## Некоторые приложения сегментации снимков Д33

## Е.С. Иванов

Институт программных систем им. А.К. Айламазяна РАН Переславль-Залесский, 152020, Россия E-mail: egor.s.ivanov@gmail.com

Работа посвящена сегментации аэрокосмических мультиспектральных снимков, полученных при дистанционном зондировании Земли, и обоснованию необходимости решения задачи сегментации снимков. В статье дается понятие сегментации изображений. Приведены примеры наиболее распространенных прикладных задач, в которых можно рассматривать сегментацию изображений не только как целевую проблему, но и как вспомогательный шаг, результаты которого значительно снижают трудозатраты и упрощают последующее решение поставленных задач. В статье представлены три наиболее распространенных подхода к решению проблемы сегментации изображений: пороговая сегментация, сегментация путем наращивания областей и путем выделения границ с приведением примеров результатов работы этих методов. Освещены современные развивающиеся методы, их особенности и преимущества и приведены примеры работы этих алгоритмов. Рассмотрены понятия дистанционного зондирования Земли и мультиспектральных снимков, методы зондирования земной поверхности. Описаны каналы мультиспектральных снимков и информация, которая в них содержится. Рассмотрены подходы к решению ряда задач с использованием данных из отдельных каналов или их различных комбинаций. Обосновано преимущество использования мультиспектральных снимков по сравнению с использованием привычным RGB-изображений для решений важных прикладных задач.

Ключевые слова: сегментация изображений, дистанционное зондирование, компьютерное зрение, обработка изображений, мультиспектральные снимки

Одобрена к печати: 13.12.2015 DOI: 10.21046/2070-7401-2016-13-1-105-116

## Введение

В настоящее время все больше и больше возрастает интерес к обработке данных, полученных со спутников дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ). Эти данные могут использоваться для решения самых различных задач:

- мониторинг состояния почвы, водоемов и растительности;
- выявление очагов лесных пожаров;
- мониторинг и оценка эффективности лесовосстановительной деятельности;
- контроль природопользования (вырубки леса, строительство карьеров, незаконные свалки, оценка рациональности при добыче природных ресурсов и пр.);
- создание геокарт;
- инвентаризация объектов на охраняемых территориях;
- мониторинг строительных объектов и пр.

Различные методы обработки снимков позволяют ускорить решение той или иной проблемы, а в некоторых случаях полностью автоматизируют этот процесс. Например, решение задачи инвентаризации можно свести к решению задачи поиска и распознавания объектов на изображении. Задачу контроля вырубки лесов можно свести к задаче сравнения площадей лесных массивов, для решения которой нужно автоматическое выделение лесов на изображении, что можно сделать с помощью методов сегментации.

Сегментация изображения – процесс его обработки, в результате которого получается разбиение на множество сегментов (называемых суперпикселями), однородных по некоторому признаку. Обычно такими признаками являются визуальные характеристики, чаще всего – цвет. Предполагается, что сегменты на итоговом изображении соответствуют объектам, а границы сегментов – границам объектов. В результате сегментации последующий анализ изображения происходит не уровне пискселей, а на уровне выделенных суперпикселей, то есть на уровне объектов.

#### Мультиспектральные снимки

При изучении земной поверхности ученые все чаще используют снимки, на которых присутствуют данные не только в видимом диапазоне, но и данные в диапазонах, которые визуально человек не может заметить. Снимки, на которых помимо трех основных каналов (RGB) присутствуют дополнительные, называются мультиспектральными.

Дистанционное зондирование Земли – наблюдение поверхности Земли авиационными и космическими средствами, оснащенными различными видами съемочной аппаратуры. Рабочий диапазон длин волн, принимаемых съемочной аппаратурой, составляет от долей микрометра (видимое оптическое излучение) до метров (радиоволны). Методы ДЗЗ могут быть пассивные, использующие естественное отраженное или вторичное тепловое излучение объектов, обусловленное солнечной радиацией, и активные – использующие вынужденное излучение объектов, инициированное искусственным источником направленного действия. Возможность идентификации и классификации объектов основывается на том, что объекты разных типов – горные породы, почвы, вода, растительность и т.д. – по-разному отражают и поглощают электромагнитное излучение в том или ином диапазоне длин волн. Данные ДЗЗ, полученные с космического аппарата, характеризуются большой степенью зависимости от прозрачности атмосферы (Дистанционное зондирование Земли...).

