

Х. Шридхаран (H. Sridharan; Техасский университет, США)

Многоуровневая классификация городских лесов по мультиспектральным данным WorldView-2*

ВВЕДЕНИЕ

Картографирование городских лесов с подразделением по породам деревьев на основе данных дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) пока еще не получило широкого распространения из-за недостаточного высокого пространственного и спектрального разрешения снимков. 8-канальные мультиспектральные снимки, получаемые со спутника WorldView-2, обладают большим потенциалом в данной области применения. В предлагаемой работе изучена возможность использования таких данных для классификации отдельных древесных пород в городских лесах в районе Даллас/Форт-Уэрт (штат Техас, США), где произрастает более 40 пород деревьев. С целью оптимального использования пространственных и спектральных преимуществ этих данных была разработана многоуровневая объектноориентированная иерархическая классификация, с помощью которой создаются модели городских лесов с разной степенью детальности — вплоть до отдельных деревьев. На уровне отдельных деревьев был использован специальный непараметрический классификатор, основанный на критерии Колмогорова—Смирнова (K-S), с целью идентификации родов и видов деревьев. Разработанная система классификации позволила достичь более высокой точности по сравнению с традиционными — около 62–64% на уровне отдельных деревьев и более 91% на других уровнях.

Информация о городских лесах содержится в соответствующих кадастрах, это общее количество деревьев, их местоположение, видовой состав, возраст и физические характеристики (такие, как высота, диаметр на высоте груди и физическое состояние). Традиционно такие кадастры составляются на основе полевых исследований, которые требуют больших затрат трудовых, временных и финансовых ресурсов.

Технологии ДЗЗ предоставляют альтернативное решение для работы с кадастрами городских лесов, менее дорогостоящее и более эффективное для больших областей. Они позволяют выполнить точный подсчет деревьев в исследуемой области, включающей в себя недоступные участки. ДЗЗ также позволяет чаще выполнять обновления кадастра с использованием новой информации. Получение новой информации путем полевых исследований обходится намного дороже.

С запуском спутника WorldView-2 появились новые возможности использования данных дистанционного зондирования для составления детальных карт лесов. Этому способствует высокое пространственное разрешение в панхроматическом режиме (0,46 м) и наличие восьми каналов вместо стандартных четырех при съемке в мультиспектральном режиме.

Усовершенствования технологий съемки приводят к необходимости разработки новых методов обработки данных. В первые годы дистанционного зондирования

*Сокращенный перевод с английского языка. Статья была представлена на конкурс «8-Band Research Challenge», проведенный компанией DigitalGlobe, и отмечена жюри как одна из лучших. Оригинал статьи опубликован на сайте компании DigitalGlobe. Перевод подготовлен к публикации Б.А. Дворкиным (Компания «Совзонд»).

самым распространенным способом определения деревьев и идентификации их видов было ручное дешифрирование аэрофотоснимков. Этот очень трудоемкий способ, отнимающий много времени и очень субъективный, т. е. в высокой степени зависящий от человеческого фактора. После появления цифровых космических снимков (например, данные Landsat) для автоматической классификации деревьев были разработаны компьютерные методы обработки изображений, и это позволило получать более точные результаты.

Большинство этих методов применялось при работе со снимками с малым спектральным разрешением, которые преимущественно использовались в 1980–90 гг. Однако эти методы не подходят для получения аналогичных результатов при обработке данных высокого пространственного разрешения.

Одна из главных причин неэффективности старых методов – основная единица анализа, выбранная для выполнения классификации. Традиционные классификаторы часто основаны на отдельных пикселях, поэтому они игнорируют пространственный контекст новых данных. Пиксели на снимках с высоким пространственным разрешением имеют преимущество однозначности коэффициентов отражения конкретных видов, что позволяет свести к минимуму проблему смешивания пикселей. Но это преимущество связано с возрастанием вариативности внутри конкретных видов.

В большинстве существующих исследований используется объектноориентированный метод, который дает достаточную точность классификации при небольшом количестве классов (обычно менее 10). Основное внимание в этих исследованиях уделялось очерчиванию объекта-дерева, и меньше внимания уделялось классификации на видовом уровне. Это может быть объяснено ограниченным числом спектральных каналов, доступных для существующих сенсоров высокого пространственного разрешения. Типичные городские леса имеют сложный видовой состав (обычно не менее 20 видов), в этом случае изображения с 4 каналами могут не обеспечить достаточной точности разделения видов, соответственно точность классификации будет невысокой.

