

НЕОФИЦИАЛЬНЫЕ МЕТОДИЧЕСКИЕ РЕКОМЕНДАЦИИ

по дистанционным методам контроля лесопатологического состояния лесов

Компиляция статей и руководств

Использованная литература

- 1 Справочник «Методы мониторинга вредителей и болезней леса», том 3, Москва, 2004, глава 4 (автор В. М. Жирин, к.б.н., ЦЭПЛ РАН) — основной текст компиляции.

Дополнительная литература

- 1 Приложение № 1 к Приказу Рослесхоза от 29.12.2007 № 523 «Руководство по проектированию, организации и ведению лесопатологического мониторинга»
- 2 Приложение № 2 к Приказу Рослесхоза от 29.12.2007 № 523 «Руководство по проведению санитарно-оздоровительных мероприятий»
- 3 Методические рекомендации по надзору, учету и прогнозу массовых размножений стволовых вредителей и санитарного состояния лесов, ВНИИЛМ, Пушкино, 2006

Примечание редактора

Большая часть материалов принадлежит перу к.б.н. Жирину В. М., а в приведенной выше литературе некоторые предложения повторяются слово в слово, или же имеют иную редакцию. Материалы дополнены инженером филиала ФБУ «Рослесозащита»-«ЦЗЛ Респ. Башкортостан» Гимрановым Т.В. (дополнения выделены квадратными скобками: [дополнение]), в частности был исправлен рисунок 2 «Физиологические признаки повреждения насаждений», где были пропуски и редактором предполагались ошибки.

ОЦЕНКА ЛЕСОПАТОЛОГИЧЕСКОГО СОСТОЯНИЯ НАСАЖДЕНИЙ ПО МАТЕРИАЛАМ СЪЕМОК

Дистанционная оценка лесопатологического состояния лесов — наименее разработанный раздел лесного дешифрирования. Это связано с неустойчивым проявлением и диагностикой на материалах аэрокосмических съемок признаков дешифрирования деревьев и насаждений различной степени ослабления и усыхания.

Основной целью дистанционных наблюдений является своевременное обнаружение опасных отклонений в санитарном состоянии лесов, а также предварительная оценка размеров повреждений. Дистанционные наблюдения за санитарным состоянием лесов предусматривают космическую и авиационную съемку, аэровизуальное обследование лесов. Дистанционные наблюдения могут представлять собой регулярные выборочные наблюдения, либо специальные обследования в случае возникновения массовых повреждений лесов.

Методика осуществления дистанционных наблюдений фиксируется в Регламенте проведения дистанционного ЛПМ, утвержденного в установленном порядке.

В зависимости от объекта и задач лесопатологического мониторинга при планировании дистанционных наблюдений определяются масштаб (пространственное разрешение) авиационной и (или) космической съемки, вид изображений, спектральное разрешение, время и периодичность съемки, необходимые технические и программные средства для их обработки и анализа.

Лесопатологическая таксация является самостоятельным элементом ЛПМ, а также проводится в комбинации с дешифрированием материалов ДЗЗ, для проверки данных лесопатологических обследований и оценки эффективности лесозащитных мероприятий.

В зоне низкой лесопатологической угрозы мониторинг осуществляется, в основном, путем дешифрирования космических снимков. В зависимости от выбранного масштаба снимков производится расчет необходимого их количества для покрытия зоны низкой лесопатологической угрозы и всего субъекта. Обосновывается периодичность получения этих снимков и методы дешифрирования. Рассчитывается необходимое количество тестовых участков и планируются места их расположения.

В зонах средней и сильной напряженности мониторинг организуется, в основном, на основе регулярных наблюдений выборочными методами на постоянных пунктах наблюдений (ППН). Поэтому прежде всего следует рассчитать их количество, которое будет зависеть от минимальной планируемой ошибки, принятой для данной зоны напряженности (см. Руководство по ЛПМ), и от количества страт в каждом лесозащитном районе.

Оценка состояния лесов способом дистанционных наблюдений осуществляется путем дешифрирования материалов дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ), распознавания на них признаков повреждения и гибели лесных насаждений. Дешифрирование материалов ДЗЗ проводится с привлечением результатов наземных наблюдений за состоянием объектов лесопатологического мониторинга на тестовых участках. Тестовым может быть любой участок леса, по которому имеется характеристика состояния древостоя на момент производства съёмки. Предпочтение отдаётся тестовым участкам леса, на которых имеется ППН.

В соответствии с Руководством по проведению санитарно-оздоровительных мероприятий, Если в результате массовой гибели лесов на территории объявлен режим чрезвычайной ситуации, в соответствии с решением комиссии по чрезвычайной ситуации допускается планирование санитарных рубок по результатам дешифрирования аэрокосмической съёмки высокого разрешения или материалам авиалесопатологической таксации.

Лесным дешифрированием материалов аэрокосмических съёмок называется процесс опознавания изображенных на них лесных объектов и установления их количественных и качественных характеристик.

Лесное дешифрирование может быть визуальным (глазомерным, аналитическим), измерительным, автоматическим (машинным), а также комплексным – аналитико-измерительным или автоматизированным (интерактивным, человеко-машинным).

При визуальном дешифрировании изучаемый объект описывается на основе признаков дешифрирования его изображения на материалах ДЗЗ (на бумажном носителе или экране компьютера) невооруженным глазом или с помощью увеличительных или стереоскопических приборов. Иными словами, информация с аэрокосмического изображения считывается и анализируется с помощью зрительного и логического аппаратов дешифровщика. Поэтому этот вид дешифрирования называется также аналитическим, и его успешность зависит от степени подготовленности и опыта дешифровщиков.

При измерительном дешифрировании все или некоторые параметры и характеристики дешифрируемых объектов измеряют на снимках с помощью механических, оптико-механических, оптико-электронных и других измерительных инструментов, приборов, устройств и систем.

При аналитико-измерительном дешифрировании сочетается визуально-логический анализ изображения с измерением различных параметров дешифрируемых объектов.

Автоматизированное (интерактивное, или человеко-машинное) дешифрирование сочетает в себе элементы аналитико-измерительного дешифрирования, выполняемого экспертом по изображению на экране компьютера, с автоматическим дешифрированием. Автоматическое

дешифрирование основано на распознавании по спектральным и морфометрическим характеристикам дешифрируемых объектов их количественных и качественных показателей. В этом случае процесс дешифрирования выполняется с помощью технических средств обработки изображений при активном участии эксперта. Роль человека состоит в создании системы, определении конкретной задачи и обработки съемочной информации с помощью соответствующих программ, а также поддержании нормального функционирования системы.

Автоматизированное (интерактивное, человекомашинное) дешифрирование сочетает в себе элементы аналитико-измерительного, выполняемого дешифровщиком-оператором по изображению на экране компьютера, с автоматическим дешифрированием. В этом случае съемочную информацию анализируют и обрабатывают с помощью технических средств обработки изображений при активном участии оператора-дешифровщика.

В зависимости от места проведения дешифрирование может быть полевым, камеральным (лабораторным), аэровизуальным или комбинированным.

Полевое дешифрирование проводят непосредственно на местности путем сопоставления изображения на аэро- или космических снимках с натурой. Метод полевого дешифрирования является наиболее простым и точным, но требует больших затрат времени и труда. Камеральное дешифрирование проводят в лабораторных условиях, при этом сокращаются затраты труда инженерно-технического персонала и рабочих, происходит ускорение работ и значительное снижение их стоимости. Камеральное дешифрирование всегда выполняют с привлечением дополнительных картографических, нормативно-справочных и других фондовых материалов.

Аэровизуальное дешифрирование проводят путем сопоставления изображений распознаваемых объектов на аэро- или космических снимках с местностью при полетах на самолетах или вертолетах.

Анализ информативности съемочных материалов показывает, что их практическое применение возможно, как правило, на основе рационального сочетания методов наземных и дистанционных наблюдений.

Дистанционные методы контроля санитарного состояния лесов¹

Дистанционные методы – аэровизуальное обследование лесов, аэрофотосъемка и космическая съемка, рекомендуются для использования в системе надзора за стволовыми вредителями с целью повышения оперативности и масштабы выявления их очагов, получения реальной возможности в производственных условиях систематической и максимально полной оценки санитарного состояния лесов. Дистанционные методы не подменяют наземные, а используются в сочетании с ними с учетом конкретных возможностей каждого из них. При использовании дистанционных методов не всегда возможно определить причину ухудшения санитарного состояния лесов. Однако обнаружение лесных повреждений, а также оценка степени ослабления, повреждения или усыхания древостоев, позволяют более целенаправленно и качественно осуществлять последующие наземные работы в выявленных дистанционным способом (или ранее известных) очагах. Таким образом, наземная проверка и учет деятельности стволовых вредителей в очагах патологии леса являются обязательными. При наземных учетах, кроме того, корректируют данные дистанционной оценки степени ослабления (повреждения) или усыхания лесов.

¹ Текст взят из Методических рекомендации по надзору, учету и прогнозу массовых размножений стволовых вредителей и санитарного состояния лесов, ВНИИЛМ, Пушкино, 2006, упомянутые приложения в оригинале и Руководства по проектированию, организации и ведению лесопатологического мониторинга, — прим. редактора.

Метод аэровизуальных обследований позволяет быстро и достаточно эффективно оценивать санитарное состояние крупных лесных массивов, выделять наиболее значимые очаги ослабления (повреждения, усыхания), дать им первоначальную количественную и качественную оценку, которую затем рекомендуется использовать при наземном надзоре и обследованиях. В сравнении с наземными методами вероятность выявления очагов усыхания при аэровизуальном обследовании повышается на 20-30%, производительность труда – многократно. Выборочная наземная проверка однотипных очагов, оцененных с воздуха, также будет содействовать сокращению трудовых и материальных затрат.

Ошибка аэровизуального метода при оценке отпада деревьев в различных условиях варьирует в пределах $\pm 10-30\%$. Наибольшей она бывает (в сторону занижения величины отпада) в более высокополнотных насаждениях после пожаров и ветровалов слабой интенсивности, в очагах корневой губки и других случаях, когда верхний ярус деревьев скрывает часть пораженных (поврежденных, поваленных, усохших) деревьев. Ошибка наибольшая в сторону увеличения в первый год после пожара, объедания хвои, в комбинированных очагах смоляного рака-серянки и подсочки, когда еще не завершилась дифференциация деревьев по состоянию или общий фон ослабления (суховершинности) древостоя усугубляет впечатления наблюдателя. Минимальная ошибка – в более разреженных древостоях (полнота не более 0.6) и на стадиях более четкой дифференциации деревьев по состоянию. Имеют значение: порода, погодные условия, тренированность наблюдателя, другие причины.