Для обработки невидимых каналов есть два подхода. Первый заключается в том, что данные с этих каналов могут обрабатываться в чистом виде, без преобразования в видимый спектр. Второй подход заключается в том, что невидимые каналы преобразуются в видимые. Можно создавать новое RGB-изображение (псевдоцветное изображение), либо изменять интенсивность видимых каналов на исходном. В результате на новом изображении пользователь может самостоятельно оценить нужные ему данные. Такое преобразование может использоваться как для отдельного канала, так и для нескольких каналов одновременно.

При комбинировании тех или иных каналов можно получить результаты, применение которым можно найти в самых различных областях. На полученном изображении можно узнать состав горных пород, анализ влажности почвы, состояние атмосферы, отражение состояния растительности, состояние водоемов, заражение сельскохозяйственных посевов вредителями и пр. (Мультиспектральные данные ДЗЗ...). В результате для решения подобных задач были разработаны специальные вегетационные индексы, использующие невидимые каналы. Например, в силу особенностей отражения света хлорофиллом с поверхности растений в красном и ближнем инфракрасном диапазонах, эти каналы широко используются при анализе растительного покрова. Одним из наиболее используемых индексов для выявлении состояния растительности является NDVI – нормализованный разностный вегетационный индекс. Данный индекс может принимать значения от от -1 до 1, причем для растительности значения этого индекса всегда положительные. Данные красного и коротковолнового инфракрасного каналов могут применяться для определения влажности поверхности Земли с использованием индекса NDWI – нормализованный разностный водный индекс. Данный индекс также принимает значения от -1 до 1. Значениям индекса, меньшим или равным 0, соответствуют открытые водоемы. Положительным значениям – почва и растения. Эти же каналы используются при вычислении индекса NDSI – нормализованный разностный снежный индекс. Значения индекса > 0,4 соответствуют территориям, покрытым снегом (Жиленев, 2009; Черепанов, 2011; Gao, 1996).

В *табл.* 1 приведены примеры использования каналов мультиспектральных снимков (Жиленев, 2009; Мультиспектральные данные ДЗЗ...).

Наименование спектрального канала и длина волны, мкм (µт)	Применение спутниковой информации в дистанционном зондировании Земли и других приложениях
Видимый сине- фиолетовый 0,42–0,55	Получаемые данные используются для океанографических приложений и проведения атмосферных коррекций данных ДЗЗ, в частности, при вычислении некоторых индексов озелененности.
Видимый синий 0,45–0,52	Зона предназначена для отображения побережий, батиметрии, наносов; дифференциации грунта от растительности и лиственной от хвойной флоры, картографирования типов леса, обнаружения искусственных сооружений. Хорошо фрагментируются структурные горные породы (например, сланцы, фосфаты, эвопориты, эвопораты).
Видимый зеленый 0,52–0,60	Зона соответствует максимальному коэффициенту отражения зеленой (здоровой) растительности и используется для таксации леса. Также используется для составления карт концентрации наносов и осадков в мутных водах.
Видимый красный 0,63–0,69	Зона нужна для того, чтобы различать множество разновидностей растений, так как содержит полосу поглощения хлорофилла. Также используется для определения границ почв и геологического оконтуривания (залежей, рудного тела, нефтяных полей).
Ближний инфракрасный 0,76–0,90	Зона особенно чувствительна к количеству вегетационной биомассы. Это полезно для идентификации почв, оценки урожайности, а также для определения береговых линий водных объектов на местности. Растительность, загрязненная нефтепродуктами, может также показать измеримое смещение на «красной границе».

Таблица 1. Спектральные каналы и область их применения

Коротковолновый инфракрасный 1,55–1,75	Зона чувствительна к содержанию воды в растительности и почвах, оценка которого является полезной в стадии плодоношения изучения засухи и исследований здоровья растений. В этом спектре можно отличить облака от снега и льда.
Тепловой инфракрасный 10,40–12,50	Используется для определения температуры подстилающей поверхности, интенсивности теплоты объектов. Может также использоваться, чтобы обнаруживать геотермальную активность.
Тепловой ИК участок, Коротковолновый инфракрасный 2,08–2,35	В данной зоне спектра богатые кремнием материалы, пыль в воздухе и оголенные почвы часто дают относительно высокий сигнал. Зона важна для выделения границ почв, а также степени увлажненности почв и растительности.

## Методы сегментации изображений

Большинство алгоритмов сегментации, обрабатывающих RGB-изображения, являются модификациями одного из трех основных методов: пороговая сегментация, наращивание областей и выделение границ.