Снимки WorldView-2 имеют дополнительные каналы, в том числе желтый, крайний красный край и ближний ИК2. Эти каналы расположены в областях спектра, чувствительных к растительности, и могут предоставить важную информацию для идентификации мелких раз-

личий между древесными породами. Предлагаемое исследование нацелено на оптимальное использование потенциала высокого пространственного и спектрального разрешения, предоставляемого новой технологией дистанционного зондирования WorldView-2, при составлении карт городских лесов. Прежде всего оцениваются возможности 8-канальных данных для дифференциации древесных пород. Затем разрабатывается иерархическая многоуровневая объектноориентированная система классификации городских лесов. На уровне отдельных деревьев предлагается использовать непараметрический объектноориентированный классификатор, основанный на непараметрическом статистическом тесте K–S.

Turtle Creek на севере Далласа (штат Техас). Городской лес Далласа имеет очень сложный состав – примерно 50 зарегистрированных видов деревьев, расположенных среди зданий плотной застройки. На данной территории произрастают преимущественно лиственные породы, однако представлено также несколько хвойных видов.

Для исследования использовались два мультиспектральных снимка WorldView-2, полученные 9 января 2010 г. и 26 апреля 2010 г. (рис. 1).

Поскольку в районе Далласа преобладают листопадные деревья, в январе на большинстве деревьев отсутствовали листья, что отображено на зимнем снимке. Данные апрельского снимка были получены в период, когда деревья были покрыты листьями, и соответственно этот снимок стал основным источником спектральной информации для классификации видов. Январские данные представляют хорошую возможность четко выделить типы деревьев (лиственные и хвойные) путем сравнения с апрельскими данными.

На снимках уже была предварительно проведена геометрическая и радиометрическая коррекция. Кроме того, данные были подвергнуты преобразованию по способу *pan-sharpening* (увеличение пространственного разрешения мультиспектральных снимков путем их совмещения с панхроматическими снимками).

Контрольные данные для этого исследования были получены в результате полевых работ, проведенных в августе 2008 г. Полевые исследования включали в себя регистрацию таких характеристик деревьев, как вид, высота и диаметр на высоте груди. Исходные полевые данные содержали информацию о 2602 деревьях, относящихся к 46 породам. Для шести пород было собрано только по

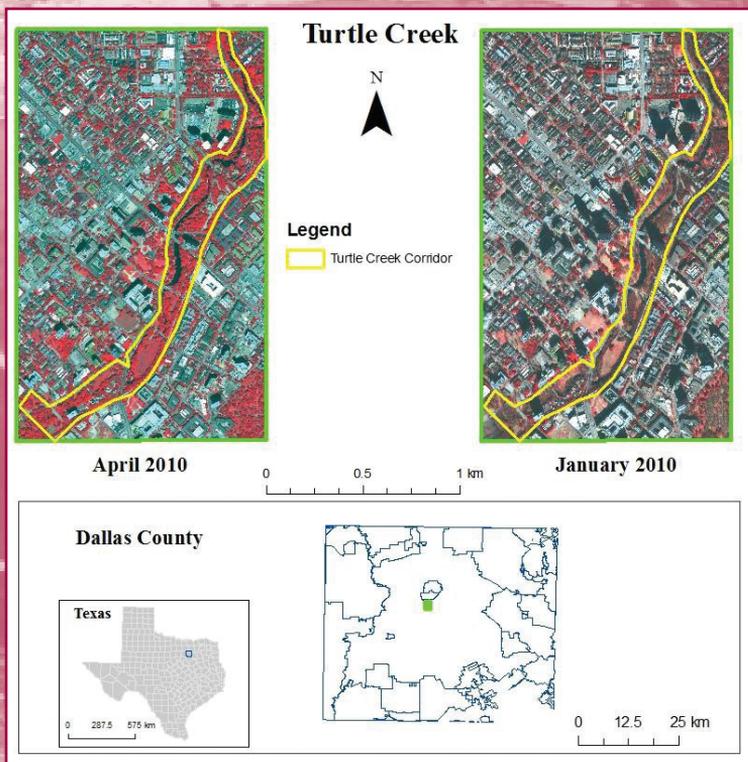


Рис. 1.