Метод рекомендуется для всей зоны противопожарного патрулирования лесов, где имеются подразделения Центральной авиабазы, в европейской части, в Сибири, на Дальнем Востоке, но предпочтительно в районах интенсивного ведения хозяйства, где возможно реализовать результаты надзора.

Полеты по выявлению очагов стволовых вредителей и усыхания лесов должны быть целенаправленными. Для этого предварительно производится районирование территории, обслуживаемой авиабазой (авиазвенном); с выделением объектов первоочередного надзора, где потенциально возможно возникновение очагов, а также особо ценных, удаленных и труднодоступных для систематического наблюдения участков. Первоочередному осмотру подлежат участки леса, ослабленные или поврежденные пожарами, ветровалом, буреломом, хвоегрызущими насекомыми, промышленными выбросами и т.п., а также зоны рекреации, рубок леса и подсочки. С учетом этого составляется и ежегодно (или перед каждым вылетом) корректируется карта полетов. Состояние остальных объектов контролируется при обычных патрульных полетах. При массовом поражении лесов организуются специальные аэровизуальные обследования (или аэрофотосъемка). Для аэровизуального обследования наиболее целесообразно использование вертолетов, более маневренных и позволяющих, при необходимости, производить посадку и осмотр выявленных очагов.

Полеты с попутной оценкой состояния лесов проходят на высоте обычного авиапатрулирования (700 м). При осмотре конкретных объектов надзора высота полета снижается до 200-300 м и ниже; для внимательного осмотра и оценки состояния объекта его следует облететь 2-3 раза.

При оценке состояния древостоев наличие обычных деревьев отпада (единичный сухостой или ветровал) не фиксируется. Выделяется и количественно визуально в процентах к общему числу стволов оценивается наличие усыхающих и сухостойных деревьев (ветровала, бурелома) при их превышении естественной нормы (5% и более). Возможна оценка по трехбалльной системе:

- 1 – сухостоя до 15%,
- 2 – до 40%,

3 – более 40%.

Преобладание свежего сухостоя над старым отмечается индексом Н, старого сухостоя – С. Особо опасно появление группового или куртинного сухостоя. Определяется площадь очага в га, на карте (схеме) или космических снимках отмечается его местонахождение. Сведения заносятся в журнал обследования. При наличии возможности используются системы геопозиционирования (GPS) с целью определения координат насаждений с ухудшенным санитарным состоянием.

С учетом указанной выше возможной ошибки визуальных оценок в последующем, по данным выборочного наземного учета, вносятся необходимые корректировки. Оптимальный срок проведения полетов – с конца мая по начало сентября. При возможности полеты организуются дважды в сезон с учетом весенней и летней подгрупп вредителей – в конце мая – в июне и в августе.

По материалам полетов составляют сводную ведомость участков, подлежащих наземной проверке и контролю с приложением карты или схемы их расположения. Эти материалы передаются службе лесозащиты, организующей полеты.

Аэрокосмическая съемка целесообразна для периодического (раз в 3-5 лет) контроля состояния (мониторинга) лесных насаждений с хроническим ослаблением деревьев различными болезнями, промышленными выбросами, чрезмерной рекреационной нагрузкой и т.п., особо ценных участков леса (заповедные участки, заказники, памятники природы и т.д.), для экспрессных оценок массовых повреждений лесов стихийными факторами и хозяйственной деятельностью (буреломы и ветровалы, пожары, рубки, подсочка и т.д.), для контроля качества оздоровительных мероприятий и соблюдения санитарных правил при различных видах хозяйственной деятельности, а также во всех случаях для получения документированного подтверждения факта повреждения лесов.

Аэросъемка проводится целенаправленно или используются снимки лесоустройства, для этого предпочтительно использовать трехслойные снимки типа СН-15. Использование аэросъемки позволяет многократно повысить производительность учетных работ, особенно при автоматизации дешифровочных работ и картографировании. Точность работ при оценке степени повреждения леса по числу стволов составляет 12-15%, по группам категорий состояния деревьев – 0.75-0.85.

Аэрокосмическая съемка лесов с последующим дешифрированием снимков выполняется специализированными организациями по заявкам лесохозяйственных предприятий. При самостоятельном дешифрировании аэроснимков предлагается руководствоваться нижеследующими рекомендациями.

Детальность оценки состояния насаждений по аэрофотоснимкам в сочетании с элементами наземных работ зависит от категорий защитности и группы леса.

В лесах первого и второго поясов зон санитарной охраны источников водоснабжения, первой и второй зон округов санитарной охраны курортов, особо ценных лесных массивах, национальных и природных парках, лесных участках, имеющих научное или историческое значение, природных памятниках, рекомендуется оценивать по аэрофотоснимкам их лесопатологическое состояние путем выявления деревьев I, II, III, IV и V-VI категорий состояния. При проведении такого обследования можно использовать спектрональные аэрофотоснимки масштаба 1:1000 и крупнее.

В лесах других категорий защитности, к которым относятся леса третьей зоны округов санитарной охраны курортов, зеленых зон вокруг городов, других населенных пунктов и промышленных предприятий рекомендуется оценивать по аэрофотоснимкам степень повреждения или ослабления насаждений путем определения числа деревьев I-II, III, IV и V-VI

категорий состояния. При проведении такого обследования можно использовать спектрозональные аэрофотоснимки масштаба 1:1000-1:5000.

В лесах первой группы прочих категорий защитности, а также в лесах второй группы и выборочно в лесах третьей группы с интенсивным ведением хозяйства рекомендуется проводить оценку степени усыхания насаждений путем определения по спектрозональным аэрофотоснимкам масштаба 1:10000 соотношения числа групп деревьев I-III, IV-VI категорий состояния.

Для повышения достоверности работ аэрофотосъемку выполняют в июле-августе, т. е. в период появления в древесном пологе свежего сухостоя текущего года. При дешифрировании аэрокосмических снимков состояние отдельных деревьев и древостоев определяется по прямым и косвенным признакам. Прямые признаки – это изменение цвета и структуры изображения деревьев; косвенные – изменение рисунка изображения древостоя. Признаки, используемые для дешифрирования снимков, приведены ниже.

Одной из разновидностей дистанционного зондирования является авиалесопатологическая таксация. Общие принципы и порядок организации этих работ установлен в «Правилах организации и осуществления авиационных работ по охране и защите лесов» (Постановление Правительства РФ от 19 июня 2007 г. № 385).

Авиалесопатологическая таксация выполняется подготовленными специалистами при обязательном участии летчика-наблюдателя. Рабочими документами при авиалесопатологической таксации служат топографическая карта в масштабе не менее 1:200000. При авиалесопатологической таксации должны использоваться электронные топографические карты, спутниковая навигация и специальные программные продукты, обеспечивающие пространственную привязку контуров оцениваемых лесных участков. На карту наносятся лесные массивы, в которых наиболее вероятное нахождение резерваций и возникновение вспышек массового размножения опасных вредителей леса, вырубки, гари и прочие хорошо опознаваемые объекты внутри таких лесных массивов. На топографической карте осуществляется планирование полетов по точкам, с хорошо опознаваемыми с воздуха объектами. Авиалесопатологическая таксация планируется на июнь - начало июля в период наиболее заметного объедания хвои. Проводится с высоты в 400-500 м по маршрутам, запланированным камерально. Расстояние между маршрутами может назначаться от 4 до 10 км в зависимости от рельефа местности, местонахождения древостоев и лесопатологической ситуации. Общая протяженность полетов при авиалесопатологической таксации должна составлять 1000-2500 км на каждый миллион гектаров обследуемой площади.

Степень повреждения полога древостоев хвое- и листогрызущими вредителями оценивается по шкале:

1. слабое - при потере хвои (листвы) до 25%;
2. среднее - до 50%;
3. сильное - до 75%;
4. сплошное - свыше 75%.

Степень усыхания насаждений оценивается по проценту усыхающих и сухостойных деревьев в них с ошибкой не более 20%.

Предельно малой нормой подлежащих выявлению при авиалесопатологической таксации неблагополучных насаждений может считаться:

1. повреждение полога хвоегрызущими - 25%;
2. наличие усыхающих и свежесухостойных деревьев - 10%;
3. наличие сухостоя прошлых лет - 20%;
4. ветровальники и свежие гари - 10 га.

Контуры выявленных методами лесопатологического дешифрирования и авиалесопатологической таксации участков леса должны быть описаны последовательностью точек, позиционированных в системе географических координат WGS-84. Допускается работа с бумажными формами с последующим созданием электронного документа установленного формата (приложение 4).

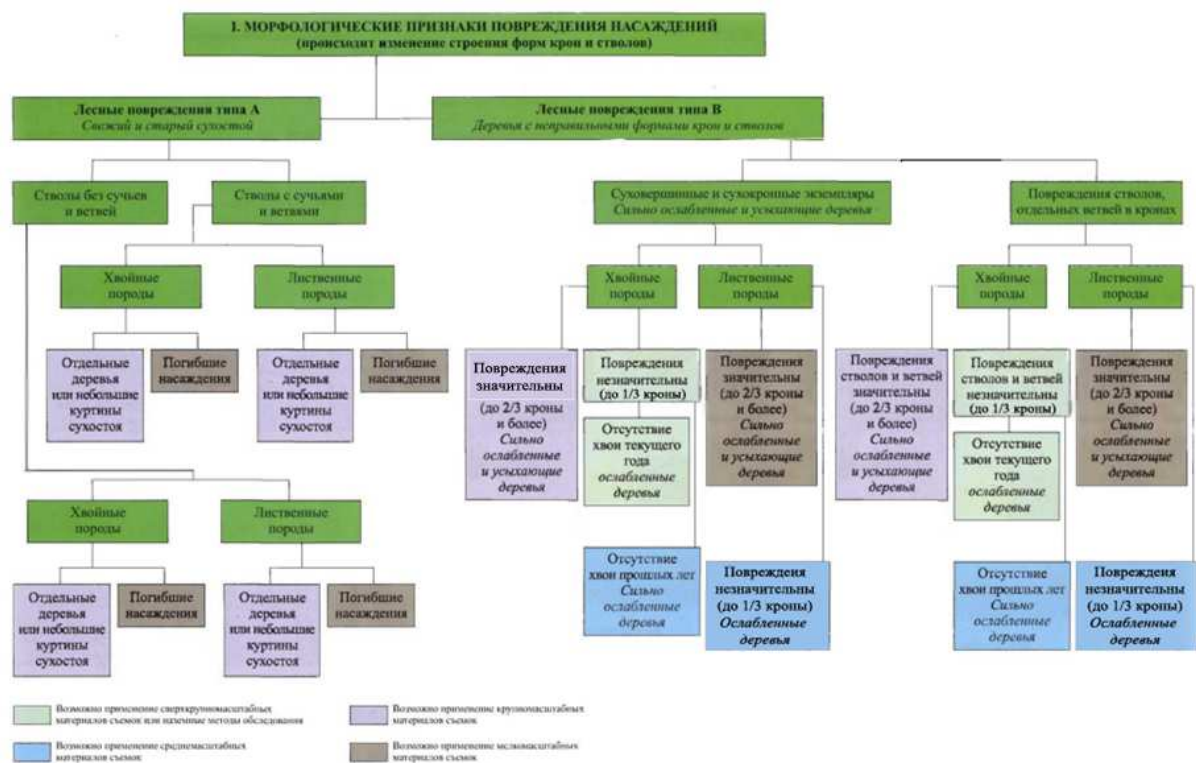


Рис. 1. Морфологические признаки повреждения насаждений

1. Классификация лесных повреждений для проведения лесопатологического дешифрирования материалов дистанционных съемок

Дистанционными методами невозможно непосредственно обнаружить наличие вредителей и болезней в насаждении. Однако их присутствие с большой долей вероятности определяется опосредованно, через повреждение ими лесного полога.

