

А. М. Крылов (ФГУ «Рослесозащита»)

В 2005 г. окончил Московский государственный университет леса по специальности «лесное хозяйство». С 2006 по 2009 гг. работал в специализированной лесоустроительной (лесопатологической) экспедиции ФГУ «Российский центр защиты леса» (ФГУ «Рослесозащита»). С 2009 г. по настоящее время — начальник отдела дистанционного лесопатологического мониторинга ФГУ «Рослесозащита».

Н. А. Владимирова (ФГУ ВНИИЛМ)

В 2003 г. окончила Санкт-Петербургский государственный университет, факультет географии и геоэкологии. В настоящее время — научный сотрудник сектора ГИС ФГУ «Всероссийский научно-исследовательский институт лесного хозяйства и механизации» (ФГУ ВНИИЛМ).

Дистанционный мониторинг состояния лесов по данным космической съемки

Ежегодно значительная часть лесов России подвергается воздействию ослабляющих факторов: пожаров, сильных ветров, засухи, повреждению вредителями и болезнями. ФГУ «Российский центр защиты леса» занимается мониторингом состояния лесов. Для этого заложена большая сеть постоянных пробных площадей, проводится подробная наземная оценка состояния лесов более чем на 1 млн га ежегодно. Однако этого недостаточно для того, чтобы контролировать состояние всех повреждаемых лесов. В дополнение к точным наземным методам необходим эффективный инструмент для обнаружения и оценки площади поврежденных лесных участков на большой территории.

В России проведены масштабные исследования по использованию данных дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) для определения состояния лесов. Первое изучение по черно-белым аэрофотоснимкам масштаба 1:8000 — 1:10 000 сухостойных насаждений и определение 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, С.Е. Ямбург, Л.А. Берснева и другие исследователи [1].

В производственных масштабах применялось аэровизуальное обследование; аэрофотосъемка с

целью определения состояния ограничивалась в основном опытными работами. При дешифрировании аэрофотосъемки достигалась высокая точность определения отпада, степени дефолиации, соответствующие нормы вошли в отраслевые руководства и инструкции. Однако применение аэрофотосъемки ограничивает высокая стоимость и низкая оперативность работ, сложное получение разрешительных документов. К моменту получения аэрофотосъемки информация на снимках часто уже не соответствует актуальному состоянию лесов. Космическая съемка в большинстве случаев дает более низкую точность определения состояния, однако она более оперативна, дешевле (данные некоторых сенсоров бесплатны). На сегодняшний момент мы имеем на большую часть территории России ежегодное многократное покрытие данными различного разрешения.

В то же время большую проблему представляет получение безоблачных данных. Из-за недостатка данных часто приходится использовать для разных частей объекта данные различных сенсоров, имеющие разные особенности отображения дешифрируемых объектов.

Наиболее успешный пример применения спутниковых данных в лесном мониторинге — системы мониторинга лесных пожаров. В России функционирует несколько таких систем, наиболее развита ИСДМ (Информационная система дистанционного мониторинга),

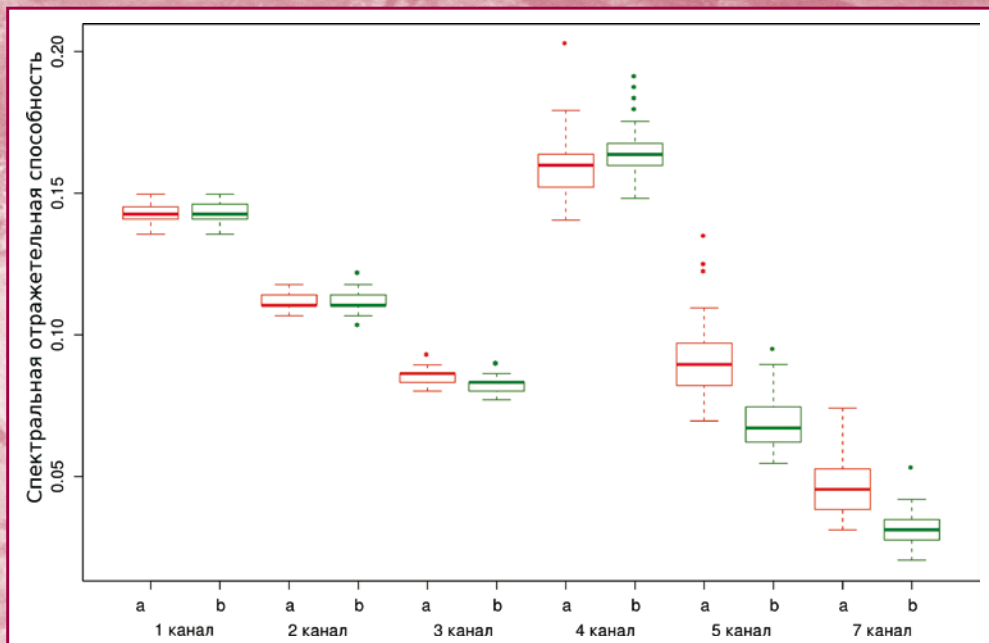


Рис. 1.