Исследуемая область Turtle Creek, представленная двумя композитными изображениями в условных цветах на основе снимков, полученных в январе и апреле 2010 г.

одному образцу, что было недостаточно для проведения эксперимента и проверки классификатора.

Поэтому эти образцы не учитывались, и для проведения эксперимента осталось 40 пород, относящихся к 34 родам (табл. 1). 5 пород из этих 40 – хвойные, остальные 35 – лиственные.

МЕТОДИКА ИССЛЕДОВАНИЯ

С целью оценки потенциальных возможностей 8-канальных снимков для классификации видов был выполнен анализ по методу многомерного масштабирования, позволивший визуально исследовать различимость пород, с последующим сравнением результата с резуль-

татом, полученным по обычным 4-канальным снимкам. Затем была разработана многомасштабная иерархическая система классификации, предусматривающая каскадные уровни классификации деревьев, начиная с самого крупного (уровень всего лесного покрова) до самого мелкого (уровень отдельных деревьев).

На каждом уровне по снимкам были выделены различные пространственные и спектральные характеристики.

Однородные объекты были сгруппированы в различных масштабах в каждой иерархии, а также были разработаны различные классификаторы, подходящие для выполнения объектноориентированной классификации для соответствующих уровней.

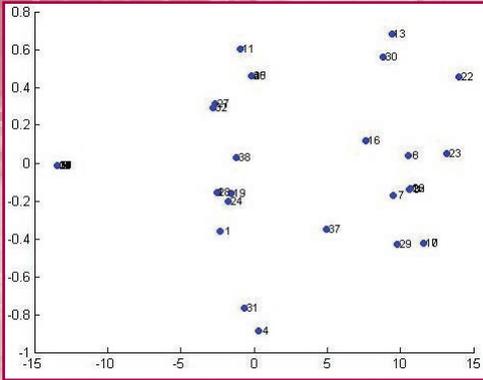


Рис. 2а.
Схемы MDS, позволяющие визуализировать различимость видов (8-канальные данные)

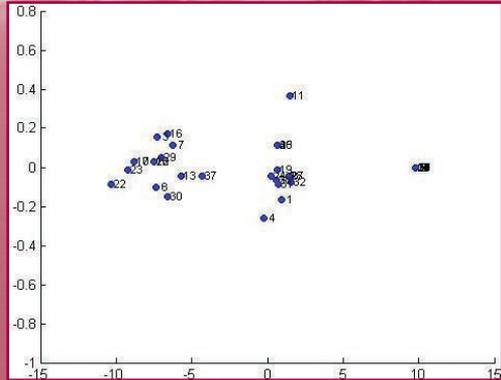


Рис. 2б.
Схемы MDS, позволяющие визуализировать различимость видов (4-канальные данные)

Многомерное масштабирование (MDS)

Многомерное масштабирование – это эффективный метод визуализации информации. Для каждого из 40 видов деревьев была определена спектральная кривая путем проведения средней линии для экспериментальных образцов в каждом канале.

На основе этих спектральных кривых была вычислена средняя разница энергетической яркости в различных диапазонах между парой пород и создана матрица расстояний 40х40 для 40 различных пород в исследуемой области. Эта матрица позволяет интерпретировать расхождения характеристик между породами. После этого были выделены характеристические числа и характеристические векторы матрицы расстояний.

Первые два характеристических вектора использовались для очерчивания двумерной схемы, демонстрирующей различимость между видами, на основе использования 8 каналов (рис. 2а). Затем процесс был повторен для данных с 4 стандартными каналами (синий, зеленый, красный, NIR1), и аналогичным образом была вычерчена другая схема (рис. 2б).

При визуальном сравнении схем MDS для данных с 8 диапазонами и данных с 4 диапазонами можно заметить, что в случае с 4 дополнительными диапазонами породы лучше отделяются друг от друга (большее расстояние

между породами), в то время, для данных с 4 диапазонами породы располагаются плотно друг к другу (местами практически неотделимы).