При наземном лесопатологическом обследовании используется шкала, в соответствии с которой на основе внешних признаков различают 6 категорий санитарного состояния деревьев. В состав этих признаков входит характеристика густоты кроны деревьев и состояние прироста, степень повреждения хвои или листвы (объедена, обожжена), усыхание хвои (листвы) или ветвей, наличие суховершинности или сухокронности, изменение цвета хвои или листьев и т.п. При лесопатологическом дешифрировании материалов съемок для удобства использования эта шкала представлена в виде классификации, в которой учтена степень выраженности лесных повреждений на материалах съемок различной разрешающей способности.

Известно, что одинаковые типы лесных повреждений могут возникать под воздействием различных факторов среды (биотических, абиотических, антропогенных), и наоборот – воздействие на лес одного и того же фактора среды может способствовать появлению различных типов лесных повреждений. Обычно различают 2 вида признаков лесных повреждений: **морфологические** и **физиологические**.

Морфологические признаки связаны с изменениями в строении формы крон и стволов деревьев. Проявление физиологических признаков внешне заметно по изменению цветовой окраски ассимиляционных побегов деревьев. Изменение нормального хода кривых спектральной яркости хвои (листьев) деревьев при отсутствии признаков их дехромации может служить признаком ранней стадии лесных повреждений. На рис. 1 и 2 представлены четыре группы лесных повреждений, и приведен перечень наиболее вероятных факторов, вызывающих каждый вид повреждения.

1.1 Повреждения типа А

Повреждения типа А объединяют хвойные и лиственные деревья свежего и старого сухостоя. В зависимости от степени морфологических изменений крон выделены 2 группы необратимо поврежденных деревьев: сухостой без сучьев и ветвей и сухостой с сучьями и ветвями.

Как видно из схемы морфологических признаков, сухостой встречается в пологе в виде отдельных деревьев (куртин) или образует погибшие насаждения. На аэрофотоснимках крупного масштаба деревья старого сухостоя имеют вид штрихов, тени от них – вид резких черных линий. Тени от сухостойных с изреженной кроной деревьев не плотные, как от крон здоровых деревьев, и имеют неявно очерченные контуры. Куртины и погибшие насаждения в виде сухостоя явно выделяются по светлым тонам крон, наличию разных по величине и неправильных по форме провалов в проекции полога насаждений, просматриваемости в стереоскоп земной поверхности, иногда заметного валежника, особенно на аэрофотоснимках крупного масштаба. Для погибших на больших площадях насаждений характерно резкое изменение цвета (тона) изображения, эти участки распознаются на аэрокосмических снимках мелкого масштаба.

[В связи с тем, что в период написания статьи, ветровал и бурелом ещё не выделялись в отдельные категории состояния древостоя, следует заметить, что ветровал и бурелом относятся к повреждению типа А. Подробнее о ветровале и буреломе рассказывается далее по тексту].

1.2 Повреждения типа В

Повреждения типа В связаны с частичными изменениями в строении крон и стволов у деревьев хвойных и лиственных пород. В зависимости от того, какая часть кроны дерева затронута повреждением, выделяют 2 группы: одна – суховершинные и сухокронные деревья, другая – деревья с повреждением части ствола и отдельных ветвей в кронах, а также с отсутствием хвои текущего года или прошлых лет. Появление повреждений подобного типа обычно сопровождается появлением цветовых оттенков и деформацией форм крон деревьев. Характер и количество поврежденных деревьев в лесном пологе определяют детальность рекомендуемых к использованию материалов съемок.

Суховершинные кроны являются признаком сильно ослабленных или усыхающих деревьев. У хвойных пород этот вид повреждений вызывают, прежде всего, корневая губка, рак-серянка, ступенчатый рак, грибы-патогены, низовые пожары, поллютанты, пилильщики, некоторые виды шелкопрядов, стволовые вредители.

Отмирание крон лиственных пород происходит, как правило, в результате поражения деревьев голландской болезнью ильмовых, черным раком, гнилью стволов, а также при повреждении шелкопрядом, златогузкой, стволовыми вредителями.

В другой группе выделены 2 разновидности, связанные со значительным (до 2/3 и более) повреждением крон (сильно ослабленные и усыхающие деревья) и незначительным (до 1/3) повреждением крон (ослабленные деревья).

При незначительном повреждении хвойных (отсутствие хвои текущего года) и лиственных пород их относят к ослабленным деревьям. Основными причинами таких повреждений могут быть хвое- или листогрызущие насекомые, а также почвенная засуха. Более разнообразны причины, вызывающие у хвойных пород отсутствие хвои прошлых лет. Обнаружение такого вида лесных повреждений позволяет относить хвойные деревья к группе сильно ослабленных. К числу наиболее вероятных причин, способствующих опадению или отсутствию хвои прошлых лет, относят грибные болезни, объедание крон шелкопрядом и пилильщиком, воздействие на лес промышленных выбросов, а также недостаток питания и влияние засухи.



Для правильного дешифрирования повреждений типа С, который объединяет деревья и насаждения с внешне заметными различиями в цвете поврежденной и здоровой хвои и листьев, необходимо знание спектральной отражательной способности древесных растений с различными повреждениями. Современная методика предусматривает сбор растительных образцов (хвоя разных лет, охвоенные побеги или ветви, листья и облиственные побеги) для последующего их оперативного спектрометрирования в полевых или лабораторных условиях. Эти же образцы часто используют для проведения пигментного анализа, изучения анатомического строения клеток и др.

Существуют рекомендации по организации сбора образцов, которые включают указание времени и места отбора образцов в кронах, а также определение необходимого числа, состояния и размещения учетных деревьев в зависимости от их возраста, топографии местности и т.п.

С увеличением возраста хвои, а также под воздействием негативных факторов среды в клеточных тканях ассимиляционных побегов происходят биохимические реакции, симптомами которых служат нарушения клеточной структуры мезофилла, сопровождаемые изменениями отражательной способности и хода спектральных кривых яркости (СКЯ) хвои (листьев), побегов, ветвей, крон или полога насаждений.

На спектральное отражение в области 400...700 нм преобладающее воздействие оказывают листовые пигменты (зеленый — хлорофилл и желтые — каротин и ксантофилл). Минимум поглощения радиации для всех пигментов лежит, как известно, в зоне зеленых лучей (520...600 нм), эта часть спектра часто обозначается как "зеленый пик". Поглощение пигментами световой энергии происходит, в основном, за счет радиации, поступающей в видимой части спектра. Наиболее явно поглощение хлорофилла проявляется в красной области спектра (600...700 нм), здесь кривая отражательной способности здоровых растений сильно вогнута, эту часть спектра иногда называют "хлорофилловой ямой". Это явление связано с тем, что в состав молекулы хлорофилла входит магний, линия поглощения которого расположена в красном участке спектра. При старении хлорофилла или стрессовом состоянии древесных растений происходит разрушение хлорофилла, растения приобретают желтую окраску, в соответствии со спектром поглощения каротиноидов и ксантофиллов. Сильное отражение света происходит в ближней инфракрасной зоне спектра (примерно в промежутке 750...800 нм). Здесь вид кривой зачастую приобретает плавный и слегка пологий характер (так называемое ИК-плато). Считается, что отражение излучения в этой области спектра связано со структурой и состоянием клеток хвои (листьев), т.е. падающая радиация незначительно поглощается пигментами и водой, а интенсивность его отражения зависит от длины оптического пути и многократности преломления в мезофильных тканях. Например, губчатая паренхима лиственных пород деревьев с наличием больших воздушных межклеточных полостей и оболочек клеток обеспечивает меньшую длину оптического пути отражения радиации, чем складчатая паренхима хвойных пород. Иными словами, интенсивность отражения радиации лиственными породами выше, чем хвойными. Аналогично изменяется интенсивность отраженного излучения у здоровых деревьев и деревьев разной степени ослабления и усыхания. Переход от хлорофилловой ямы к ИК-плато (примерно на участке кривой 680...720 нм) характеризуется резким подъемом кривой спектрального отражения, эту часть спектра иногда называют "красный край".

Для повреждений типа С характерны физиологические признаки, которые связаны с внешне заметными различиями в цвете поврежденной и здоровой хвои или листвы древесных растений. В зависимости от цвета поврежденных вегетирующих органов выделяют деревья и насаждения с желтой, бледно-зеленой, красно-бурой или бурой хвоей (листвой).

Пожелтение листьев или хвои текущего года может затрагивать незначительную часть кроны (до 1/3) у ослабленных деревьев или значительную часть кроны (более 2/3) у сильно ослабленных и усыхающих деревьев.

Этот тип повреждения у лиственных пород связан с воздействием грибковых заболеваний, засухи, голландской болезни, низовых и подземных пожаров, промышленных выбросов (например, двуокиси серы) или с недостатком питания. Причинами появления у ослабленных хвойных деревьев желтой или бледно-зеленой хвои могут быть сосудистые заболевания, гнили стволов, засуха, а также воздействие насекомых: пядениц, совок, пилильщиков, усачей (молодые жуки).

Более интенсивное воздействие перечисленных факторов, а также стволовых вредителей или корневой губки приводит к переходу хвойных деревьев в категорию сильно ослабленных или усыхающих.

Красно-бурая или бурая листва появляется у лиственных пород под воздействием тли, голландской болезни, засухи, диких животных.

Красно-бурый или бурый цвет может быть у хвои текущего года или у хвои прошлых лет (хвоя текущего года при этом остается зеленой). Наиболее многочисленна первая группа лесных повреждений. При отсутствии хвои прошлых лет и побурении хвои текущего года деревья можно уверенно относить к категории усыхающих и свежему сухостою, причинами чего часто служат корневая губка, гриб-опенок, промышленные выбросы. Аналогично к усыхающим деревьям или свежему сухостою следует относить хвойные деревья, у которых бурый цвет хвои прошлых лет и текущего года может быть связан с градобоем, последствиями суровых зим, низовых или подземных пожаров, длительного затопления, воздействием промышленных выбросов, питанием молодых жуков-усачей, развитием корневой губки. При наличии красно-бурой или бурой хвои текущего года и нормальной хвои прошлых лет можно предполагать воздействие морозов или листовертки, а деревья относят к категории ослабленных.