Спектральная отражательная способность поврежденных и здоровых насаждений по данным Landsat TM на примере очагов короеда типографа в Московской области.

По оси ординат отложена спектральная отражательная способность участков-эталонов. Столбцы соответствуют спектральному каналу Landsat TM (с 1 по 7) и группе эталонов: с индексом а (красные) относятся к поврежденным короедом участкам, с индексом b (зеленые) – к неповрежденным. Параллелепипед соответствует границам квантилей (x25, x75), горизонтальные штрихи – крайним значениям, жирная черта – медиана, звездочками обозначены выбросы.

разработанная ИКИ РАН по заказу Рослесхоза [2]. Она построена на использовании снимков AVHRR и MODIS. В развитие принципов системы был создан Блок лесопатологического мониторинга (БЛПМ). Его алгоритм обработки снимков MODIS хорошо показал себя на детектировании крупных очагов сибирского шелкопряда. Однако практика использования модуля показала, что разрешение MODIS недостаточно, чтобы надежно детектировать и идентифицировать большинство патологических нарушений в лесах. Для детектирования нарушений, которые проявляются как мозаика мелких пораженных участков, а также нарушений в сильно фрагментированных лесах необходимы снимки более высокого разрешения.

С 2008 г. ФГУ «Рослесозащита» ведется мониторинг территорий с наиболее напряженной лесопатологической ситуацией по снимкам Landsat TM/ETM+ с частичным привлечением снимков RapidEye, ALOS/AVNIR-2.

Главными объектами дистанционного мониторинга в 2007–2011 гг. являлись ветровалы года в европейской части России, очаги непарного шелкопряда в Краснодарском крае и очаги стволовых вредителей в Московской области.

МЕТОДЫ ВЫЯВЛЕНИЯ ИЗМЕНЕНИЙ

Визуальное дешифрирование обеспечивает более быстрые результаты и требует меньше наземных эта-

лонов, чем любой из алгоритмов автоматического выявления изменений. Однако достаточно сложна проблема пропуска участков, особенно мелких, нестабильность результатов дешифрирования разными людьми. Автоматическое дешифрирование требует больших затрат на подбор необходимого алгоритма и его параметров, достаточно большой обучающей выборки и трудоемкой верификации результатов, однако в перспективе обладает более высокой производительностью и стабильностью результатов. Целесообразность применения визуального или автоматического дешифрирования зависит от ситуации.

При автоматизированном выявлении поврежденных участков применяются различные методы компьютерной классификации изображений. Для одиночных снимков в основном используются алгоритмы классификации с применением эталонов, например, по методу максимального правдоподобия [3]. Выявление изменений с помощью анализа серий снимков обычно показывает более высокую точность. Различными исследователями использовались критерии на основе разницы вегетационных индексов NDVI, SWI и результатов преобразования Tasseled Cap [4, 5]. Также возможно применение метода опорных векторов (SVM), нейронных сетей.

При лесопатологическом дешифрировании необходимо выявить повреждение, оценить его площадь, степень, динамику и предположительную причину.

Для дешифрирования могут использоваться спектральные текстурные признаки, форма повреждений. Для выявления изменений используются в основном спектральные признаки, алгоритмы классификации по которым наиболее развиты. Для определения причины повреждения, отделения гибели и повреждения лесов от других нарушений (рубок, пожаров) часто необходимо использовать форму и текстуру объекта. Автоматизировать это несколько сложнее.

Следует отдельно рассматривать случаи, когда преимущественно происходит резкая гибель насаждений (ветровал, очаги стволовых вредителей), и ситуации, когда участки повреждаются в разной степени. В первом случае оправданно применение пороговых критериев и дискриминантного анализа, который позволяет разделить здоровые и погибшие насаждения, во втором целесообразно проводить регрессионный анализ для уточнения степени повреждения. В ходе работ по дистанционному мониторингу апробировались эти спо-

собы в различных вариациях (пороги изменения NDVI, SWI, использование дискриминантной функции и регрессионной функции по разным каналам).

НЕКОТОРЫЕ ОСОБЕННОСТИ ДЕШИФРИРОВАНИЯ ПОВРЕЖДЕНИЙ ЛЕСОВ

Характерной особенностью растительности является относительно малое отражение в красной области спектра и большее в ближней инфракрасной. При повреждении растений и снижении фотосинтеза отражение в красной области спектра увеличивается, а в ближней ИК падает. Кроме того, значительно возрастает отражательная способность в среднем ИК канале, что связано с падением содержания влаги в поврежденных деревьях. Чем больше эти изменения спектральной отражательной способности, тем легче выявляются поврежденные насаждения (рис. 1).