Многоуровневая объектоориентированная иерархическая классификация

С целью оптимального использования преимуществ данных WorldView-2 был разработан классификатор, специально предназначенный для обработки 8-канальных данных. Для снимков с высоким пространственным разрешением объектоориентированный метод, использующий группы пикселей, является более подходящим, чем метод, основанный на отдельных пикселях. Объект может быть определен как группа смежных пикселей, обладающих определенными общими характеристиками. В случае мультиспектральных данных в качестве таких характеристик выступают спектральные значения различных диапазонов и производные данные, которые обычно определяют сходство. Процесс получения таких объектов называют сегментацией. Пиксели могут анализироваться с целью отнесения их как к информационному, так и к спектральному классам, между которыми существует очень тесная взаимосвязь. Поэтому каждый объект, при условии правильного формирования на основе пространственных и спектральных свойств, соотносится только с одним классом ландшафта (здания, дороги и т.д.).

Многоуровневая объектноориентированная иерархическая классификация реализуется в первую очередь с помощью алгоритма сегментации, который выполняется «снизу вверх», начиная с объектов изображения размером в один пиксель, с постепенным сливанием смежных объектов. Основные параметры сегментации, служащие для определения объектов: цвет, форма, гладкость и компактность. Параметр цвета определяет вес, заданный для спектрального компонента при формировании объектов, а параметр формы определяет соответствующий вес, заданный для формы объекта. Параметры гладкости и компактности определяют ровность границ и плотность объектов соответственно.

Размер сегментов сильно зависит от масштаба, который определяет максимально допустимую неоднородность (т.е. максимальные цветовые различия) внутри каждого объекта. Это ключевой критерий, определяющий степень, до которой могут быть слиты объекты, и соответственно определяющий общий размер объектов. Параметр масштаба выражается числом больше нуля, при увеличении этого значения формируются объекты большего размера, обладающие меньшей неоднородностью. Верхний предел заданного масштаба зависит от пространственного разрешения изображения.

Объекты обычно появляются на изображении одновременно на различных уровнях, представляя различные подклассы одной категории в зависимости от уровня скопления. Таким образом, среди классов существует иерархия, которая часто игнорируется в традиционном классификаторе, работающем с единственным фиксированным масштабом. Цель данного исследования состоит в моделировании городского леса в виде сети каскадных структур. Несколько заданных масштабов используются для представления различных уровней этой структуры. Иерархическая структура городского леса, моделируемого в данном исследовании, приведена на рис. 3.

Классы, определяемые на каждом уровне иерархии городских лесов, являются результатом выбора различных параметров масштаба сегментации, а также различных классификаторов. С целью выбора оптимального масштаба для каждого уровня были исследованы и подвергнуты визуальной оценке несколько параметров сегментации. Поскольку каждый уровень обладает уникальными спектральными и пространственными характеристиками, требуется разработка специальной методики, позволяющей использовать характеристики каждого уровня оптимальным образом.

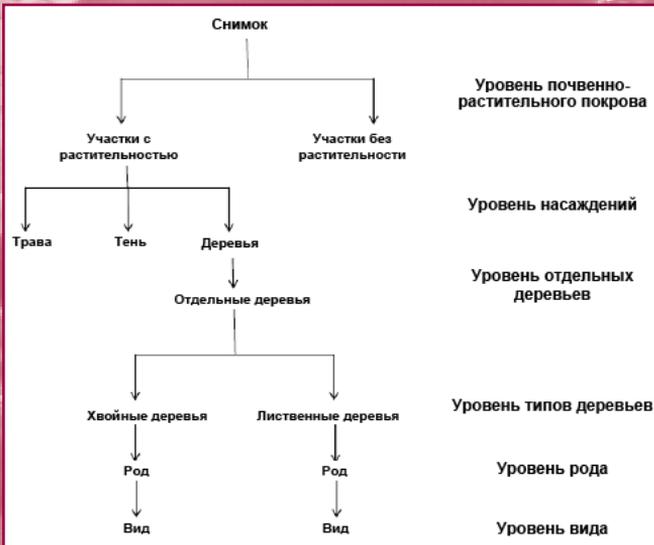


Рис. 3. Объектноориентированная иерархическая система классификации, использованная для городского леса

Уровень почвенно-растительного покрова

Четкое разделение участков без растительности и участков с растительностью обеспечивает вегетационный индекс NDVI. Растительные объекты в исследуемой области характеризуются высокими показателями NDVI. Для поверхности объектов, не относящихся к растительности, характеризующихся слабым отражением в диапазоне NIR, показатель NDVI очень мал.