При расположении красно-бурой или бурой хвои текущего года на вершине деревьев их относят к категории ослабленных, а основными причинами, вызывающими этот вид повреждений, считают воздействие побеговьюнов, рака-серянки.

Появление красно-бурого или бурого цвета у хвои прошлых лет и сохранение зеленой хвои текущего года может быть связано с воздействием пилильщиков, шелкопряда-монашенки, стволовых и корневых гнилей, а также с периодическим сезонным сбрасыванием старой хвои.

Для регистрации изменения цвета хвои или листьев в лесном пологом используется съемка на цветную и спектрально-фотопленку или многоспектральная сканерная съемка с самолетов и космических аппаратов.

1.4 Повреждения типа D

Повреждения типа D объединяют хвойные и лиственные деревья, патологические изменения которых еще не имеют внешне заметных различий, поэтому современный этап изучения повреждений этого типа связан преимущественно с оценкой на основе различной системы показателей морфологии кривых спектральных коэффициентов яркости, получаемых также при дистанционном зондировании. Соотношение различных спектральных характеристик, характеризующих особенности отражательной способности хвои или листьев разных древесных пород и содержания в них хлорофилла, могут служить индикатором ранних стадий ухудшения состояния деревьев. В этом случае используются характерные участки спектра, в которых зеленая растительность имеет различную отражательную способность. Один из участков (зеленый пик) расположен в зоне наибольшего отражения в видимой области спектра, другой (хлорофилловая яма) – в зоне наибольшего поглощения света хлорофиллом, третий (красный край) – на участке перехода от видимой к инфракрасной зоне спектра.

Кроме того, используются производные признаки, которые учитывают особенности морфологии СКЯ в разных участках спектра. Наиболее характерным является возникновение эффекта "голубого сдвига", т.е. симптоматического сдвига склона красного края СКЯ в сторону коротковолновой части спектра из-за негативного воздействия на древесную растительность факторов среды.

Техническое решение при обнаружении повреждений типа D связано с появлением спектрометров, обладающих высоким спектральным разрешением. Примером может служить отечественный акустооптический спектрометр "Кварц 4" конструкции ВНИИФТРИ. Реализованный

в приборе принцип разложения излучения в спектр состоит в смещении оптических лучей с различными длинами волн фазовой решеткой, сформированной в кристалле кварца под воздействием ультразвуковой волны, что обеспечивает спектральное разрешение 0.3...0.8 нм в диапазоне длин волн 415...850 нм.

При дистанционном зондировании желательно получать информацию о состоянии лесной растительности одновременно в 30 узких зонах спектра, т.е. со спектральным разрешением не ниже 25 нм. Техническая реализация этого условия возможна на пути создания и применения видеоспектрометров.

[Все описанные типы повреждений, в частности тип повреждения D, можно выявить с помощью использования вегетационных индексов, по которым имеется обширная литература.]

2. Формирование признаков дешифрирования

Приведенная классификация лесных повреждений необходима при выборе материалов дистанционного зондирования, а также при обнаружении и последующем определении по ним степени повреждения или усыхания деревьев и насаждений. Распознавание по материалам съемок, полученных в оптическом диапазоне электромагнитного спектра, лесных повреждений и определение категорий санитарного состояния деревьев и насаждений производится на основе признаков дешифрирования, которые формируются в зависимости от размеров лесопатологических объектов и спектральных свойств отраженной от крон деревьев или лесного полога солнечной радиации. Наиболее информативными являются прямые признаки, к которым относится тон (цвет) изображения, и признаки, характеризующие внешний облик объектов дешифрирования, – форму, размеры, тени, рисунок (структуру и текстуру) изображения.

Используются также косвенные признаки дешифрирования, с помощью которых по одним хорошо распознаваемым на материалах съемок объектам можно опознать и дать характеристику других, плохо или совсем не опознающихся объектов.

Признаки дешифрирования лесопатологических объектов. При различных видах лесного дешифрирования требуется знать, какие минимальные объекты могут быть обнаружены и опознаны на материалах съемок того или иного масштаба. Сгруппировав ранее перечисленные типы лесных повреждений на основе размеров структурных деталей, можно провести выбор вида и масштаба материалов дистанционных съемок, обеспечивающих распознавание наиболее характерных объектов лесопатологического дешифрирования (табл. 4).

Таблица 4. Типичные размеры объектов лесопатологического дешифрирования

Объекты дешифрирования	Распознаваемые структурные детали изображения	Минимальные размеры объектов на местности	Необходимые материалы съемок
Незначительные повреждения (до 1/3 кроны) отдельных деревьев (ослабленные деревья) и куртин	Ветви	0.1... 0.3 м	Сверхкрупномасштабные (крупнее 1:1000) и крупномасштабные аэрофотоснимки масштаба 1:1000-1:3000
Значительные повреждения (до 2/3 кроны и более) отдельных деревьев (сильно ослабленные, усыхающие и усохшие деревья) и куртин	Ветви	0.3...0.5 м	Крупномасштабные аэрофотоснимки: масштаб 1:3000... 1:5000; масштаб 1:5000...1:7000 (конверсионные КС)
	Кроны	2...4 м	
Насаждения разной степени повреждения:	Кроны, биогруппы	5...10 м	Среднемасштабные аэрофотоснимки: масштаб 1:10 000 (конверсионные КС); масштаб 1:10 000...1:15 000 Космические снимки с разрешением 10...40 м
	слабой и средней	>0.25 га	
	сильной (сплошной)	>10га	
Скопление мертвого леса независимо от происхождения: в защитных лесах	Выдел	3...15 га	Среднемасштабные аэрофотоснимки: масштаб 1:10 000... 1:15 000 (конверсионные КС) Космические снимки с разрешением 10...40 м
	в эксплуатационных (резервных) лесах	>10 га	

Для обнаружения незначительных лесных повреждений, а также определения числа ослабленных деревьев по аэрофотоснимкам приходится пользоваться сверхкрупномасштабными материалами аэрофотосъемки (масштаб 1:1000 и крупнее), на которых опознаются повреждения части крон или отдельных ветвей в кронах деревьев. При значительном повреждении крон деревьев (до 2/3 и более) масштаб используемых крупномасштабных аэрофотоснимков уменьшается до 1:5000... 1:7000. Пространственно выраженные участки поврежденного леса или погибшие насаждения позволяют использовать среднемасштабные аэрофотоснимки (1:10 000... 1:15 000), а также конверсионные космические снимки (КС) высокого разрешения (1...2 м) и увеличенные космические снимки с разрешением 10...40 м.

Системы признаков дешифрирования разрабатываются, как правило, применительно к конкретным лесным объектам и материалам съемки, дешифровочные возможности которых зависят от сезона проведения съемочных работ, погодных условий, типа фотопленки, фотобумаги и процесса их фотохимической обработки. В зависимости от этих условий лесопатологические объекты отображаются на материалах съемки по-разному. На современном этапе все большее распространение получает автоматизированный способ дешифрирования, при котором не исключается экспертная тематическая интерпретация результатов, полученных при автоматической классификации материалов съемок. В связи с этим профессиональная подготовка экспертов остается актуальной задачей. В течение какого-то времени будет сохраняться необходимость подготовки лесопатологов-дешифровщиков на основе глубокого изучения изобразительных свойств материалов съемок, а также разработки дешифровочных признаков лесопатологических объектов, составленных в описательной форме.

В табл. 5 приведен пример признаков дешифрирования сосновых древостоев различного состояния, подверженных влиянию промышленных выбросов. Эти признаки специально разработаны для спектрзональных аэрофотоснимков (СН-6М) масштаба 1:10 000... 1:12 000.

В качестве признаков использован цвет и процентное участие поврежденных деревьев в пологе древостоев, разнообразие размеров крон деревьев, возможность стереоскопического наблюдения полога в глубину, особенности рисунка падающих теней. Признаки, определяющие характер границ лесных выделов, позволяют уточнять их конфигурацию за счет выделения поврежденных и погибших участков древостоев.

Таблица 5. Признаки для дешифрирования по спектрозональным аэрофотоснимкам (с пленки СН-6М) масштаба 1:10 000... 1:12 000 сосновых насаждений, поврежденных промышленными выбросами в атмосферу

Состояние насаждений	Характеристика фотоизображения полога				Признаки, определяющие характер границ лесных участков
	Цвет и встречаемость поврежденных деревьев	Различия в размерах крон	Просматриваемость полога в глубину	Характеристика падающих теней	
Здоровые	Преобладающий цвет серо-зеленый, кроны сине-зеленого оттенка до 5 %	Различия в размерах крон незначительны	Не просматривается	Тени резкие, эллипсовидные	Таксационно-лесоводственные различия
Ослабленные	Поврежденные кроны сине-зеленого, синего цвета, участие в пологе достигает 20 %, в среднем 8... 10 %	То же	Обычно не просматривается	То же	То же
Сильно ослабленные	Цвет полога зеленовато-голубой, до 40 % вершин деревьев имеет синеватый оттенок	Заметны различия в размерах крон деревьев	Просматривается на глубину до 1/2...2/3 длины крон	Тени от крон поврежденных деревьев нечеткие	Могут быть выделены участки с различной встречаемостью поврежденных крон
Усыхающие	Цвет полога преимущественно голубой с ярко-синими оттенками	Различия в размерах крон незначительные	Просматриваемость глубокая, местами до поверхности земли	Заметны тени от стволов и нечеткие тени от крон	Четкие границы между поврежденными и неповрежденными насаждениями
Погибшие	Ярко-синий цвет погибшего насаждения	Кроны незаметны, штриховатый рисунок изображения	Просматриваемость до земли, заметен подрост и подлесок	Тени от стволов деревьев прямые и тонкие	Границы участков погибших насаждений четкие

Таблица 5а. Признаки для дешифрирования спектрозональных аэрофотоснимков с пленки СН-6М масштаба 1:800-1:1000 здоровых, ослабленных и сильно ослабленных деревьев сосны, кедра и березы