Первый подход заключается в том, что пиксели объединяются в группы по яркостному признаку. Если яркость пикселя находится в заданных пределах, то пиксель относится к заданному классу. Данные границы могут как задаваться, так и вычисляться исходя из особенностей обрабатываемого изображения. Бинаризация изображения является частным случаем пороговой сегментации. На *рис. 1* приведен результат обработки изображения пороговой сегментацией, где количество выделяемых сегментов равно двум. Можно считать, что на полученном изображении белым цветом выделены пустынные участки, а черным – водоемы, растительность, а также горные породы



Рис. 1. Исходное изображение (слева) и изображение, полученное в результате обработки пороговой сегментацией (справа)

При сегментации путем наращивания областей изначально выбирается стартовый пиксель. Рассматриваются его соседние пиксели и производится анализ их однородности, на основании которого принимается решение о включении заданного пикселя в тот или иной сегмент или о создании нового. Таким образом, конечный результат сегментации получается через сращивание пикселей в отдельные сегменты. Часто после объединения полученные сегменты проверяются на однородность и, в случае неоднородности области, она разбивается на более мелкие до тех пор, пока каждый из сегментов не будет удовлетворять критерию однородности. Одним из наиболее популярных алгоритмов, используемых в этом подходе, является алгоритм k-средних. Заключается он в том, что сначала выбираются центральные пиксели каждого объекта (кластера), а затем происходит наращивание областей на эти пиксели. Действие алгоритма таково, что он стремится минимизировать суммарное квадратичное отклонение точек кластеров от центров этих кластеров. Это итеративный алгоритм, который делит данное множество пикселей на k кластеров, точки которых являются максимально приближенными к их центрам, а сама кластеризация происходит за счет смещения этих же центров (Ту, Гонсалес, 1978). Пример обработки изображения путем наращивания областей показан на рис. 2. На исходном снимке были выделены участки 5 типов, на которые впоследствии происходило наращивание областей.



Рис. 2. Результат обработки изображения путем наращивания областей

При сегментации через выделение границ используется оператор градиента. Затем происходит разделение по порогу. Граничные пиксели, полученные на предыдущих шагах, соединяются в замкнутые кривые, которые и можно считать границами сегментов (областей). На *рис. 3* (слева) представлен результат выделения границ методом Собеля. Затем полученное изображение прошло постобработку: оно было нормализовано и, с целью устранения избыточной сегментации, бинаризовано. Справа на *рис. 3* белым цветом показаны границы сегментов. Даже учитывая тот факт, что задача обнаружения границ на изображении достаточно хорошо освещена в современной технической литературе, она все же до сих пор остается достаточно трудоемкой, так как качественное выделение границ всегда зависит от множества влияющих на результат факторов (Muthukrishnan, Radha, 2011). Как видно на изображении, найденные границы часто разрываются и получить отдельный регион становится невозможно. Таким образом, подобный подход не всегда дает желаемый результат и требует последующей доработки со стороны пользователя: необходимо устранить разрывы, что само по себе является отдельной задачей.



Рис. 3. Результат выделения границ методом Собеля (слева) и результат постоработки (справа)

Перечисленные подходы сегментации изображений активно расширяются, дорабатываются. Строятся новые метрики, определяющие однородность пикселей (или их групп), разрабатываются методы, которые вычисляют схожесть на основе не только яркостных значений отдельного пикселя, но и на основе целых участков снимка, включая текстурную информацию.

Юань, Ванг и Ли представляют метод (Yuan et al., 2014), который использует как информацию яркостных данных, так и текстурную информацию. Для данного участка изображения (окна)  $W^{(\alpha)}$  и набора фильтров  $H_W^{(\alpha)}$  можно вычислить измененное изображение  $W^{(\alpha)}$ . Для изображения  $W^{(\alpha)}$  можно получить соответствующую гистограмму  $H_W^{(\alpha)}$ . Спектральная гистограмма  $H_W$  получена как объединение гистограмм различных фильтров:

$$H_{w} = \frac{1}{|W|} \Big( H_{W}^{(1)}, H_{W}^{(2)}, \dots, H_{W}^{(K)} \Big),$$

где |W| означает мощность. Спектральная гистограмма характеризует как локальные модели через фильтры, так и глобальные модели по гистограмме. Используемые линейные фильтры улучшают пространственные особенности изображения. Для каждого локального пикселя вычисляются спектральные и текстурные особенности с использованием локальных спектральных гистограмм, которые объединяются с гистограммами для всего изображения. Каждый признак рассматривается как линейная комбинация нескольких функций, каждая из которых соответствует сегменту. Сегментации задается оценка комбинированных весов, которые помогают принять решение о включении (исключении) пикселей в тот или иной сегмент. Авторами было показано, что при правильно выбранных фильтрах спектральная гистограмма является достаточным условием для захвата текстуры. Размеры элементов могут быть значительно снижены с помощью подпространства проекции. Алгоритм представлен для автоматического выбора правильных весов, которые не требуют сегментации на нескольких масштабных уровнях.