Уровень насаждений

После маскирования нерелевантных участков, определенных на предыдущем уровне, выполняется более детальная классификация объектов растительности на деревья, траву и тень. Поскольку окончательная цель исследования состоит в идентификации древесных пород, мы отбросили объекты, не относящиеся к деревьям (траву и тени между деревьями). Объекты этого уровня были созданы путем разделения крупных растительных объектов на отдельные части. Тени можно отличить от деревьев и травы по низким значениям пикселей. Спектральные характеристики древостоя и травы практически идентичны, поэтому их очень трудно различить путем использования значений пикселей.

Визуальное исследование показало, что эти два класса сильно отличаются по текстуре. Кроме того, деревья и траву можно также различать по их форме. Поэтому в дополнение к существующим спектральным значениям использовались дополнительные пространственные параметры, предоставляющие контекстную информацию для пикселей.

Уровень отдельных деревьев

Древостой, определенный на предыдущем уровне, был разбит на отдельные деревья. Для такого разбиения был выбран параметр масштаба 35. Объекты диаметром менее 1 м были либо слиты с самым близким объектом по результатам сравнения спектральных значений, либо отброшены, так чтобы для рассмотрения остались только деревья диаметром > 1 м. Все последующие классификации (определение типа, рода и вида) были выполнены в этом же масштабе с использованием классификатора, основанного на критерии $K - S$, представляющего собой непараметрический статистический тест, позволяющий оценить сходство двух наборов образцов путем сравнения их эмпирических распределений кумулятивных вероятностей (ECDF). Каждая порода деревьев имеет конкретную ECDF в каждом спектральном канале, что может быть использовано для дифференциации пород.

Классификация деревьев по типам нацелена на разделение хвойных и лиственных пород деревьев. Для этого был выполнен временной анализ, т.е. сравнение двух наборов данных для облиственного (апрель) и безлиственного (январь) времени года с использованием вегетационного индекса.

Сравнение снимков для двух сезонов показывает, что лиственные деревья имеют высокое значение индекса в облиственный период и низкое значение — в безлиственный период, когда они теряют все или большую часть листьев. Хвойные деревья имеют высокое значение индекса для обоих сезонов. Это различие может быть использовано для разделения деревьев на лиственные и хвойные.

Классификация по родам и видам также была выполнена на уровне отдельных деревьев с помощью классификатора $K - S$. Каждый род/вид образует уникальный пространственный рисунок при различной длине волны, который может быть выделен в ECDF. Поэтому ECDF каждого дерева сравнивается с ECDF известных видов с помощью классификатора $K - S$. Для классификации по родам и видам спектральные характеристики отдельного дерева дают наиболее полезную информацию, и соответственно классификация была выполнена исключительно на основе этих данных.

РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

Поскольку в данном исследовании использовалась иерархическая классификация, при которой ошибка любого уровня неизбежно передается на следующий уровень, точность классификации оценивалась на каждом уровне (табл. 1).

Уровень почвенно-растительного покрова

Сегментация на этом уровне привела к созданию крупных объектов средней площадью 500 кв. м. Точность для класса растительности составила 98%, а для класса участков без растительности — 99%. Незначительные ошибки классификации наблюдались на маленьких объектах, состоящих из смешанных пикселей, вдоль границ между этими двумя классами. Карта классификации для этого уровня представлена на рис. 3а.

Уровень насаждений

Основное внимание на этом уровне было уделено классам травы и древостоя. Карта классификации для этого уровня показана на рис. 3б. Объекты среднего размера пло-

Результаты вычисления точности классификации для каждого уровня

Уровень	Масштаб	Общая точность, %
Уровень почвенно-растительного покрова	150	98,5
Уровень насаждений	50	94,3
Уровень типа деревьев	35	90,5
Уровень рода	35	64,5
Уровень вида	35	62,2

щадью 50 кв. м были сформированы из объектов растительности, маскированных на предыдущем уровне. На этом уровне была получена общая точность 94%. Наблюдались незначительные ошибки классификации в классах древостоя и травы, так как некоторые маленькие деревья имеют очень однородную текстуру, которая воспринимается как трава. Также были отмечены некоторые тривиальные ошибки отнесения теневых объектов к классам деревьев и травы из-за смешанных пикселей на границах.