Состояние деревьев	Древесная порода	Наличие сухих ветвей	Деформация рисунка крон		Цветовые характеристики крон		Густота крон	Компактность
			форма кроны по вертикали	форма проекций крон	преобладающий цвет	цветовая структура		
Здоровые	Сосна	Незаметны	Параболоидная	Округлая	Зеленый	Неразличима	Густая	Компактная
	Кедр	То же	Цилиндрическая	То же	Светло-зеленый	То же	То же	То же
	Береза	То же	Эллипсовидная	То же	Светло-оранжевый	То же	То же	То же
Ослабленные	Сосна и кедр	1-2 крупные ветви	Небольшие провалы в кронах	Ущербность края	Зеленый или светло-зеленый с синеватым оттенком	Небольшие пятна и полосы синего цвета	Средняя	Компактная
	Береза	То же	То же	То же	Оранжевый с зеленоватым оттенком	То же	То же	То же
Сильно ослабленные	Сосна и кедр	Более двух крупных ветвей	Значительные провалы на месте вершины и в кронах	Неправильная	Зелено-синий	Крупные пятна синего цвета	Редкая	Некомпактная
	Береза	То же	То же	То же	Оранжево-голубой	То же	То же	То же

Таблица 5б. Признаки для дешифрирования спектрозональных аэрофотоснимков с фотопленки СН-15 сосновых культур, пораженных корневой губкой. Масштаб 1:10000

Категория развития очагов усыхания	Характеристика изображения очагов усыхания	Форма очагов усыхания	Характеристика границ очагов усыхания	Просматриваемость в глубину полог насаждений
Возникающий	Группа погибших деревьев (цвет темно-пурпурный) в окружении сильно ослабленных (цвет желто-зеленый) и усыхающих сосен (цвет светло-пурпурный). На месте выпавших деревьев образуются «провалы» в пологе. Изображение внешне здоровых деревьев буро-зеленого цвета	Округлая или овальная диаметром до 10 м	Расплывчатые, переход в межочаговой части нечеткий	В очагах усыхания и в межочаговой части полог плотный
Действующий	Прогадины («окна») в окружении погибших (цвет темно-пурпурный), ослабленных и усыхающих деревьев (цвет соответственно желто-зеленый и светло-пурпурный). В прогалинах встречаются листовые породы (цвет зеленый). Очаг усыхания окружают внешне здоровые деревья (цвет буро-зеленый)	Округлая, овальная или неправильная диаметром более 10 м. Если «окна» слились – узорчатая	Границы «окон» четкие, границы очагов – расплывчатые, переход к межочаговой части плавный. Между слившимися «окнами» границы выражены очень слабо или отсутствуют	В межочаговой части полог, «окна» часто просматриваются до земли, вокруг «окон» полог плотный или изрежен, просматривается в глубину

Таблица 5в. Признаки для дешифрирования спектрозональных аэрофотоснимков с фотопленки СН-6М сосновых культур, пораженных корневой губкой. Масштаб 1:10000²

Категория развития очагов усыхания	Характеристика изображения очагов усыхания	Форма очагов усыхания	Характеристика границ очагов усыхания	Просматриваемость в глубину полог насаждений
Возникающий	Группа погибших деревьев (цвет сине-зеленый) в окружении сильно ослабленных и усыхающих сосен (цвет соответственно светло-зеленый и светло-сине-зеленый). На месте выпавших деревьев образуются «провалы» в пологе. Изображение внешне здоровых деревьев зеленовато-бурого цвета	Округлая или овальная диаметром до 10 м	Расплывчатые, переход в межочаговой части нечеткий	В очагах усыхания и в межочаговой части полог плотный
Действующий	Прогадины («окна») в окружении погибших (цвет сине-зеленый), ослабленных и усыхающих деревьев (цвет соответственно светло-зеленый и светло-сине-зеленый). В прогалинах встречаются листовые породы (цвет желто-розовый). Очаг усыхания окружают внешне здоровые деревья (цвет зеленовато-бурый)	Округлая, овальная или неправильная диаметром более 10 м. Если «окна» слились – узорчатая	Границы «окон» четкие, границы очагов – расплывчатые, переход к межочаговой части плавный. Между слившимися «окнами» границы выражены очень слабо или отсутствуют	В межочаговой части полог, «окна» часто просматриваются до земли, вокруг «окон» полог плотный или изрежен, просматривается в глубину

Последовательность дешифрирования материалов съемок

Процесс дешифрирования материалов съемок включает следующие этапы: привязку, обнаружение объектов, их опознание, интерпретацию и экстраполяцию.

Привязка снимков заключается в определении пространственного (географического) положения территории, изображенной на снимках, и осуществляется при помощи географических, топографических, лесных тематических карт или с использованием специальных

² Таблицы 5а, 5б и 5в взяты Методических рекомендаций по надзору, учету и прогнозу массовых размножений стволовых вредителей и санитарного состояния лесов, ВНИИЛМ, Пушкино, 2006, упомянутые приложения в оригинале — включены в текст компиляции., — прим. редактора.

программных продуктов и навигационных данных. Ориентирами и опорными точками для привязки служат места взаимного пересечения элементов гидрографической сети, дорог, трасс коммуникаций, просек, а также населенные пункты и другие, надежно опознаваемые объекты.

Обнаружение объектов – выделение различных рисунков изображения, характерных для дешифрируемых объектов или их групп. Опознавание объектов, или их идентификация, включает анализ комплекса прямых признаков дешифрирования тона (цвета), формы, рисунка (структуры, текстуры), размеров изображения и элементов рисунка, определяющих физиономичность изображенных объектов, а также косвенных признаков, указывающих на сопряженность распознаваемых объектов с другими объектами или природными и антропогенными особенностями.

Интерпретация заключается в определении характеристик дешифрируемых объектов по прямым и косвенным признакам в зависимости от тематической направленности дешифрирования.

Экстраполяция – включает идентификацию аналогичных объектов на всей территории, изображенной на одном снимке или нескольких снимках, полученных при одних и тех же атмосферно-оптических условиях съемки,

При лесопатологическом дешифрировании иногда с трудом можно различить здоровые и ослабленные деревья или насаждения, а также отличить сильно ослабленные от ослабленных и усыхающих деревьев или насаждений. Поэтому при интерпретации может быть предложена схема, когда первоначально привлекается заведомо избыточное число признаков, из которых затем отбирают наиболее информативные. Анализируют не только традиционные прямые признаки, характеризующие особенности структуры изображений, но и дополнительные (ландшафтно-климатические, топографические и другие параметры), которые могут повысить результативность дешифрирования материалов съемок. При этом часто возникает задача совместного анализа разнотипных количественных, качественных и классификационных признаков. Таким образом, процедура классификации, ранжирования и отбора признаков дешифрирования состоит из нескольких этапов.

На первом этапе выявление информативных признаков дешифрирования проводится на основе анализа коэффициентов корреляции между признаками. Отдельные из признаков с высокими значениями парной корреляции на основе экспертной оценки лесопатологов могут быть исключены из списка информативных признаков как дублирующие друг друга. На следующем этапе предусматривается ранжирование признаков по привносимой ими доли вероятности в распознавание категорий состояния деревьев или насаждений. На заключительном этапе происходит определение оптимального набора признаков, которые обеспечивают заданную точность выделения информационных классов. В задачу экспертов обычно входит оптимизация числа классов, распознаваемых с приемлемой для практики точностью.

Например, при дешифрировании аэрофотоснимков СН-15 (масштаб 1:4000... 1:5000) Байкальского заповедника процедура распознавания категорий состояния более 260 хвойных деревьев (пихты, ели и кедра) была проведена в три этапа (рис. 3). На первом этапе здоровые (I), ослабленные (II), сильно ослабленные (III) и усыхающие (IV) деревья, кроме деревьев текущего (V) и старого (VI) сухостоя, распознавались с невысокой точностью. Для их распознавания использовался набор из девяти признаков дешифрирования (цвет, форма проекций крон, густота крон, целостность крон и др.). Правильность определения классов состояния значительно возросла за счет повышения вероятности распознавания объединенной группы, в которую вошли здоровые и ослабленные деревья (79.5 %). Сильно ослабленные и усыхающие деревья (III и IV категории состояния), образовавшие второй класс состояния, по-прежнему распознавались

неуверенно (48.7 %). Дальнейшее объединение деревьев проведено таким образом, что в первый класс состояния вошли сырорастущие деревья I—III категорий состояния, а во второй – деревья погибшей части древостоя, т.е. IV-VI категорий состояния.

Для окончательного распознавания двух классов состояния деревьев с допустимой для практики точностью (87.0 и 84.2 %), потребовался набор только из трех признаков дешифрирования: цвета изображения, целостности и густоты кроны.

Категории состояния деревьев	I	II	III	IV	V	VI
Вероятность правильного распознавания	62.1 %	48.9 %	39.2 %	59.3 %	100 %	85 %
Категории состояния деревьев	I – II		III – IV		V-VI	
Вероятность правильного распознавания	79.5 %		48.7 %		86.7 %	
Категории состояния деревьев	I – III			IV-VI		
Вероятность правильного распознавания	87%			84.2 %		

Рис. 3. Схема последовательного распознавания по аэрофотоснимкам категорий или классов состояния деревьев

3. Примеры оценки лесопатологического состояния лесов по аэрокосмическим снимкам

Первое изучение по черно-белым аэрофотоснимкам масштаба 1:8 000... 1:10 000 сухостойных насаждений и определения их степени усыхания в 1926 г. проводил Г.Г. Самойлович. Особенности лесопатологического дешифрирования аэрокосмических снимков изучали также С.В. Белов, А.А. Кирильцева, А.С. Исаев, Ю.А. Прокудин, В.Я. Ряполов, В.В. Киселев, Ю.П. Кондаков, П.А. Кропов, В.М. Жирин, СЕ. Ямбург, Л.А. Берснева и другие исследователи.

Дешифрирование ослабленных деревьев по сверхкрупномасштабным аэрофотоснимкам. В лесах особо охраняемых территорий иногда необходимо проводить оценку лесопатологического состояния отдельных деревьев, которые могут быть памятниками природы или мемориальными объектами.

Внешние признаки ослабления деревьев II и III категорий состояния, как было показано в классификации лесных повреждений, связаны с усыханием отдельных ветвей или части кроны, их суховершинностью или изреживанием. Для обнаружения морфологических изменений, затрагивающих незначительную часть кроны деревьев, были исследованы информативные возможности спектральных аэрофотоснимков (с пленки СН-6М), полученных в масштабах 1:350, 1:660, 1:830. В полевой период на аэрофотоснимках всех трех масштабов было опознано и описано более 300 здоровых, ослабленных и сильно ослабленных деревьев кедра, сосны, березы. При стереоскопическом рассматривании определены дешифровочные признаки, характеризующие состояние ослабленных и сильно ослабленных деревьев: наличие сухих ветвей, нарушенность формы кроны, цвет и цветовую структуру изображения кроны, густоту и компактность кроны.