Однако, кроме спектральных свойств поврежденных растений, на то, что мы видим на снимке, влияет еще ряд факторов. Крона одного дерева меньше размера пикселя, поэтому часто происходит смешение спектральных характеристик здоровых и поврежденных деревьев, что может существенно снижать контрастность изменений. Таким образом, чем выше мозаичность, неоднородность повреждений, тем выше требования к разрешению снимков.

Кроме того, следует иметь в виду, что сезонные изменения спектральной отражательной способности сельхозугодий, лугов, пойм гораздо более контрастны, чем изменения леса при повреждении. Поэтому при автоматизированном поиске участков поврежденного леса важно уже на первом этапе отделить покрытые лесом площади от непокрытых – создать маску лесов.

Следующий момент лесопатологического дешифрирования – высокие требования к временному разрешению. При повреждении насаждений хвоелистогрызущими насекомыми часто сразу же после повреждения начинается процесс восстановления листвы (хвои). В этой ситуации оценить степень повреждения можно только по снимкам на пике объедания. В массивах, повреждаемых стволовыми вредителями, требуется максимально быстрое выделение поврежденных участков, пока санитарно-оздоровительные мероприятия в них могут быть эффективны.

На сегодняшний момент не существует «идеального» спутника, изображения с которого имели бы пространственное, временное и спектральное разрешение и производительность, позволяющие решать все задачи мониторинга состояния насаждений. На практике необходимо использовать набор разных данных:

- **MODIS** — для оперативного выявления крупных повреждений в однородных лесных массивах труднодоступных районов в автоматическом режиме.
- **Landsat, SPOT-4** — для производительного и в высокой степени автоматизированного выявления и оценки площади относительно крупных повреждений один или несколько раз в год на больших площадях (вплоть до всей территории РФ).
- **RapidEye** — для выявления нарушений в смешанных, неоднородных насаждениях, повреждений, представляющих собой мозаику мелких поврежденных и здоровых участков, выявления дефолиации пород, быстро восстанавливающих листву.
- **GeoEye, WorldView-2** и т.п. — для мониторинга ограниченной площади особо ценных лесов (например, Московской области).

ПРАКТИЧЕСКИЙ ОПЫТ ДЕШИФРИРОВАНИЯ ПОВРЕЖДЕНИЙ ЛЕСОВ

За последние годы специалистами ФГУ «Рослесозащита» выполнено несколько крупных работ по дешифрированию поврежденных участков леса: составлены схемы расположения поврежденных ветром участков на территории европейской России, дефолиации насаждений в Краснодарском крае, ведется мониторинг очагов короеда-типографа в Московской области.

Основными применяемыми снимками являлись Landsat TM/ETM+. В дополнение к ним применялись RapidEye, ALOS/AVNIR-2, SPOT-5. Во всех случаях нарушения с приемлемой точностью выделялись по паре снимков с использованием порога изменения индекса SWI. Применение дискриминантного уравнения или метода опорных векторов (SVM) позволяет несколько улучшить точность.

Основные ошибки связаны не с пропуском данных, а с ложным детектированием. Большая часть ложных детектирований связана с нелесными участками. Для борьбы с этими ошибками производилось маскирова-

ние нелесных участков. Маска лесов создавалась по снимку, сделанному до начала повреждения, с помощью ISODATA с последующей переклассификацией или с помощью SVM. Следующей важной задачей являлось отделение повреждений леса вредителями, болезнями и ветром от рубок, пожаров и строительства. Отделение производилось вручную в основном по форме и времени появления.

При дешифрировании различных повреждений важными оказывались разные моменты. Прошедшие в 2009 и 2010 гг. по лесам европейской части России ветровалы представляют собой сочетание нескольких крупных и множества мелких полос. Самые крупные заметны даже на MODIS, на Landsat уверенно дешифрируется 50–70% площади ветровала [6]. Для дешифрирования остальных более мелких участков требуются снимки большего разрешения. Наиболее эффективно применение спектральнональных снимков: на панхроматических ветровалы плохо отделяются от полей, прогалов, выборочных рубок.

Как показало дальнейшее развитие событий, мелкими участками ветровала не стоит пренебрегать. В условиях засухи вокруг мелких участков ветровала в ельниках Московской области сформировалось множество очагов короеда-типографа. Очаги короеда-типографа представляют собой мозаику куртин усыхания разного размера.

Для выявления очагов типографа, так же как и для ветровалов, необходимы спектральнональные снимки. Процент выявленных участков линейно зависит от разрешения. На снимках Landsat выявляется около 60% куртин [7].