Для пикселей, расположенных вблизи границ регионов, локальная спектральная гистограмма вычисляется с использованием окна, которое пересекает две области. Эта функция не несет отличительной информации, и, таким образом, соответствующие пиксели трудно правильно классифицировать. Локальная гистограмма подобных пикселей может быть аппроксимирована линейной комбинацией двух гистограмм, представляющих два соседних региона, а сочетание весов соответствуют зоне пересечения в окне. Таким образом, можно присвоить каждый из таких пикселей той области, гистограмма которой имеет больший вес. Фильтр может давать разные результаты на границах области, но он не оказывает существенного влияния на спектральные гистограммы, которые вычислены в точках, далеких от границ. Авторами предложен метод автоматического масштабирования снимков для соответствия текстуре. Результат работы алгоритма представлен на *рис. 4*.



Рис. 4. Результат работы алгоритма сегментации с использованием текстурной информации

Группой авторов был рассмотрен метод сегментации снимков Д33, основанный на структуре квадрантов и графе смежности регионов (Fu et al., 2013). Для того чтобы получить первые результаты сегментации изображения, снимок сначала расщепляется на четыре

области, каждая из которых затем снова делится и т.д. В результате строится структура дерева квадрантов. В этом процессе предлагается усовершенствованный способ быстрого расчета стандартного отклонения изображения, что значительно увеличивает скорость построения дерева квадрантов сегментации со стандартным отклонением критерия. Также авторами было предложено использование пространственной структуры индексации с использованием усовершенствованного кодирования Мортон, что обеспечивает процесс слияния со структурой данных для обработки смежных регионов. Затем, для того чтобы получить окончательный результат сегментации, были сконструированы векторы признаков с использованием как спектральных, так и текстурных факторов, и предложен алгоритм для объединения областей на основе методики смежности графа. Экспериментальные результаты показали, что:

- по сравнению с алгоритмом сдвигом среднего, предложенный метод повышает эффективность в 10 раз;
- по сравнению с другими алгоритмами, значительно улучшена точность сегментации.

Предложенный метод состоит из двух основных этапов: разбиение сверху-вниз, начальная стадия сегментации, и слияние регионов, снизу-вверх. На шаге разбиения также происходит создание пространственной индексации и вычисления графа смежности регионов. Схематически результат полученных квадродеревьев показан на *рис. 5*.



Рис. 5. Схематическое разбиение изображения на квадранты

На втором этапе используется граф смежности для того, чтобы выявить отношения между регионами. В графе каждый из регионов представлен в виде вершины. Если две вершины являются соседними, то они соединены ребрами. Определение сходства (однородности) регионов вычисляется на предыдущем шаге. Слияние происходит между теми смежными регионами, которые являются наиболее однородными. Процесс слияния заканчивается, когда разность необъединенных регионов становится больше заданного порогового значения. Авторы заявляют, что по сравнению с другими алгоритмами, предложенный метод дает более хороший результат, и итоговая неразрывность объектов составляет более 50%. Результат работы алгоритма показан на *рис. 6*.



Рис. 6. Результат работы алгоритма сегментации путем разбиения и слияния квадратнтов с использование графа смежности

Большинство алгоритмов сегментации направлены на трехканальные изображения, что часто не дает желаемого результата. Например, появление избыточной сегментации: участки снимка, находящиеся в тени и на хорошо освещенной поверхности зачастую имеют большое яркостное отличие. Это приводит к разбиению одного элемента на несколько. Вторая проблема, противоположная первой – недостаточная сегментация. Некоторые объекты могут быть объединены на результирующем изображении. Например, зеленый мячик на поле с травой в результате сегментации может не определиться как отдельный объект. Использование дополнительных признаков поможет решить указанные проблемы и улучшить качество анализа изображения.

