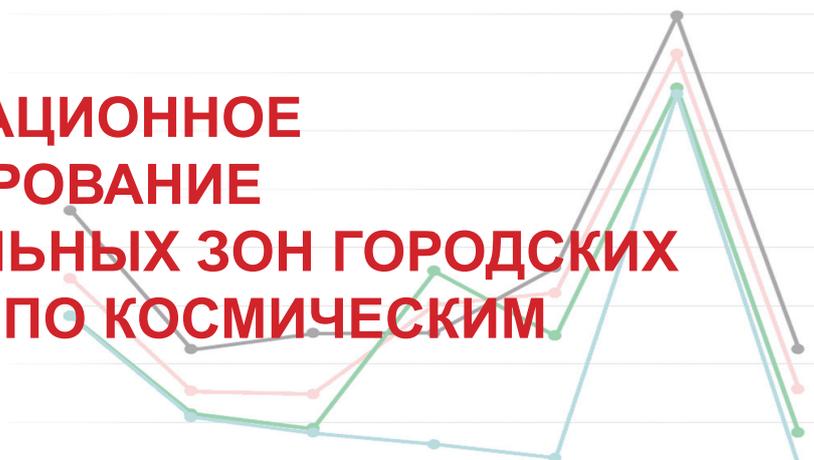


Т.С. Хайбрахманов

ГЕОИНФОРМАЦИОННОЕ КАРТОГРАФИРОВАНИЕ ФУНКЦИОНАЛЬНЫХ ЗОН ГОРОДСКИХ ТЕРРИТОРИЙ ПО КОСМИЧЕСКИМ СНИМКАМ



Введение

Функциональное зонирование городской территории – выделение относительно однородных по природным особенностям и техногенной нагрузке участков застройки – одно из приоритетных направлений в картографировании городской территории. Сегодня это направление картографирования городов является очень актуальным, и существует широкое применение карт функциональных зон в различных отраслях градостроительства и экологии города.

Для принятия обоснованных решений, в том числе и связанных с экологической ситуацией, информация о характере городской застройки должна быть точной, достоверной и актуальной. Долгое время основными источниками такой информации служили данные кадастра, топографические планы городов, различные статистические данные, которые и сейчас считаются самыми надежными. Обновление этих данных, поддержание на современном уровне требовало больших затрат и занимало продолжительное время. По той же причине не очень часто использовались и материалы аэрофотосъемки.

Попытки использовать космические снимки для изучения городских территорий предпринимались и раньше, но эффективность их применения ограничивалась недостаточно высоким пространственным разрешением снимков. Последнее десятилетие характеризуется появлением и все более широким распространением космических снимков с различным пространственным разрешением и типами спектральной аппаратуры. Многие из них обеспечивают регулярное поступление данных с интервалом в несколько дней и даже ежедневно, чем достигается высокая оперативность получения данных. В связи с этим появилась возможность более широко использовать космические снимки для изучения и картографирования городских территорий. Уже накоплен достаточно большой опыт дешифрирования функциональных зон по космическим снимкам.

Ряд исследователей опирается на сочетание методов дешифрирования снимков и геоинформационной обработки данных жилищной статистики [6, 7]. Другие используют методы классификации многозональных изображений для надежного выделения типов использования земель [2, 5, 8]. Интересный подход к выделению функциональных зон представлен в работе американских специалистов [9]. Зонирование городской территории основано на выявлении взаимосвязей различных видов городской застройки с показателем средней суточной температуры поверхности (T_s) и значением вегетационного индекса (NDVI), характеризующего степень озеленения территории. Пространственные вариации соотношения показателя T_s и индекса NDVI служили критерием для выделения зон.

В данной статье на основе опыта исследований, представленных выше, была разработана методика геоинформационного функционального зонирования городских территорий на основе космических изображений. Она опирается на основные методы визуального и автоматизированного дешифрирования снимков, учитывает потенциальные источники данных и характеризует возможности для применения (табл. 1). В качестве методического участка выбрана территория Восточного административного округа Москвы (ВАО), где представлено достаточное разнообразие функциональных зон и статус современного использования земель многократно проверен по надежным источникам и визуальным наблюдениям.