Повреждения лесов непарным шелкопрядом более однородны. Во многих случаях они достаточно хорошо детектируются MODIS, однако по данным MODIS затруднительно отделить их от рубок, пожаров, фенологических изменений. На снимках Landsat они видны лучше, однако периодичность съемки Landsat не всегда позволяет получить безоблачные снимки в период между максимальным объединением и восстановлением листвы. Нами использовался аппарат RapidEye, который смог выполнить съемку насаждений в период максимального повреждения в условиях малого количества ясных дней. Кроме того, снимки RapidEye позволяют лучше понять ситуацию в смешанных насаждениях, где повреждается только часть пород и дефолиация мозаична. Использо-

вание регрессионного анализа позволяет разделить насаждения на неповрежденные, поврежденные в средней степени (20–50% дефолиации) и сильно поврежденные (60–100% дефолиации) [6].

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Благодаря непрерывно ведущейся съемке Landsat TM/ETM+, материалы которой свободно доступны, сложилась ситуация, когда возможно относительно оперативное и дешевое дешифрирование значительной части патологических процессов, происходящих в лесах Российской Федерации. На ограниченной территории это дешифрирование может проводиться с использованием относительно простых техник (использование критериев на основе разницы NDVI, SWI, метода опорных векторов) в полуавтоматическом режиме. Для охвата всей площади лесного фонда необходимо стремиться к созданию полностью автоматизированной системы дешифрирования.

Предпосылкой для создания такой системы является развитие алгоритмов обработки снимков: атмосферной коррекции, учета фенологических изменений, BRDF, фильтрации облачности и создания безоблачных композитов.

Другим необходимым фактором является накопление в базах данных стандартизированной наземной пространственной информации о состоянии лесов, которая играет роль эталонов при оценке информативности разных видов данных для анализа разных видов повреждений лесов, изучении дешифровочных признаков этих повреждений и верификации результатов работы алгоритмов автоматического дешифрирования. И наконец, успешное создание таких алгоритмов невозможно без участия развитого сообщества экспертов по визуальному дешифрированию повреждений лесов и накопления опыта работы полуавтоматическими методами.

Кроме того, опыт работ показывает, что для выявления многих типов повреждений (особенно в районах, где экономически целесообразно проводить санитарно-оздоровительные мероприятия и борьбу с вредителями) необходимо применение оперативных спектральнональных данных разрешением крупнее 10 м. К сожалению, такие данные не столь доступны, как Landsat или MODIS, и однако их закупка на территорию регионов с наиболее сложной лесопато-

логической ситуацией экономически оправдана. Ведь использование при лесохозяйственном планировании точных и актуальных данных о повреждении лесов, полученных с помощью космической съемки, один из самых эффективных способов снижения экономического, социального и экологического ущерба от болезней и вредителей лесов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Методы мониторинга вредителей и болезней леса / Под общ. ред. В.К. Тузова. – М.: ВНИИЛМ, 2004. – с. 56.
2. Abushenko, N.A., Bartalev, S.A., Belyaev, A.I., Ershov, D.V., Zakharov, M.Y., Loupian, E.A., Korovin, G.N., Koshelev, V.V., Krashenninnikova, J.S., Mazurov, A.A., Min'ko, N.P., Nazipov, R.R., Semenov, S.M., Tashchilin, S.A., Flitman, E.V., Shchetinsky, V.Y. (1999). Near real-time satellite monitoring of Russia for forest fire protection. *Mapping Science and Remote Sensing*, 36, 1, 54–61.
3. Franklin, S.E., Waring, R.H., McCreight, R.W., Cohen, W.B., Fiorella, M. (1995). Aerial and satellite sensor detection and classification of western spruce budworm defoliation in a subalpine forest. *Canadian Journal of Remote Sensing*, 21, 299–308.
4. Skakun, R.S., Wulder, M.A., Franklin, S.E. (2003). Sensitivity of the thematic mapper enhanced wetness difference index to detect mountain pine beetle red-attack damage. *Remote Sensing of Environment*, 86, 433–443.
5. Wulder, M.A., White, J.C., Bentz, B.J. & Ebata, T. Augmenting the existing survey hierarchy for mountain pine beetle red attack damage with satellite remotely sensed data// *The Forestry Chronicle* 2006 №82(2): 187–202.
6. Vladimirova N.A., Koroleva N.A., Krylov A.M. Ershov D.V., Malysheva N. V. Remote forest health monitoring in Russia // *Boreal Forests in Changing World: Challenges and Needs for Actions: Proceeding of international conference. August 15–21 2011, Krasnoyarsk, Russia – Krasnoyarsk: Sukachev Institute of Forest SB RAS* 2011: 404–410.
7. Крылов А.М., Соболев А.А., Владимировна Н.А. Выявление очагов короеда-типографа в Московской области с использованием снимков Landsat // *Вестник Московского государственного университета леса Лесной вестник* №4 2011 – с. 54–60.