Судя по точности, достигнутой на предыдущем уровне, имеется 2%-ный шанс того, что пиксель, отнесенный к классу растительности на карте, принадлежит к категории участков без растительности. Эта ошибка может перейти на следующий уровень, что может быть еще одной возможной причиной некоторого снижения точности по сравнению с точностью классификации уровня почвенно-растительного покрова.

Уровень типов деревьев

Очередная сегментация всех объектов уровня древостоя с параметром масштаба 35 привела к созданию объектов средней площадью 5 кв. м, т.е. объектов, представляющих отдельные деревья. На основе полевых данных деревья имеют средний диаметр кроны 2,5 м. Допуская примерно круглую форму кроны, мы получаем среднюю площадь примерно 5 кв. м, что подтверждает соответствие между полевыми данными и сегментированными объектами.

Для вычисления точности классификации на уровне типов деревьев использовались все объекты испытания (охватывающие 138 394 пикселя), выбранные из полевых данных. Район Далласа преимущественно покрыт лиственным лесом, но также имеется некоторое количество хвойных деревьев, принадлежащих к пяти видам, равномерно распределенных по данному району. Соответственно число по-

левых проб для хвойных деревьев было намного меньше по сравнению с листопадными деревьями. На рис. 3в приведена карта классификации лиственных и хвойных деревьев. Карта подтверждает редкое распределение хвойных деревьев по сравнению с листопадными деревьями, что совпадает с результатами полевых исследований. Классификатор K – S, использованный для классификации типов деревьев, позволил достичь достаточно высокой точности – общая точность составила 91%. Точность для лиственных и хвойных деревьев составила 94 и 85% соответственно.

Уровни рода и вида

На родовом уровне классификатор K – S позволил получить общую точность около 65%, что является достаточно высоким показателем для этого уровня. Для трех наиболее распространенных родов деревьев – дуба, ильма и ясеня – точность составила 76, 72 и 70% соответственно. На видовом уровне была получена общая точность 62%.

Поскольку количество родов незначительно отличается от количества видов (34 рода на 40 видов), такое сходство в полученных значениях точности не удивительно. Карта классификации для 10 наиболее распространенных родов представлена на рис. 3г. В целом с учетом очень большого количества родовых и видовых уровней, результат применения классификатора может быть оценен как хороший.

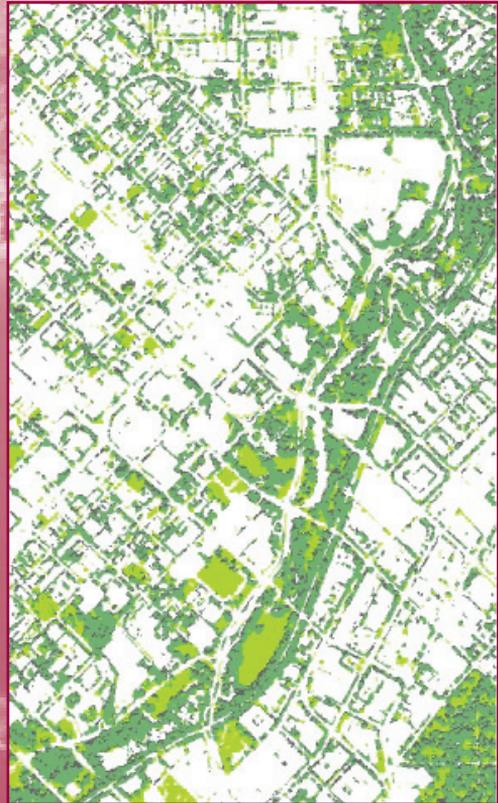
Городские леса заслуживают большого внимания как ценный природный ресурс и важная часть городской структуры. В данной работе были исследованы потенциальные возможности использования 8-канальных снимков, полученных со спутника WorldView-2.

Анализ показал, что использование новых четырех каналов (в особенности крайнего красного и ближнего инфракрасного 2) дает хорошие результаты при решении задач классификации пород деревьев.



■ Vegetation
■ Non-vegetation

Рис. 3а.
Карты классификации на 1-м уровне



■ Shadow
■ Tree-stand
■ Grass/Canopy Gab
■ Tree-stand

Рис. 3б.
Карты классификации на 2-м уровне



Рис. 3в.
Карты классификации на 3-м уровне



Рис. 3г.
Карты классификации на 4-м уровне