При проверке результатов дешифрирования в лесу установлено, что вероятность опознавания по аэрофотоснимкам масштаба 1:350 и 1:830 ослабленных и сильно ослабленных деревьев сосны и березы достигает 0.76...0.98 (табл. 6). Сильно ослабленные деревья кедра опознаются менее уверенно (0.60...0.64) и перепутываются с ослабленными деревьями. Характерно, что по аэрофотоснимкам масштаба 1:660 опознавание ослабленных и сильно ослабленных деревьев, особенно кедров, происходит с меньшей вероятностью, чем по снимкам других масштабов. Это объясняется тем, что по мере изменения масштаба съемки набор

признаков дешифрирования ослабленных и сильно ослабленных деревьев имеет тенденцию к перегруппировке. Для снимков масштаба 1:350 более информативны признаки, характеризующие детальное строение крон, а для масштаба 1:830 повышенной информативностью обладают цветовые признаки дешифрирования, т.е. по мере уменьшения масштаба происходит цвето-генерализация и общая потеря мелких деталей в изображении крон деревьев. На снимках масштаба 1:660 детальность изображения крон по сравнению со снимками масштаба 1:350 ухудшается и не компенсируется цветовыми признаками по сравнению со снимками масштаба 1:830.

Учитывая, что с помощью снимков масштаба 1:830 в большинстве случаев удастся распознавать ослабленные и сильно ослабленные деревья с приемлемой достоверностью, для оценки степени ослабления насаждений рекомендуется в необходимых случаях проводить аэрофотосъемку лесов особо охраняемых территорий в масштабе 1:800...1:900.

Таблица 6. Вероятность опознавания ослабленных и сильно ослабленных деревьев по спектральному аэрофотоснимкам

Порода	Масштаб аэрофотоснимков	Вероятность опознавания	
		ослабленных деревьев	сильно ослабленных деревьев
Сосна	1:350	0.98	0.90
	1:660	0.85	0.90
	1:830	0.98	0.95
Кедр	1:350	0.88	0.60
	1:660	0.58	0.25
	1:830	0.94	0.64
Береза	1:350	0.76	0.85
	1:660	0.70	0.76
	1:830	0.92	0.83

На рис. 4 приведен фрагмент сверхкрупномасштабного спектрального аэрофотоснимка, на котором изображены кроны деревьев березы, относящиеся к разной категории состояния. Видно, что в изображении ослабленных, сильно ослабленных и усыхающих крон деревьев появляются оттенки синеватого цвета, а также изменяется компактность крон.

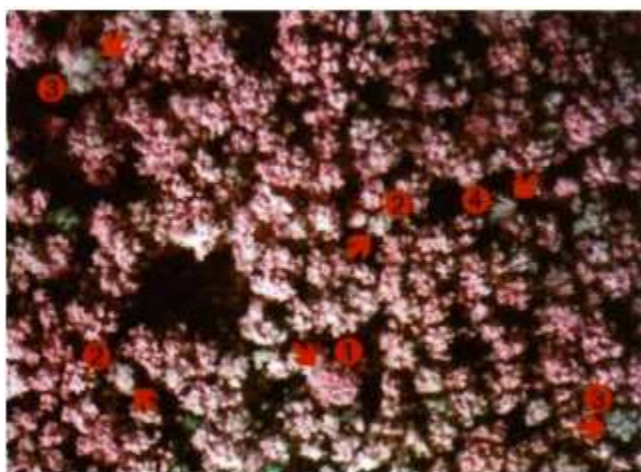


Рис. 4. Фрагмент сверхкрупномасштабного спектрального аэрофотоснимка СН-6М с изображением: здоровых (1), ослабленных (2), сильно ослабленных (3) и усыхающих (4) деревьев березы

Определение степени усыхания насаждений по аэрофотоснимкам. При распознавании на спектральных аэрофотоснимках производственного масштаба лесоустройства (1:12

000...1:15 000) деревьев свежего и старого сухостоя можно определять степень усыхания (санитарное состояние) насаждений. Постепенное накопление сухостойных деревьев, прежде всего хвойных пород, может быть связано с прохождением беглых низовых пожаров, хроническим воздействием промышленных выбросов, деятельностью стволовых вредителей и других медленнодействующих вредных факторов среды. Сходная, но быстроменяющаяся картина повреждений наблюдается при воздействии хвое- и листогрызущих насекомых-вредителей леса.

Здоровые деревья лиственницы изображаются на летних спектрозональных аэрофотоснимках оттенками желтого цвета, сосны и ели (пихты) – зеленоватого, а усохшие и усыхающие деревья – зеленовато-синим, синим цветом. Цветовые различия позволяют определять степень усыхания насаждений подобно тому, как по аэрофотоснимкам устанавливается дешифровочный состав древостоев. В этом случае сухостойные деревья могут быть подсчитаны, как деревья другой породы (рис. 5).



Рис. 5. Фрагмент спектрозонального аэрофотоснимка СН-6 масштаба съемки 1:10 000 с изображением усохших деревьев ели (пятна синего цвета) в очагах массового размножения стволового вредителя жука-типографа

Процентное соотношение сухостойных деревьев и общего числа подсчитанных характеризует степень усыхания насаждения. При визуальном дешифрировании на аэрофотоснимках деревья подсчитывают внутри стандартных круглых отверстий палетки (диаметр 3...4 мм) или в кружках на экране компьютера, которые при измерениях случайно располагаются внутри контуров типичных выделов. Внутри кружков должно размещаться в общей сложности до 100...130 видимых крон деревьев.

Анализ результатов показывает, что наиболее грубые ошибки возникают из-за недоучета отставших в росте деревьев, которые не видны в пологе древостоя на аэрофотоснимках. Такие деревья появляются после низовых пожаров в первую очередь. В ряде случаев неточные результаты относятся к выделам, которые находятся в неблагоприятных условиях освещения в момент аэрофотосъемки (орографические тени).

Выявление по аэрофотоснимкам очагов поражения сосновых культур корневой губкой. Летно-съёмочные эксперименты и полевые наблюдения проведены в пораженных корневой губкой сосновых культурах Бузулукского бора. При сравнительном анализе были изучены информативные свойства аэрофотоснимков масштаба 1:10 000, полученные с двухслойной пленки СН-6М, и аэрофотоснимков масштаба 1:5000 – с трехслойной пленки СН-15.

К основным дешифровочным признакам очагов корневой губки на аэрофотоснимках относится наличие "окон" в пологе сосновых культур и распад полога древостоев. Внешне заметное проявление болезни, так называемые возникающие очаги, наблюдаются в культурах 15...20-летнего возраста при появлении усохших куртин деревьев размером менее 10 м. Куртины или "окна", превышающие по размеру этот диаметр, условно относятся к действующим, а впоследствии – к затухающим очагам (рис. 6).

Сравнение результатов камерального дешифрирования с данными полевой проверки показало, что практически безошибочно распознаются действующие очаги корневой гнили. Вероятность их распознавания составила 97 %. Вероятность обнаружения возникающих очагов болезни при использовании аэрофотоснимков масштаба 1:10 000 с фотопленки СН-6М составляет 57 % и для аэрофотоснимков масштаба 1:5000 с фотопленки СН-15 – 96 %.

Приведенные значения показывают, что материалы аэрофотосъемок в данном случае обеспечивают результативность работ, превосходящую традиционные методы наземного обследования лесопатологического состояния насаждений.

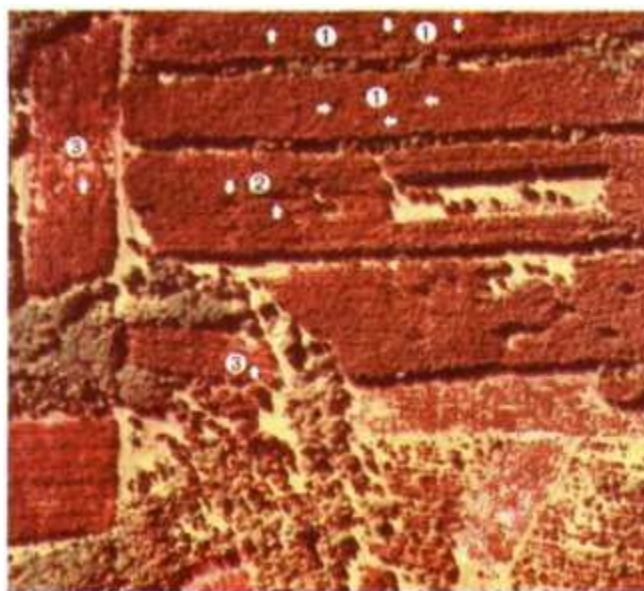


Рис. 6. Фрагмент спектрального аэрофотоснимка СН-15 с изображением очагов корневой гнили в сосновых культурах: 1 – возникающих; 2 – действующих; 3 – затухающих

Автоматизированная оценка санитарного состояния насаждений по аэрофотоснимкам.

Появление сухих и сухостойных деревьев изменяет структуру изображения полога насаждений на аэрофотоснимках. Автоматизированной обработке были подвергнуты спектральные аэрофотоснимки СН-6М производственного масштаба 1:15 000 с изображением типичных выделов, размещенных в насаждениях чистой лиственницы и в смешанных лиственнично-сосновых насаждениях, санитарное состояние которых связано, в основном, с последствиями низовых пожаров (Южная Якутия). Эти насаждения произрастают в условиях среднегорного рельефа (400... 1100 м над ур. моря) на склонах различной экспозиции и крутизны.

Мерой оценки санитарного состояния является разность между общим Моб и продуцирующим Мпр запасами древостоев, определение которых проводилось при автоматизированном дешифрировании аэрофотоснимков. Фактические значения были вычислены в натуре по данным перечета всех деревьев на круговых площадках, а Мпр – по данным перечета деревьев I—III категорий состояния. Дешифровочные значения запасов определялись по регрессионным уравнениям степенного вида, параметрами которых были высота насаждений и фотометрические признаки, полученные при сканировании и описывающие структуру изображения полога древостоев, а также признаки, характеризующие условия местопроизрастания, освещенность склонов в момент съемки и расположение фотоизображения типичных выделов в поле кадра.

Для чистых насаждений лиственницы ошибка вычисления общего запаса оказалась равной $\pm 23.0 \%$, а для смешанных древостоев – $\pm 21.0 \%$; продуцирующие запасы чистых и смешанных насаждений были определены с одинаковой ошибкой $\pm 23.5 \%$.

Полученный уровень ошибок позволил рекомендовать для практического использования описанный способ оценки санитарного состояния насаждений по аэрофотоснимкам в резервных лесах. При соблюдении соотношения:

$$[(M_{об} - M_{пр}) \times 100] / M_{об} < 51 \pm 10 \%,$$

насаждения войдут в группу с нормальным уровнем естественного отпада, а превышающий эти значения уровень отпада будет означать накопление сухостойной древесины и ухудшение санитарного состояния насаждений.

Автоматизированное определение по аэрофотоснимкам категории состояния насаждений

Автоматизированное дешифрирование категорий состояния сосновых насаждений, поврежденных промышленными выбросами, можно проводить по черно-белым аэрофотоснимкам масштаба 1:10 000 с инфрахроматической пленки И-840. Этот тип черно-белой аэрофотопленки способен регистрировать отраженную радиацию в инфракрасной зоне спектра.