Содержание карт функциональных зон

Содержание карт функциональных зон обычно различается в зависимости от их предназначения. В случае градостроительной тематики обычно рассматриваются дополнительные проектировочные и жилищно-коммунальные характеристики застройки, а при экологических исследованиях часто показывают

Таблица 1

Методика геоинформационного картографирования функциональных зон городских территорий по космическим снимкам

Источники	Основные методы	Возможное использование
<p><i>менее детальные снимки (20-30 м)</i> видимые каналы и БИК: Landsat-5/7/8, SPOT-4/5, UK-DMC тепловой канал: Landsat-5/7/8</p>	<p><i>автоматизированное дешифрирование</i> – классификация с обучающей выборкой по ФЗ – квантование яркостей теплового снимка <i>геоинформационная обработка</i> – векторизация результатов дешифрирования – расчет зональной статистики по кварталам</p>	<p><i>Эколого-географические исследования городской среды:</i> – ландшафтно-геохимическое картографирование; – целевой выбор точек отбора проб; – типология городов по соотношению ФЗ – оперативное картографирование в масштабах 1:100 000 и меньше</p>
<p><i>Высокодетальные снимки (лучше 10 м)</i> видимые каналы, БИК, панхроматический: SPOT-5, QuickBird, Geo-Eye, IKONOS, WorldView и др.</p>	<p><i>автоматизированное дешифрирование</i> – классификация с обучающей выборкой по объектам застройки <i>геоинформационная обработка</i> – расчет запечатанности городских кварталов – вычисление средних критериев запечатанности для ФЗ</p>	<p>– оперативное обновление детальных карт ФЗ; – детальные эколого-географические исследования; – составление карт запечатанности и степени озеленения города</p>
	<p><i>визуальное дешифрирование по прямым и косвенным признакам объектов</i></p>	<p>– градостроительное проектирование; – составление генеральных планов; – самые крупномасштабные эколого-географические исследования</p>

расширенную типологию зеленых насаждений, указывают на характер промышленных зон и отображают антропогенный рельеф территории, выраженный, к примеру, этажностью зданий. Но, как правило, все классификации функциональных зон соответствуют выделению на городской территории четырех основных зон, а различия уже происходят из дополнительного их разделения на подзоны.

К природно-рекреационной зоне относятся территории, занятые городскими парками, лесопарками, бульварами, скверами, а также природным растительным фондом. Растительность является важным элементом в структуре городской застройки и неотъемлемой частью ее экологического каркаса, обеспечивающего комфортность среды обитания человека. Иногда эту зону подразделяют по функциональному назначению озелененных территорий (Курбатова).

Селитебная зона – это комплекс жилых кварталов или микрорайонов, куда входят также здания культурно-просветительного и бытового характера и внутриквартальные зеленые насаждения. По степени влияния на распределение воздушных потоков и переносимых ими загрязняющих веществ она делится на подзоны в зависимости от этажности зданий и структуры застройки кварталов [4].

Производственно-транспортная зона объединяет промышленно-складские и транспортные

объекты. В крупных городах нашей страны часто большинство опасных промышленных предприятий в последние десятилетия были выведены за границы города, поэтому многие производственные корпуса пустуют или заняты торговыми комплексами. По этой причине также в ряде случаев показывают действующие промышленные предприятия и объекты, не используемые по назначению. К транспортной инфраструктуре, кроме линейных объектов (железных дорог, крупных городских автомагистралей, наземных линий метро), также относят автозаправочные станции и гаражи, которые отличаются повышенным содержанием в воздухе загрязняющих веществ.

Отдельной зоной можно назвать совокупность *водных объектов* исследуемой территории, особенно в случае экологических исследований, поскольку в их водах обычно аккумулируются поллютанты в связи с пониженным характером окружающего рельефа тем более, что в условиях городской среды часто встречаются непроточные искусственные водоемы.

Дешифрирование снимков с разрешением 20-30 м

Довольно часто на исследуемые территории может отсутствовать высокодетальная космическая съемка, а ее приобретение может стоить определенных денежных средств либо не обосновано в рамках масштабов карт мельче 1:100 000. В таком случае

можно воспользоваться данными с разрешением 20-30 м, например, Landsat-5/7/8, SPOT-4, UK-DMC-2 и др. При этом данные со спутников Landsat распространяются свободно, и уже накоплен значительный архив съемки.

Часто функциональное зонирование на основе менее детальных данных проводится в рамках эколого-географических исследований, которые обычно ведутся в масштабах мельче 1:100 000 и не требуют кадастровой точности определения границ отдельных зон. В таких изысканиях на первый план выходит изучение соотношения отдельных основных зон города (селитебная, производственно-транспортная, природно-рекреационная и водные объекты) для целей планирования полевого отбора проб, типологии городов по типам использования земель, составления основы для карт других тематик.

Дешифрирование данных такого уровня разрешения преимущественно основано на многозональных изображениях. При более низком разрешении многозональные снимки дают возможность определить свойства объектов, невидимые на черно-белых изображениях. Например, знание спектральных характеристик различных видов растительности позволяет по многозональным снимкам распознавать их видовой состав в городских парках, выделять границы водных объектов, а снимки в тепловом инфракрасном диапазоне характеризуют выбросы промышленных предприятий. На основе многозональных снимков разработано множество алгоритмов автоматизированной обработки изображений, при этом особенно часто используются классификация и квантование яркостей изображения. Такие алгоритмы позволяют экономить время и средства, особенно в случае необходимости составления карт оперативного характера или на труднодоступные территории.