## Актуальность сегментации мультиспектральных изображений

Однородность регионов в задаче сегментации мультиспектральных снимков может определяться не только по визуальным признакам, но и по качественным: это может быть температура поверхности объекта, характеристика объекта либо его поверхности (вода, растительность, металл, пластмасса и пр) и т.д. Современные методы обработки данных со снимков ДЗЗ позволяют не только охарактеризовать объект (например, растительность), но и классифицировать его (хвойный лес, лиственный лес, кустарники или травы) (Жиленев, 2009). Таким образом, решение задачи сегментации мультиспектральных изображений может применяться в следующих целях:

- выявление загрязненности водоемов (в том числе, выявление нефтяных пятен на поверхности);
- определение пород лесов и их соотношение на заданном участке;
- определение состояния почвы и растительности;
- выявление карьеров, их размеров;
- прогнозирование засух и пр.

При наличии нескольких снимков одного и того же участка, сделанных в разное время, можно отслеживать динамику. Например, изменение размеров площади сегментов, соответствующих нефтяным загрязнениям воды, или изменение площади лесов (может быть как зарастание полей деревьями, так и вырубка). Также в результате сегментации можно выделить те участки, на которых содержание влаги в растениях истощается, что ведет к их засыханию. Это количество трудно определить на глаз, к тому же следует учесть тот факт, что порой сельскохозяйственные площади очень общирные и невозможно осмотреть их полностью.

Своевременное получение нужной информации (загрязненность, заболоченность, пересыхание, опустынивание и пр.) и принятие мер по устранению еще не наступившей проблемы ведет к снижению негативных последствий.

#### Выводы

Задача сегментации изображений является актуальной в области обработки изображений. Решение этой проблемы позволяет ускорить анализ данных, полученных со снимков ДЗЗ. Методы обработки снимков, использующие три спектральных диапазона, в настоящее время имеют широкое распространение. Но использование только трех каналов не всегда может привести к желаемому результату, поскольку на снимках ДЗЗ часто встречаются слабоконтрастные участки. Для успешного решения задачи сегментации требуется формирование новых признаков однородности областей с учетом данных, полученных вне видимого диапазона. При разработке новых методов анализа изображений возможно использование виртуальных аналогов физических методов обработки радиофизических и оптически сигналов и их математических моделей (Ахметшина, 2011). Использование дополнительных каналов улучшает качество анализа, что позволяет выявить проблемы еще до формирования видимых признаков.

Исследования проводились в рамках работ по Договору № 124-ВС06/13/423 «Исследования и разработка архитектурных, аппаратных и программных технических решений и создание экспериментальных средств блочно-параллельной обработки космической информации в высокопроизводительных вычислительных системах с производительностью кластера не менее 400 Гфлопс» (шифр: Мониторинг-СГ-2.5.3.1).

## Литература

- Ахметиина Л.Г., Удовик И.М. Фазовая сегментация мультиспектральных слабоконтрастных изображений // Искусственный интеллект. 2011. №3. С.200–206. URL: http://dspace.nbuv.gov.ua/xmlui/bitstream/han-1. dle/123456789/59854/18-Akhmetshyna.pdf?sequence=3.
- Дистанционное зондирование Земли // АО «Российские Космические Системы». URL: http://www. 2. spacecorp.ru/directions/sensing/.
- Жиленев М.Ю. Обзор применения мультиспектральных данных ДЗЗ и их комбинаций при цифровой обра-ботке // Геоматика. 2009. № 3. С. 56–64. URL: http://geomatica.ru/pdf/2009\_03/2009\_03.pdf. Мультиспектральные данные ДЗЗ и интерпретация комбинаций каналов при цифровой обработке // 3
- 4. MapExpert. URL: http://mapexpert.com.ua/index ru.php?id=12&table=news.
- Ту Дж.Т., Гонсалес Р.С. Принципы распознавания образов. М.: Мир, 1978. 412 с. 5
- Черепанов A.C. Вегетационные индексы // Геоматика. 2011. № 2. С. 98-102. URL: http://geomatica.ru/ pdf/2011\_02/2011\_02.pdf. Gao B.C. NDWI A Normalized Difference Water Index for Remote Sensing of Vegetation Liquid Water From 6
- 7 Space // Remote sensing of environment. 1996. Vol. 58. No. 3. P. 257-266.
- Fu G., Zhao H., Li C., Shi L. Segmentation for High-Resolution Optical Remote Sensing Imagery Using Improved 8 Quadtree and Region Adjacency Graph Technique // Remote Sens. 2013. No. 5. P. 3259–3279. doi:10.3390/ rs5073259. URL: www.mdpi.com/2072-4292/5/7/3259/pdf.
- 9 Muthukrishnan R., Radha M. Edge detection techniques for image segmentation // International Journal of Computer Science & Information Technology (IJCSIT). 2011. Vol. 3. No. 6. P. 259-267. URL: http://airccse.org/
- journal/jcsit/1211csit20.pdf. 10. Yuan J., Wang D., Li R. Remote Sensing Image Segmentation by Combining Spectral and Texture Features // IEEE transactions on geoscience and remote sensing. 2014. Vol. 52. No. 1. URL: http://web.ornl.gov/~jiy/papers/ YWL TGRS12.pdf.