Основой формирования фотометрических признаков служат оптическая плотность и текстура изображения верхнего полога леса с привлечением дополнительных сведений об особенностях роста и условиях развития насаждений. Например, топографические признаки учитывают расположение насаждений относительно источника промышленных выбросов. Повышает достоверность результатов дешифрирования и использование климатических параметров, например, значение повторяемости ветров от источника промышленных выбросов в сторону обследуемых лесных участков. Достоверность дешифрирования существенно возрастает после привлечения из базы таксационных данных таких показателей, как высота, сомкнутость полога и др.

Признаки коррелируют друг с другом, поэтому роль каждого из них при определении категорий состояния насаждений различна. Оценку информативности признаков проводят по их весовым коэффициентам:

$$W_i = \frac{1}{p(p-1)} \sum_{j=1}^p \sum_{\substack{k=1 \\ k \neq j}}^p \frac{|\bar{x}_{ij} - \bar{x}_{ik}|}{\sqrt{s_{ij}^2 + s_{ik}^2}}$$

где:

p – число классов, на которые разбит интервал изменения показателя;

$\bar{x}_{ij}, \bar{x}_{ik}$ – средние значения i -го признака для j -го и k -го классов;

s_{ij}^2, s_{ik}^2 – дисперсии i -го признака для j -го и k -го классов.

К наиболее информативным признакам условно относят те из них, которые отличаются высокой встречаемостью при достоверности 0.8. Среди фотометрических признаков наиболее информативной является величина оптической плотности фотоизображения сосновых насаждений. В группе дополнительных производных признаков выделено соотношение P/R , которое объединяет повторяемость ветра в сторону лесных участков (P) и их удаление (R) по прямой линии от источника промышленных выбросов. Из таксационных показателей наиболее информативна сомкнутость полога насаждений.

Информативные свойства аэрофотоснимков, полученных с черно-белой инфракрасной пленки И-840, могут быть охарактеризованы величиной среднеквадратической ошибки машинного определения категорий состояния поврежденных сосняков на основе комбинации информативных фотометрических, производных и таксационных признаков. Ее значение при сравнении с наземными данными равно $\pm 15...17\%$ (при достоверности 0.68).

Выявление по материалам съемок погибших насаждений. При сильном или продолжительном воздействии вредных факторов среды происходит гибель насаждений на больших площадях.

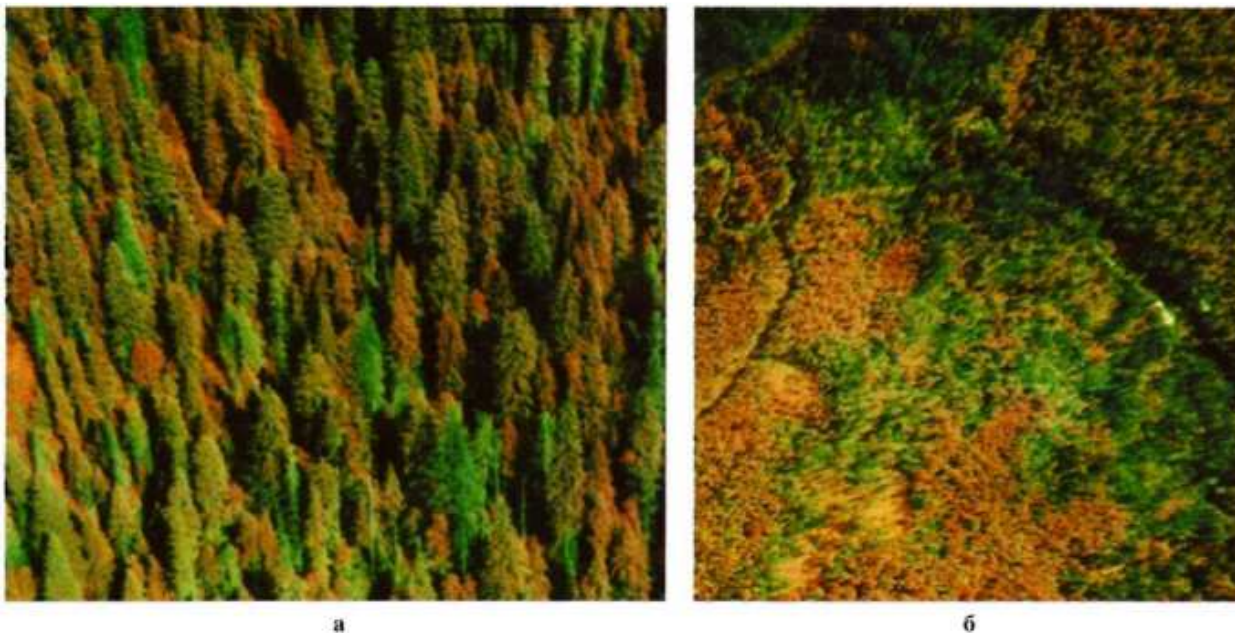


Рис. 7. Перспективный (а) и плановый (б) спектрозональные аэрофотоснимки СН-6М с изображением крон деревьев и насаждений пихты, поврежденных сибирским шелкопрядом (оттенки сине-зеленого цвета)

Одним из наиболее опасных видов хвоегрызущих насекомых, вспышки массового размножения которого приводили к гибели насаждений на значительных площадях, является сибирский шелкопряд. Основным дешифровочным признаком усыхающих или усохших деревьев на спектрозональных аэрофотоснимках, как и в других случаях, описанных выше, является синий или сине-зеленый цвет изображения крон на аэрофотоснимках (рис. 7).

Степень усыхания определяется подсчетом отношения усыхающих и сухостойных деревьев к общему числу крон на каждом выделе. Результаты дешифрирования сравниваются с данными наземного обследования заложенных в типичных выделах круговых площадок. Помимо степени усыхания древостоев, для оценки общего санитарного состояния насаждений применяют такой показатель, как средневзвешенная категория состояния, определяемая по соотношению числа деревьев, относящихся к разным категориям состояния.

Для обнаружения повреждений отдельных деревьев используется материалов ДЗЗ высокого (метрового и субметрового) пространственного разрешения, на которых опознаются повреждения части крон или отдельных ветвей в кронах деревьев.

При большой площади погибших лесов, независимо от причины их гибели и При значительном повреждении крон деревьев с увеличением линейных размеров участков поврежденного леса или погибших насаждений, для их обнаружения и опознавания могут быть использованы мелкомасштабные спектрозональные аэрофотоснимки или синтезированные материалы космических съемок с меньшим пространственным разрешением. Важным остается производство съемочных работ при оптимальных атмосферно-оптических условиях и в сроки,

которые позволяют получать снимки лесопатологических объектов с наиболее информативными изобразительными свойствами. Приведем несколько примеров.

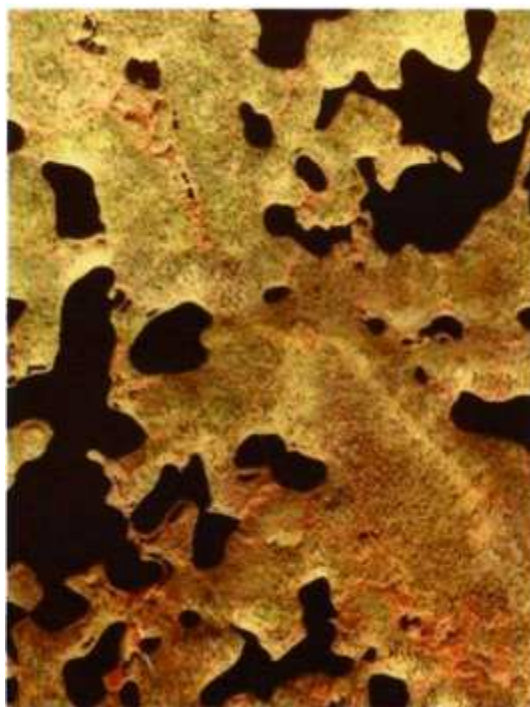


Рис. 8. Фрагмент мелкомасштабного спектрозонального аэрофотоснимка СН-6М (съемка в масштабе 1:25 000) с изображением погибших насаждений лиственницы в зоне действия металлургического производства (г. Норильск)

Под воздействием промышленных газов в хвойных насаждениях происходит преждевременное побурение и опадание хвои, снижение прироста и последующее усыхание деревьев. При хроническом и долговременном воздействии наблюдается гибель насаждений на больших площадях (рис. 8).

При обследовании лесов, пострадавших от ураганных ветров, по космическим снимкам с помощью признаков дешифрирования определяют, например, вид ветровала (сплошной, частичный) и процент вывала деревьев (табл. 7). Более точно ущерб от воздействия ураганных ветров может быть определен при дешифрировании аэрофотоснимков (рис. 9). На снимке изображено два буреломных участка осинника через 3 мес (август) после урагана. За этот период листва поваленных и сломанных деревьев изменила окраску, и красноватый цвет изображения бурелома хорошо отличается от не пострадавших насаждений.



Рис. 9. Фрагмент спектрозонального аэрофотоснимка СН-15 с изображением ветровальных и буреломных участков леса через три месяца после урагана

Таблица 7. Признаки для дешифрирования участков с различной степенью повреждения насаждений ветровалом по черно-белым космическим снимкам (таежная зона европейской части России)

Степень повреждения	Сомкнутость полога Вывал, %	Тон изображения	Структура изображения	Форма участков ветровала	Выраженность границ участков ветровала	Положение участка в рельефе
Сплошной ветровал						
Сплошной вывал деревьев	до 0.1 70...100	Преобладает светло-серый (хвойные леса) или беловатый (лиственные леса)	Однородная	Контурь четко выраженной формы, вытянутые по направлению действия ветра	Четкие среди спелых и перестойных насаждений	Водораздельные пространства, пологие склоны увалов
Частичный ветровал						
Сильная	0.2...0.3 50...70	Промежутки между куртинами беловатого тона, сохранившиеся куртины темновато-серого (хвойные) и серого (лиственные) тона	Полосчатая; реже пятнистая	Промежутки между куртинами имеют вид пятен разной формы или полос, вытянутых вдоль действия ветра, расходящихся веерообразно	Четкие среди лесонепокрытых земель и молодняков	То же
Средняя	0.4...0.5 30...50	Темновато-серый тон насаждений с беловатыми полосками вывалов	Полосчатая	Вывалы в насаждениях в виде полос разной ширины и длины, расходящихся по направлению ветра	То же	Водораздельные и пониженные пространства
Слабая	0.5 до 30	Преобладает серый тон насаждений с отдельными полосками	То же	Вывалы в насаждениях в виде коротких расходящихся полос		Понижения и низкие равнины, долины рек

Примечание. Признаки дешифрирования относятся к ветровалу приспевающих, спелых и перестойных хвойных (ель, пихта) и лиственных (береза, осина) насаждений.