В рамках исследования территории ВАО г. Москвы был проведен анализ нескольких разносезонных снимков Landsat-5 за 2010-2012 гг., который показал, что наилучший результат дешифрирования дают летние снимки, когда вегетирующая растительность проявляет свои спектральные свойства в наибольшей степени. Опытным путем было установлено, что более целесообразно использовать методы контролируемой классификации снимков с формированием обучающей выборки.

Обучающая выборка формировалась по выделенным классам земель, но так как в одной категории могут попадаться объекты других типов земель, то классы выборки всегда пересекаются. Необходимым условием было снизить вероятность такого пересечения. Для этого проводился контроль обучения

по двумерному полю признаков и подбирались различные методы контролируемой классификации.

Классы обучающей выборки соответствуют представленным ранее основным функциональным зонам города, и их спектральные свойства отражены на рис. 1. Как видно из построенного графика, все выделенные классы довольно хорошо различаются по яркостям на снимках в 3, 4, 5 каналах, что в целом позволяет судить о целесообразности и надежности проведения обучения. Поэтому для классификации был составлен многозональный файл снимка, состоящий из этих каналов.

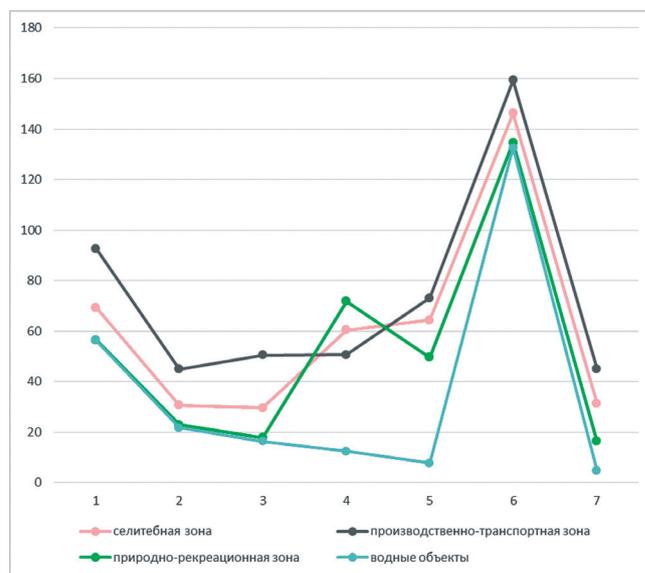


Рис. 1. Спектральные свойства классов обучающей выборки

Среди всех методов классификации нами был выбран метод максимального правдоподобия. В его результатах отсутствуют неклассифицированные пиксели изображения, и к тому же он позволяет задать пороговое расстояние (threshold distance), различные значения которого могут обеспечить генерализацию получаемого результата, исключая небольшие по площади группы пикселей. В нашем случае было подобрано оптимальное расстояние, равное 90-110.

Чтобы сопоставить полученный результат классификации с реальным функциональным зонированием территории, предварительно была составлена соответствующая карта на основе визуального дешифрирования данных QuickBird 0,6 м в ходе ранних исследований территории ВАО г. Москвы [4] (рис. 2).

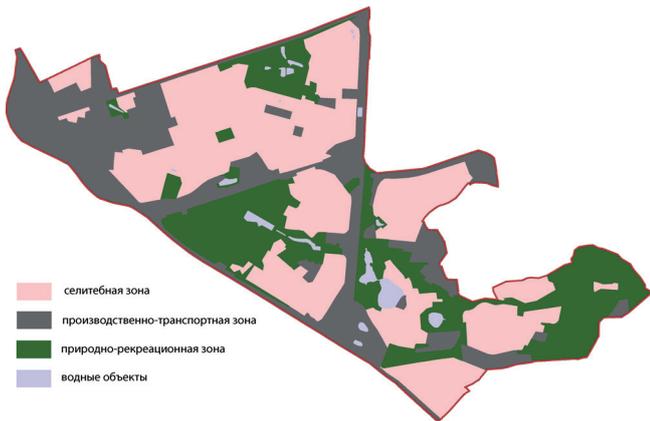


Рис. 2. Карта функциональных зон, составленная путем генерализации детальной карты. М 1:100 000

Как видно из рисунков 2, 3, явные ошибки классификации относятся к жилой зоне, это в первую очередь районы многоэтажного жилого строительства с невысоким озеленением. Кроме того, недостаточно надежно распознаются участки производственно-транспортной зоны. Чтобы испра-

вить эти ошибки можно воспользоваться снимком в тепловом инфракрасном диапазоне.

