

Ф. Кавайяс (F. Cavayas),  
Ю. Рамос (Y. Ramos), А. Бойе (A. Boyer)  
Монреальский университет, кафедра географии (Канада).

# Инвентаризация городских зеленых насаждений и их мониторинг с использованием данных WorldView-2\*

## ВВЕДЕНИЕ

По мере роста городского населения во всем мире все более очевидной становится необходимость разработки эффективных программ по смягчению воздействия климатических изменений и улучшению качества городской среды. Многие исследования подтверждают, что зеленые насаждения в городах, особенно деревья, являются важным элементом таких программ. Для планирования увеличения площади зеленых насаждений необходимо, чтобы специалисты по городской экологии могли иметь точное представление о фактическом распределении растительности, включая ее типы, видовой состав, биомассу и т.д. Однако во многих городах кадастры зеленых насаждений отсутствуют или являются неполными. Там, где такие кадастры существуют, они обычно недостаточно часто обновляются. Кроме того, практически отсутствуют системы контроля условий, в которых находится городская растительность (недостаток воды, вспышки массового размножения насекомых, устойчивость различных видов растений к загрязнению воздуха и т.д.).

Космические снимки могут оказаться очень полезными для ведения городских кадастров зеленых насаждений и создания автоматизированных систем их обновления, а также для контроля растительности. Это особенно важно для крупных мегаполисов, где кадастр охватывает тысячи квадратных километров. Данное исследование проведено для Монреаля – крупнейшего мегаполиса Канады. По очень приблизительной оценке, на его территории, охватывающей примерно 3000 кв. км, произрастает около 30 миллионов деревьев.

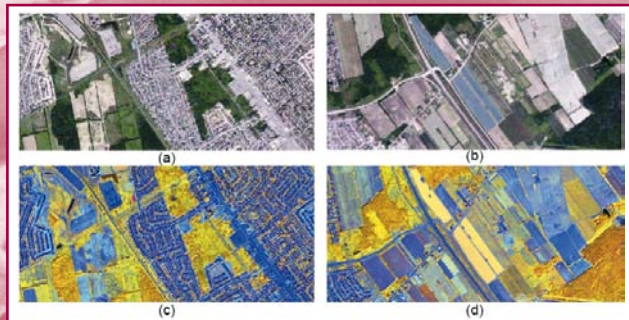


Рис. 1.  
Примеры цветковых композиций, созданных с использованием различных спектральных каналов

\* 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 ([http://www.digitalglobe.com/downloads/8bc/ARTICLE\\_CAVAYAS.pdf](http://www.digitalglobe.com/downloads/8bc/ARTICLE_CAVAYAS.pdf)). Перевод подготовлен к публикации Б.А. Дворкиным (Компания «Совзонд»)

Как показали исследования, для эффективного использования космических снимков в работе с кадастрами растительности они должны обладать рядом характеристик: 1) точность геопозиционирования в диапазоне нескольких метров и менее, особенно в районах плотной застройки; 2) высокое спектральное и радиометрическое разрешение для определения видового состава; 3) хорошие стереоскопические качества для точной оценки биомассы и других структурных параметров, особенно в лесопарковых зонах.

Исследовательские работы проводились по мультиспектральному ортотрансформированному снимку WorldView-2 на часть города Лаваль (пров. Квебек, Канада), полученному 3 июля 2010 г. Кроме того, привлекались и другие источники, в т. ч. топографические карты и карты лесов, а также цифровое ортомозаичное изображение, созданное

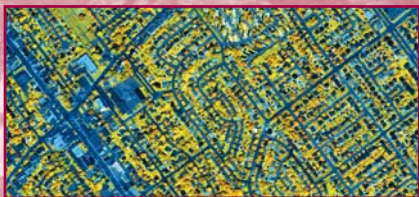


Рис. 2.

Отдельные деревья хорошо различимы внутри жилой зоны; различные цвета деревьев явно указывают на возможность идентификации древесных пород

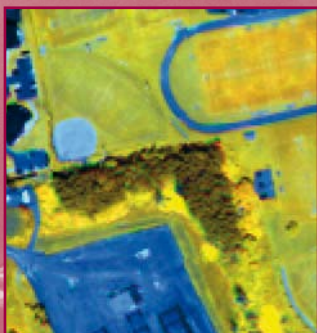


Рис. 3.

Более низкие коэффициенты отражения в инфракрасных областях позволяют легко отличать хвойные деревья от остальных растительных покровов; напротив, кустарники лиственных пород имеют спектральное выражение, схожее с травяными участками (оранжевый оттенок)

на основе цветных аэрофотоснимков, полученных в апреле 2005 г. (разрешение 1 м).

