть легко исключены из рассмотрения). Темнохвойные насаждения, включая поврежденные, хорошо выделяются на генерированной по зимнему снимку картосхеме (рис. 1а). На рис. 1б приведена исходная карта повреждений, использовавшаяся для анализа



Рис. 5. Сопоставление фрагментов снимка AVHRR и исходной карты: *a* - фрагмент карты наземных обследований. *б* - фрагмент картосхемы, построенной по диаграмме (рис. 3); 1 - очень сильные повреждения, 2 - сильные повреждения, 3 - умеренные повреждения, 4 - слабые повреждения, 5 - фон (неповрежденные).

съемки NOAA/AVHRR. Следует отметить, что все поврежденные участки, представленные на исходной карте (рис. 1б), наблюдаются и на зимнем снимке NOAA/AVHRR (рис. 1а). Однако на картосхеме представлены повреждения, отсутствующие на исходной карте (центральная часть рисунка). Этот факт может быть следствием пропуска ряда поврежденных участков при аэрофотосъемке. Анализ картосхемы, выполненный согласно изложенной выше процедуре, показал, что удовлетворительно ($\kappa = 0.53$) выделяются два класса повреждений: сильно и очень сильно поврежденные насаждения.

Вспышка массового размножения сибирского шелкопряда, наблюдавшаяся в 1993-1996 гг., была обусловлена сочетанием благоприятных погодных условий (оптимальная температура, низкий уровень осадков и влажности). Такого рода вспышки - редкий феномен; в пределах Енисейского меридиана они наблюдаются с периодичностью 15-25 лет. Анализируемая вспышка захватывала северную границу очагового распространения сибирского шелкопряда. Эта граница представляет собой важный Эколого-географический рубеж, ограничивающий зону мониторинга потенциальной опасности вспышек массового размножения шелкопряда. Вспышка 1993-1996 гг. выявила указанную границу. Она хорошо прослеживается по данным как летней, так и зимней съемки. Важнейшим фактором, ограничивающим ареал очагового распространения сибирского шелкопряда, является температура. Мы проанализировали ряд показателей,

характеризующих термический режим на рассматриваемой границе. Установлено, что северная граница очагового распространения сибирского шелкопряда может быть аппроксимирована одним из термических индексов, а именно суммой положительных температур ($>+10^{\circ}\text{C}$), имеющей значение $1400-1600^{\circ}\text{C}$ (рис. 1).

Ниже представлены основные источники ошибок, оказывающие влияние на точность интерпретации данных AVHRR.

1. В пределах пиксела AVHRR (~1.1 км) лесные территории, как правило, негомогенны. Каждый пиксел может содержать различные объекты (например, разные древесные породы, нелесные территории). Тем не менее следует отметить, что именно сравнительная однородность темнохвойных лесов, их большая протяженность позволили эффективно применить материалы съемки AVHRR в обнаружении поврежденных древостоев.

2. Исходная карта, использованная для анализа снимков AVHRR, получена на основе дешифрирования данных аэрофотосъемки, что накладывает ряд ограничений на точность картосхемы, полученной на основе снимков AVHRR: а) дешифрирование аэроснимков - в значительной степени субъективный процесс (так называемое визуальное инструментальное дешифрирование). При этом за меру повреждения принимается процент погибающих и погибших деревьев, т.е. деревьев, подвергшихся крайней степени воздействия. В то же время величина NDVI отображает степень дефо-

лиации деревьев, т.е. включает оценку состояния деревьев, подвергшихся различной степени воздействия; б) аэрофотосъемка выполняется в течение определенного промежутка времени, зависящего от погодных условий и площади территории. Дата аэрофотосъемки не совпадает с датой получения снимков AVHRR. Временной сдвиг между спутниковой съемкой (16 августа 1995 г.) и датой составления исходной карты (1 августа 1995 г.) мог обусловить возрастание площади сильных повреждений (что и отображено на картосхеме).

3. Даже полностью дефолированные насаждения имеют значения NDVI, типичные для хлорофиллосодержащих объектов, вследствие примеси листопадных видов и сосны, напочвенного травяно-мохового покрова и хлорофилла, содержащегося в коре [8].