Повышенная обзорность космических снимков -привлекательная особенность этих материалов при обследовании состояния лесов на больших территориях. Дополнительные возможности предоставляют многозональные радиометры с различным пространственным

разрешением. Большинство из них регистрируют отражение земной поверхности не только в видимом диапазоне длин волн, но в ближней, средней и дальней инфракрасных областях спектра.

Это дает возможность повысить информативность признаков давших от воздействия различных факторов среды дешифрирования участков леса, в том числе пострадавших от воздействия различных факторов среды (рис. 10).

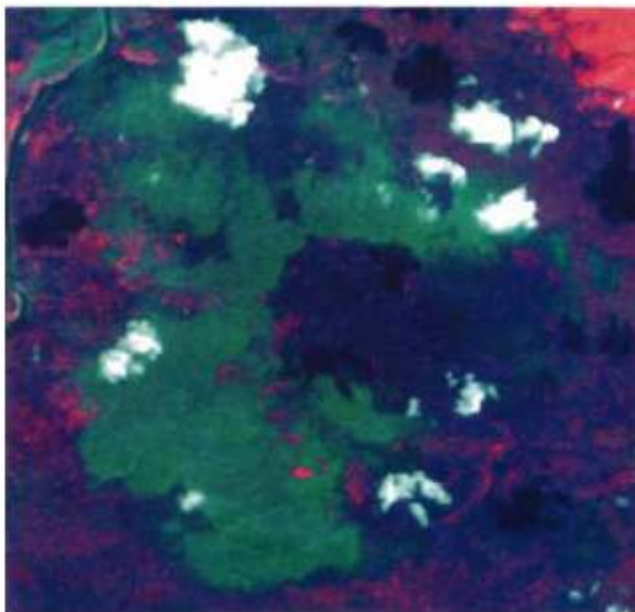


Рис. 10. Фрагмент синтезированного снимка французской космической системы SPOT с изображением погибших от сибирского шелкопряда темнохвойных лесов (окрашены оттенками зеленого цвета)

4. Методические рекомендации по оценке лесопатологического состояния насаждений с помощью материалов съемок

Методические рекомендации по дистанционной оценке лесопатологического состояния отдельных деревьев и насаждений содержат предложения по распознаванию по материалам съемок различных типов лесных повреждений. Оценка лесопатологического состояния насаждений с помощью материалов съемок позволяет определять степень повреждения или усыхания насаждений с достаточной для практики точностью и с меньшими, по сравнению с наземными методами, трудозатратами.

Проведение работ в лесах различного хозяйственного назначения. В Инструкции по экспедиционному лесопатологическому обследованию лесов (1983) определены условия, при соблюдении которых можно проводить лесопатологическое дешифрирование материалов съемок в сочетании с элементами наземных работ³. Этот вид сбора данных рекомендуют для применения в лесах, подвергающихся длительному воздействию неблагоприятных факторов или воздействию разового фактора, повлекшего за собой гибель древостоев на больших площадях (лесные пожары, буреломы и ветровалы, подтопление лесов, засуха, массовое размножение насекомых-вредителей и другие аналогичные случаи). В связи с этим выделено 2 группы насаждений, которые различаются по характеру воздействия вредных факторов среды и при оценке которых в современных условиях допустимо использование материалов аэрокосмических съемок (рис. 29).

В первую группу включены насаждения, повреждение которых бывает скоротечным, в течение одного вегетационного сезона, и оно зависит, прежде всего, от биологических особенностей развития хвое- и листогрызущих насекомых. В защитных лесах (реже – в

³ Оставил данную строку, в нынешних руководствах также описаны условия — прим. редактора.

эксплуатационных) эту группу пострадавших насаждений обычно обследуют методами наземных наблюдений. Материалы аэрофотосъемки используют при проведении наземного санитарно-лесопатологического обследования в качестве традиционного технологического средства лесоустройства для контурного и таксационного дешифрирования категорий земель лесного фонда. В большинстве эксплуатационных (резервных) лесов оценка санитарно-лесопатологического состояния насаждений в очагах массового размножения насекомых-вредителей проводится с помощью авиадесантного метода. В этом случае для выявления площадей пострадавших лесов рекомендуется использовать оперативную космическую информацию (Ресурс-О, SPOT, Landsat, ASTER, IRS и др.).

В другую группу входят те насаждения, в которых происходит ухудшение санитарного состояния при продолжительном по времени воздействии неблагоприятных факторов среды. Обследовать с помощью аэрофотосъемки можно насаждения с преобладанием хвойных пород старше 40 лет и лиственных – старше 30 лет. К этому возрасту обычно завершается формирование крон деревьев, и на аэрофотоснимках они получают раздельное изображение в пологе насаждений.

В таких лесах можно рекомендовать одновременно с лесоустройством по аэрофотоснимкам производственного масштаба проводить определение степени усыхания и ослабления насаждений. Преимущества спектрально-аналитических аэрофотоснимков для определения видового состава лесов важны и для лесопатологического обследования. Определив, например, древесную породу-индикатор, которую повреждает определенный вид вредителя или болезни, можно установить границы очагов при их совпадении с таксационными выделами, или уточнить эти границы в смешанных насаждениях с учетом характера распределения в лесном покрове примеси породы-индикатора.

При самостоятельном санитарно-лесопатологическом обследовании детальность оценки состояния насаждений по аэрофотоснимкам в сочетании с элементами наземных работ зависит от категорий защитности и группы леса.

В лесах, относящихся к высоким категориям защитности (первый и второй пояса зон санитарной охраны источников водоснабжения, первой и второй зон округов санитарной охраны курортов, особо ценные лесные массивы, национальные и природные парки, лесные участки, имеющие научное или историческое значение, природные памятники), рекомендуется оценивать по аэрофотоснимкам их лесопатологическое состояние путем выявления деревьев I, II, III, IV-V и VI категорий состояния. При проведении такого обследования можно использовать спектрально-аналитические аэрофотоснимки масштаба 1:1000 и крупнее.

В лесах других категорий защитности, к которым относятся леса третьей зоны округов санитарной охраны курортов, зеленых зон вокруг городов, других населенных пунктов и промышленных предприятий, рекомендуется оценивать по аэрофотоснимкам степень повреждения или ослабления насаждений путем определения числа деревьев I-II, III, IV-V и VI категорий состояния. При проведении такого обследования можно использовать спектрально-аналитические аэрофотоснимки масштаба 1:1000... 1:5000.

В лесах первой группы прочих категорий защитности, а также в лесах второй группы и, выборочно, в лесах третьей группы с интенсивным ведением хозяйства рекомендуется проводить оценку степени усыхания насаждений путем определения по спектрально-аналитическим аэрофотоснимкам масштаба 1:10 000 соотношения числа групп деревьев I-III, IV-VI категорий состояния.

Для повышения достоверности работ по оценке состояния насаждений необходимо применять аэрофотоснимки, полученные в июле-августе, т. е. в период появления в древесном полове свежего сухостоя текущего года.

При использовании аэрофотоснимков сокращается объем наземных наблюдений. Однако эти наблюдения являются необходимой составной частью работ, так как многие особенности диагностики лесных повреждений недоступны для методов дистанционного зондирования. Например, влияние промышленных выбросов на растительность устанавливают не только по санитарному состоянию древесных пород-индикаторов, но и по наличию накипных, листоватых и кустистых лишайников, состоянию подроста, его возрасту и породному составу и т. п.

5. Дешифрирование лесных пожаров⁴

Данные о лесных пожарах, включающие в себя геопривязанные векторные данные по пожарам на территории России, обрабатываются в ФБУ «Авиалесоохрана» в системе ИСДМ-Рослесхоз и передаются в ФБУ «Рослесозащита». Необходимые данные сотрудники в ФБУ «Рослесозащита» могут получить, обратившись в головной офис организации.

Гари от верховых пожаров на космоснимках имеют характерный фиолетовый цвет, данные о низовых и подземных пожарах можно получить получают на основе точек горения (т.е. тепловых аномалий).

6. Соответствие аэросъемки и комбинаций каналов космоснимков⁵

Классической инфракрасной съемке и пленке СН-6М для дневного воздушного фотографирования в условных цветах с малых и средних высот (аналог МАК-400) соответствует комбинация каналов (NRG) 4,3,2 спутников Landsat 5, Landsat 7 и комбинация каналов 5,4,3 спутника Landsat 8, то есть комбинация каналов, где красный канал Near Infrared, зеленый Red, а синий Green⁶.

Стандартная комбинация «искусственные цвета». Растительность отображается в оттенках красного, городская застройка – зелено-голубых, а цвет почвы варьируется от темно до светло коричневого. Лед, снег и облака выглядят белыми или светло голубыми (лед и облака по краям). Хвойные леса будут выглядеть более темно-красными или даже коричневыми по сравнению с лиственными. Эта комбинация очень популярна и используется, главным образом, для изучения состояния растительного покрова, мониторинга дренажа и почвенной мозаики, а также для изучения агрокультур. В целом, насыщенные оттенки красного являются индикаторами здоровой и (или) широколиственной растительности, в то время как более светлые оттенки характеризуют травянистую или редколесья/кустарниковую растительность.

Пленке СН-15 для спектрально-анализируемых аэрофотоснимков примерно соответствует комбинация каналов (MNG) 5,4,3 спутников Landsat 5, Landsat 7 и 6,5,4 спутника Landsat 8, то есть комбинация каналов, где красный канал MIR, зеленый Near Infrared, а синий Green⁷.

Эта комбинация дает дешифровщику очень много информации и цветовых контрастов. Здоровая растительность выглядит ярко зеленой, а почвы – розовато-лиловыми. Эта комбинация

⁴ Раздел написан редактором, отсутствует в оригинальных материалах, — примечания редактора.

⁵ Раздел написан редактором, отсутствует в оригинальных материалах, также использованы материалы статьи [«Интерпретация комбинаций каналов данных Landsat TM / ETM+»](#) портала GIS-LAB — примечания редактора.

⁶ См. М.Ю. Жилнев [«Обзор применения мультиспектральных данных ДЗЗ и их комбинаций при цифровой обработке»](#), «Геоматика», 2009, №03: «4,3,2.... При этой комбинации спектральных каналов отображение местности аналогично традиционной инфракрасной аэросъемке».

⁷ Косвенно сказано здесь: М.Ю. Жилнев [«Обзор применения мультиспектральных данных ДЗЗ и их комбинаций при цифровой обработке»](#), «Геоматика», 2009, №03: «5,4,3 ...эта композиция полезна для изучения растительности, заражения сельскохозяйственными вредителями и широко используется в области управления лесозаготовками и изучения лесных сообществ».

очень удобна для изучения растительного покрова и широко используется для анализа состояния лесных сообществ.