Для того чтобы оценить практическую применимость автоматизированной системы для работы с кадастрами зеленых насаждений, на основе ранее опубликованных результатов с использованием снимков высокого разрешения, была разработана трехэтапная схема. Цель первого этапа (преобразование данных в коэффициенты отражения Земли) состоит в получении точных сигнатур спектра объектов, находящихся на исследуемой территории, с целью оптимального использования потенциальных преимуществ восьмиканальной съемки WorldView-2 (напомним, что спутник ведет съемку в следующих спектральных каналах: фиолетовый или coastal, синий, зеленый, красный, крайний красный или red-edge, ближний ИК-1, ближний ИК-2). Второй этап – разделение участков, покрытых зелеными насаждениями, от территорий, не покрытых растительностью, водных объектов и т. д. Многие исследователи предлагают использовать вегетационные индексы как средство дифференциации растительного покрова от остальных территорий. Этот метод рассмотрен и в данном исследовании. После определения зон растительности можно разделить их на «сегменты растительности» путем группирования соответствующих пикселей. Для каждого растрового многоугольника рассчитываются различные геометрические атрибуты (площадь, периметр, плотность и т. д.). Затем геометрические характеристики наряду со спектральными и текстурными атрибутами, рассчитанными внутри каждого многоугольника, анализируются с целью разбиения этих многоугольников (или частей многоугольников) на несколько классов, включая лесные зоны, кусты и травяную растительность. Результаты классификации могут быть подвергнуты дальнейшему анализу – с использованием панхроматических данных – для идентификации древесных пород и структурных параметров растительного покрова. Полезность спектральных и текстурных характеристик, выделенных из мультиспектральных данных, анализируется в данном исследовании.

## АНАЛИЗ И РЕЗУЛЬТАТЫ

### Этап 1:

#### Преобразование данных в коэффициенты отражения Земли

Преобразование цифровых данных в коэффициенты отражения Земли состоит из трех шагов:

(1) преобразование цифровых данных в коэффициенты отражения верхних слоев атмосферы;





Рис. 4.

Цветовой композит, полученный путем комбинирования NDVI, рассчитанного для крайнего красного канала (красный цвет на рисунке), канала ближнего ИК-1 (зеленый цвет на рисунке) и канала ближнего ИК-2 (синий цвет на рисунке); объяснения приведены ниже



Рис. 5.

Исходное изображение (а) и идентификация участков с растительным покровом на основе трех NDVI (б; зоны без растительности маскированы)

(2) оценка атмосферных помех, включенная в коэффициенты отражения TOA, основанная на упрощенном решении уравнения проникновения излучения через атмосферу, структура и состав которой в момент съемки описываются определенной моделью;

(3) устранение атмосферных помех и вычисление коэффициентов отражения земной поверхности.

Расчеты показали, что состав атмосферы влияет на крайний красный канал и еще больше – на ближний ИК-2, в то же время, как и ожидалось, эффекты рассеивания более всего влияют на фиолетовый канал. В видимых областях, при низких коэффициентах отражения растительности, планетарный коэффициент отражения завышает коэффициент отражения земной поверхности вследствие совокупных атмосферных эффектов ( $R_{atm}$ ). В инфракрасных зонах, при высоких коэффициентах отражения растительности, атмосферное пропускание (мультипликативное воздействие) приводит к занижению коэффициента отражения. Таким образом, важно скорректировать атмосферные эффекты перед обработкой снимка. Как показано на рис. 3, даже при достаточно условных предположениях о поведении атмосферы и поверхностного отражения полученные коэффициенты отражения поверхности для различных объектов вполне точно отражают ожидаемое спектральное поведение, зарегистрированное при наземных измерениях.

Использование значений коэффициента отражения позволяет достичь улучшенного баланса цветов в случаях, когда для визуализации создается цветовой композит. Различные эксперименты со снимками в коэффициентах отражения показали, что можно добиться более естественного цвета для менее насыщенного зеленого оттенка путем замены красного канала желтым (рис. 1а–б). Кроме того, удалось получить очень хорошее выделение растительного покрова путем объединения ближнего ИК-1, крайнего красного и красного каналов (рис. 4с–д). В этом композите желтый цвет, отображающий различные растительные покровы, контрастирует с синим, отображающим свободные от растительности территории. Используя этот цветовой композит, можно легко отличать отдельные деревья различных пород внутри жилой зоны (рис. 2), а также участки хвойного леса от других растительных насаждений (рис. 3).