4. Анализ динамики вспышки размножения сибирского шелкопряда может осложняться фенологией развития растительности. Например, в начале вегетационного периода наблюдается развитие листвы и хвои, происходят резкие изменения напочвенного покрова, что увеличивает уровень помех.

Учитывая изложенное выше, правомочно предположить, что картосхемы, полученные по данным съемки AVHRR (рис. 1а, 4, 5б), отображают состояние древостоев с большей точностью, чем это представлено значениями χ -статистики.

В иерархии методов лесознтомологического мониторинга материалы съемки NOAA/AVHRR занимают верхний уровень. Они позволяют обнаруживать повреждения, определять их масштабы, оценивать состояние древостоев, кормовые ресурсы насекомых, эколого-ландшафтные характеристики обследуемой территории. Минимально обнаруживаемая площадь повреждений зависит от уровня дефолиации и гомогенности поврежденных участков и оценивается в 2-4 тыс. га. В мониторинге лесов Сибири, учитывая их географические масштабы и труднодоступность, данные AVHRR должны быть составной частью системы мониторинга.

ВЫВОДЫ

1. Снимки NOAA/AVHRR можно использовать для анализа крупномасштабных вспышек *Dendrolimus sibiricus* - по крайней мере для определения двух уровней повреждений: 50-75 и > 75%).

2. Для обнаружения/анализа поврежденных лесов могут быть также использованы зимние снимки AVHRR.

3. Методические разработки по проблеме сибирского шелкопряда общие и применимы для решения аналогичных проблем, связанных с другими видами насекомых-вредителей, а также с другими повреждениями древостоев, обусловленных потерей хлорофилла и дефолиацией.

Работа выполнена при финансовой поддержке РФФИ (проекты № 96-07-89105 и № 96-04-48340).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Исаев А.С., Кондаков Ю.П. Принципы и методы лесознтомологического мониторинга // Лесоведение. 1986. № 4. С. 3-9.
2. Перетягин Г.И., Харук В.И., Машанов А.И. Автоматизированный анализ лиственных насаждений, поврежденных насекомыми, по спектрально-интегральным снимкам // Исслед. Земли из космоса. 1986. № 2. С. 110-118.
3. Харук В.И., Перетягин Г.И., Пальникова Е.И. Возможности автоматизированной индикации повреждений леса насекомыми по спектрально-интегральным изображениям // Исслед. Земли из космоса. 1989. № 5. С. 70-73.
4. Харук В.И., Исаев А.С., Кожуховская А.Г. Возможности применения съемки спутников NOAA для мониторинга катастрофических повреждений лесов насекомыми // Лесоведение. 1998. № 4. С. 20-25.
5. Rosenfield G.H., Fitzpatrick-Lins K. A coefficient of agreement as a measure of thematic classification accuracy // Photogr. Eng. Rem. Sens. 1986. V. 52. № 2. P. 223-227.
6. Richards J.A. Remote sensing digital image analysis. Springer-Verlag, 1993. 340 p.
7. Васильев В.И. Распознающие системы. Киев: Наук. думка, 1983. 300 с.
8. Kharouk V.I., Middleton E.M., Spencer S.L. et al. Aspen bark photosynthesis and significance to remote sensing and carbon budget estimates in the boreal ecosystem // J. Water. Air Soil. Pollut. 1995. № 82. P. 483-497.

NOAA/AVHRR DATA IN SIBERIAN SILKWORM MONITORING

V. I. Kharuk, A. G. Kozhuhovskaya, I. A. Pestunov, K. Y. Ranson, G. M. Tzibulsky

*Sukachev Institute of Forest, Krasnoyarsk
Institute of Computational Modeling, Krasnoyarsk
Krasnoyarsk State Technical University*

NOAA/AVHRR images were used for analysis of the large-scale Siberian silkworm (*Dendrolimus sibiricus*) outbreak (1993-1996) in the forest of Nizhnee Priangarie. It was shown that these images can be used for detection pest outbreaks and two gradations of defoliation heave (50-75%) and very heave (>75%) were obtain. The outbreak evaluation dynamic was observed. Summer/winter images were used for delineation of the northern border of outbreaks region.