# Some applications of remote sensing image segmentation

## **E.S.** Ivanov

#### Program Systems Institute RAS, Pereslavl-Zalessky 152020, Russia *E-mail: egor.s.ivanov@gmail.com*

This paper is devoted to segmentation methods of remote sensing multispectral images. Examples of the most common applications involving image segmentation are given. Three basic algorithms of image segmentation are described: threshold segmentation, segmentation by building areas, and segmentation by border highlighting. The results of the algorithms, as well as their advantages and drawbacks, are demonstrated. Modern developing methods of image segmentation are also presented, their features, benefits and results are discussed. The paper describes channels of multispectral images and information one can derive by processing data from individual channels or their combinations. It is shown that using multispectral images instead of RGB ones is preferable in many important applications.

Keywords: image segmentation, remote sensing, computer vision, image processing, multispectral images

Accepted: 13.12.2015 DOI: 10.21046/2070-7401-2016-13-1-105-116

#### References

- Ahmetshina L.G., Udovik I.M., Fazovaya segmentatsiya multispektralnyih slabokontrastnyih izobrazheniy (Phase 1. segmentation of low-contrast multispectral images), Iskusstvennyiy intellect, 2011, Vol. 3, pp. 200-206, available at: http://dspace.nbuv.gov.ua/xmlui/bitstream/handle/123456789/59854/18-Akhmetshyna.pdf?sequence=3
- Distantsionnoe zondirovanie Zemli (Remote Sensing of the Earth), JSC Russian Space Systems, available at: 2. http://www.spacecorp.ru/directions/sensing/.
- Zhilenev M.Yu., Obzor primeneniya multispektralnyih dannyih DZZ i ih kombinatsiy pri tsifrovoy obrabotke 3. (Review of the usage of multispectral remote sensing channels and their combination in digital processing), Geomatika, 2009, Vol. 3, pp. 56–64, available at: http://geomatica.ru/pdf/2009 03/2009 03.pdf.
- Multispektralnyie dannyie DZZ i interpretatsiya kombinatsiy kanalov pri tsifrovoy obrabotke (Channels of remote 4 sensing multispectral images and interpretation of their combination in digital processing), MapExpert, available at: http://mapexpert.com.ua/index ru.php?id=12&table=news.

- 5. Tou J.T., Gonzalez R.C., Pattern Recognition Principles, Moscow: Mir, 1978, 412 p.
- 6. Cherepanov A.S., Vegetatsionnie indeksy (Vegetation indices), *Geomatika*, 2011, Vol. 2, pp. 98–102, available at: http://geomatica.ru/pdf/2011\_02/2011\_02.pdf.
- 7. Gao B.C., NDWI A Normalized Difference Water Index for Remote Sensing of Vegetation Liquid Water From Space, *Remote sensing of environment*, 1996, Vol. 58, No. 3. pp. 257–266.
- Fu G., Zhao H., Li C., Shi L., Segmentation for High-Resolution Optical Remote Sensing Imagery Using Improved Quadtree and Region Adjacency Graph Technique, *Remote Sens.*, 2013, Vol. 5, pp. 3259–3279, doi:10.3390/ rs5073259, available at: www.mdpi.com/2072-4292/5/7/3259/pdf.
- 9. Muthukrishnan R., Radha M., Edge detection techniques for image segmentation, *International Journal of Computer Science & Information Technology (IJCSIT)*, 2011, Vol. 3, No. 6, pp. 259–267, available at: http://airccse.org/journal/jcsit/1211csit20.pdf.
- Yuan J., Wang D., Li R., Remote Sensing Image Segmentation by Combining Spectral and Texture Features, IEEE transactions on geoscience and remote sensing, 2014, Vol. 52, No. 1, available at: http://web.ornl.gov/~jiy/ papers/YWL\_TGRS12.pdf.