### Этап 2:

#### Распознавание растительного покрова

Обычно для выделения на снимках пикселей, отображающих растительный покров, используются вегетационные индексы, такие, как NDVI:

Снимки WorldView-2 позволяют рассчитать индексы NDVI в спектральных каналах ближний ИК-1 или ближний ИК-2. Однако, анализируя доступные данные, мы обнаружили, что некоторые искусственные объекты имеют NDVI, схожий с растительным покровом. Некоторые объекты хорошо отличаются от растительного покрова по индексу NDVI, вычисленному на основе коэффициента отражения в крайнем красном канале. Другие объекты, напротив, имеют значения NDVI (крайний красный), схожие с NDVI растительного покрова, но их удается отличить с помощью NDVI, вычисленного для каналов ближний ИК-1 или ближний ИК-2. Пиксели в последнем случае проявляются, как правило, на краях крыш зданий или затененных областей; по нашему мнению, это происходит из-за смещения исходных спектральных полос. Таким образом, совместное использование трех индексов NDVI обеспечивает более точное разделение растительного покрова. На рис. 4 показан цветовой композит трех NDVI для части рассматриваемого изображения. Участки серых и черных оттенков представляют не занятую растительностью землю, а белые участки – пиксели с ценным растительным покровом. Примеры объектов, неотличимых от растительного покрова при любом NDVI, выделены кругами различных цветов. Стоит отметить, что это сочетание NDVI обеспечивает очень хорошее выделение заболоченных мест (светло-коричневый цвет), а также хорошо обозначает присутствие водных растений (красновато-коричневый цвет).

Используя ряд пороговых значений, адаптированных к каждому NDVI, можно отделить участки с растительным покровом от других территорий с достаточно высокой точностью, как показано на рис. 5.

### Этап 3:

#### Классификация растительного покрова

Эксперименты, проведенные в данной работе, включают различные тесты со стандартными классификациями растительности. Были использованы спектральные и текстурные параметры. Текстура является важным элементом для дифференциации различных пород деревьев на снимках высокого разрешения. В настоящем исследовании использовалась концепция выделения текстур на основе использования двух и более спектральных каналов, а не одного, как обычно. Этот принцип более успешно применяется для мультиспектральных изображений, где учитываются не только изменения «интенсивности», но также и изменения «оттенка».





Рис. 6.  
 а) нормальный цветовой композит; б) цветовой композит каналов ближний ИК-2, красный и зеленый после декорреляции

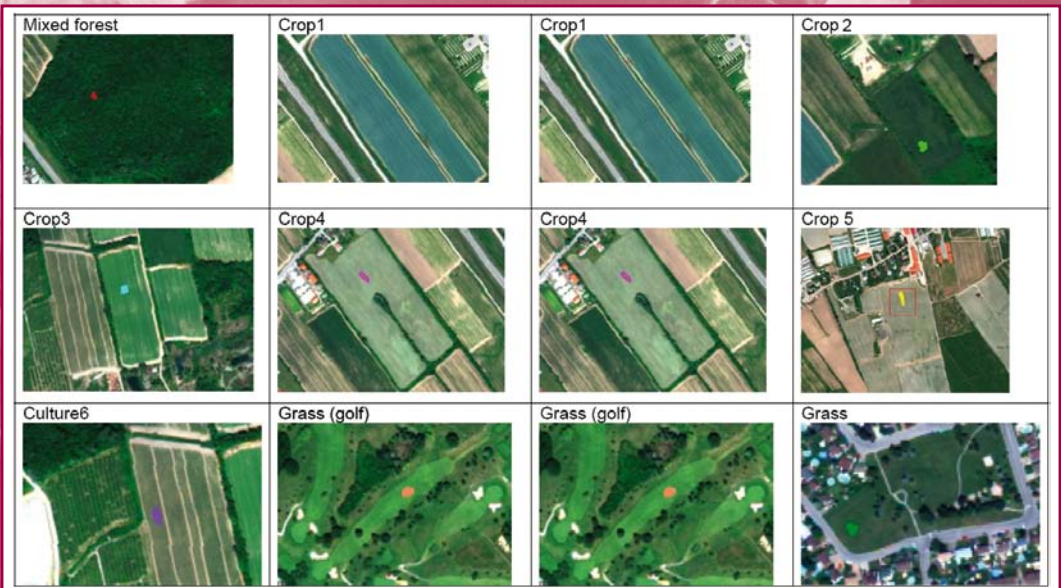


Рис. 7.  
 Выбор участка для эксперимента





Рис. 8.

- а) классификация по принципу максимального правдоподобия (ML) с использованием набора из 8 спектральных каналов;  
 б) отображение каналов ближний ИК-2, красный и зеленый после проведения декорреляции;  
 в) отображение в естественных цветах

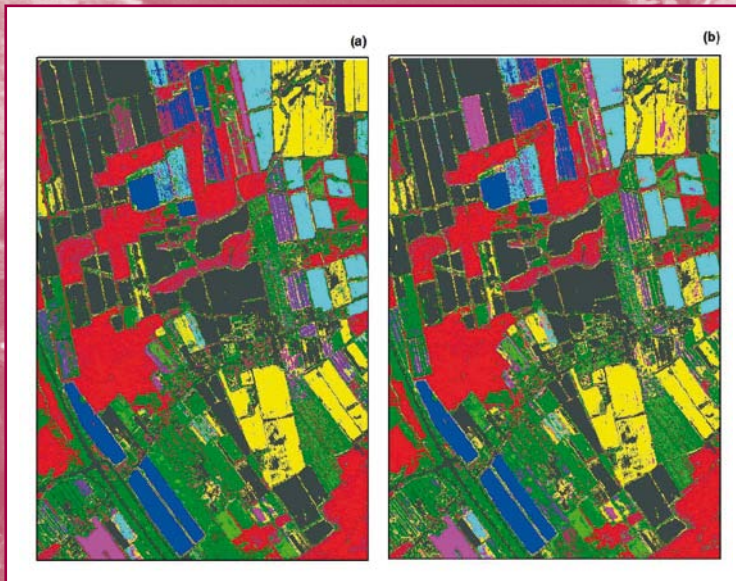


Рис. 9.

- а) классификация по принципу максимального правдоподобия (ML) с использованием набора из 8 спектральных каналов;  
 б) классификация по принципу ML с использованием стандартного набора из 4 каналов синий, зеленый, красный, ближний ИК-1

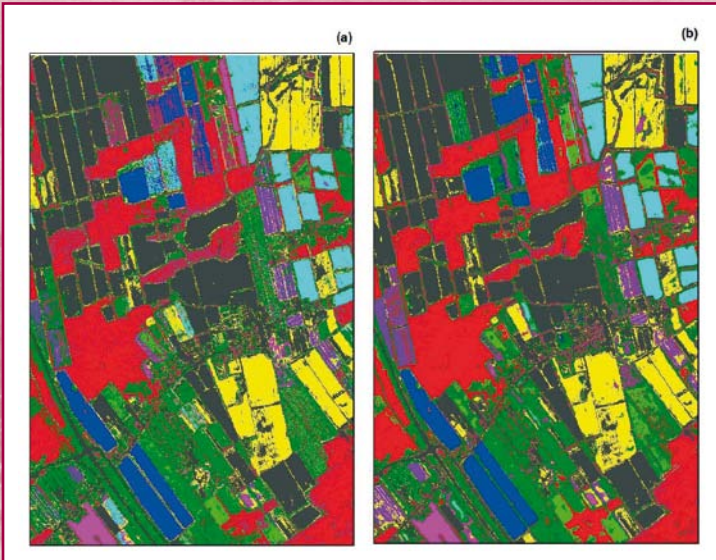


Рис. 10.

а) классификация по принципу ML с использованием набора из 8 спектральных каналов;  
 б) классификация по принципу ML с использованием набора из 8 диапазонов и текстурного канала (контрастность; красный и крайний красный каналы)

Для выделения текстурных характеристик используют обобщенные матрицы смежности. В стандартном случае матрицы смежности создаются путем вычисления частоты смежности пар значений пикселей, разделенных заданным вектором (расстояние, ориентация) в «скользящем окне». В общем случае (два канала) пары значений создаются при одновременном исследовании двух различных спектральных каналов.

Для лучшего понимания эффективности использования новых спектральных каналов WorldView-2, а также цветных текстурных изображений был выполнен ряд автоматических классификаций (на основе принципа максимального правдоподобия). Для этих экспериментов был выбран ряд экспериментальных участков с различными типами растительного покрова (рис. 6). При выборе участков мы обнаружили, что использование метода декорреляции в целях визуализации значительно облегчает решение этой задачи. На рис. 6 приведен соответствующий пример.

На рис. 7-10 показаны некоторые результаты экспериментов по классификации. Как видно на рис. 8, хорошо идентифицируются отдельные деревья, тем не менее присутствует некоторое смешение классов, в особенности сельскохозяйственных культур и газонов. До-

полнительные спектральные полосы не оказывают заметного влияния на результаты классификации по сравнению со стандартным набором (рис. 9). Это указывает на то, что на снимках WorldView-2 высока избыточность спектральных каналов. Наконец, на рис. 10 заметно, что дополнительный текстурный канал оказывает влияние на однородность тематических классов.

### ПРЕДВАРИТЕЛЬНЫЕ ВЫВОДЫ

Эксперименты, выполненные с использованием доступных снимков WorldView-2, доказали целесообразность применения автоматической системы для работы с кадастрами зеленых насаждений в урбанизированных зонах. Необходимо провести дальнейшее исследование для улучшения радиометрических качеств снимков и для разработки системы, использующей средства и методы искусственного интеллекта, умеющей интерпретировать значения различных характеристик, выделенных по космическим снимкам. Простые методы малоприменимы для классификации разнообразных растительных покровов и разнообразных условий окружающей среды, особенно в городских зонах плотной застройки.