В тепловом диапазоне (3-1000 мкм) регистрируются температурные различия объектов на земной поверхности. При отсутствии специальной тепловой аэросъемки в качестве источника можно использовать оперативные снимки со спутников Landsat-8 или архивные – Landsat-5, 7.

Каждый крупный город формирует специфический «тепловой остров», что выражается в существенных, до нескольких градусов, различиях в температурах воздуха и поверхности в самом городе и его окрестностях [1]. Действующие промышленные предприятия при этом характеризуются повышенной яркостью на тепловом снимке и в целом обеспечивают эффект «светимости» вокруг своей территории. Чтобы подчеркнуть такой эффект, можно воспользоваться операцией квантования яркостей снимка – сгруппировать яркости в несколько классов. Чаще выбор ступеней выполняется на основе анализа гистограммы распределения яркостей на снимке. Результат такой процедуры представлен на рис. 4.

На приведенном изображении видно, что территория многоэтажной застройки в жилой зоне

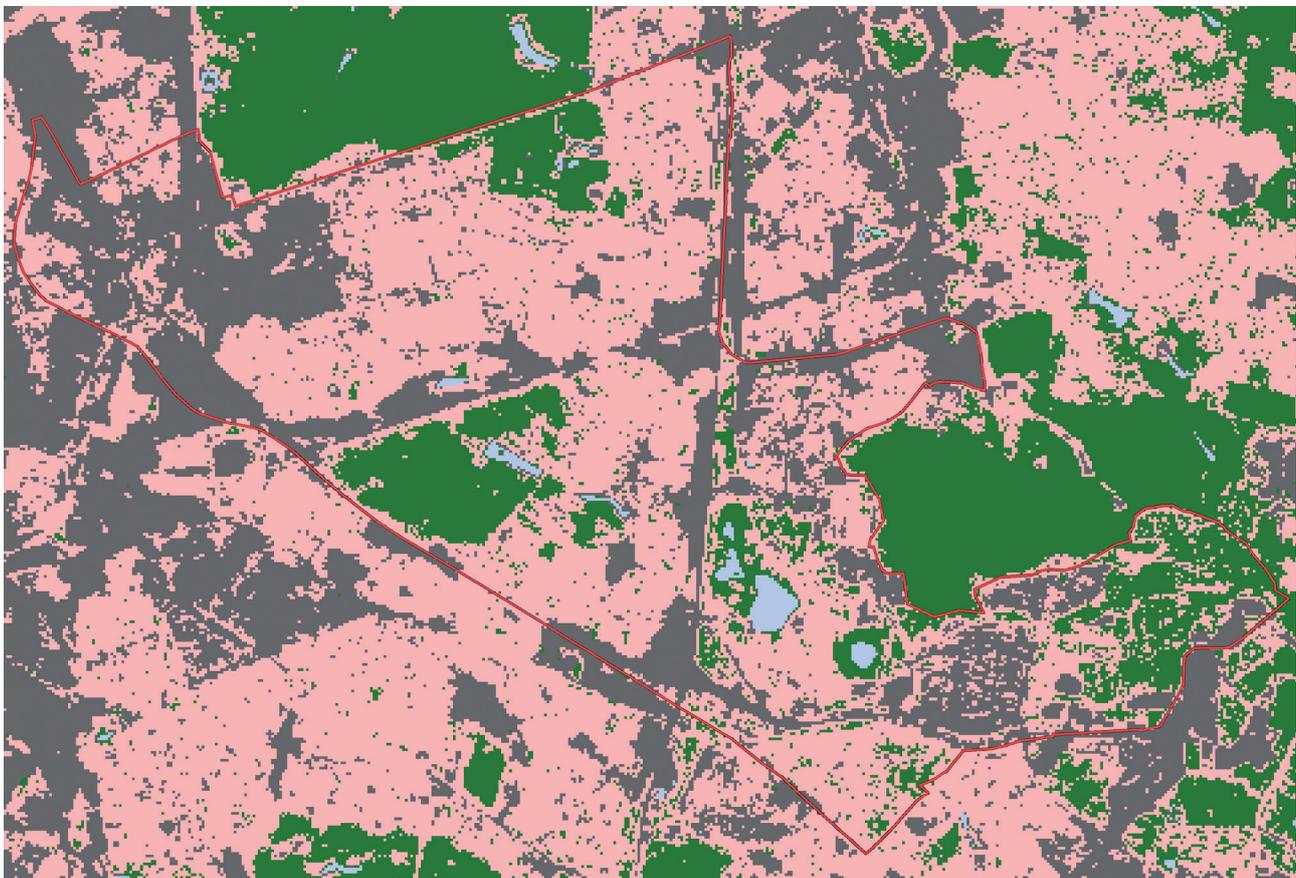


Рис. 3. Результат классификации космического снимка Landsat-5 по методу максимального правдоподобия

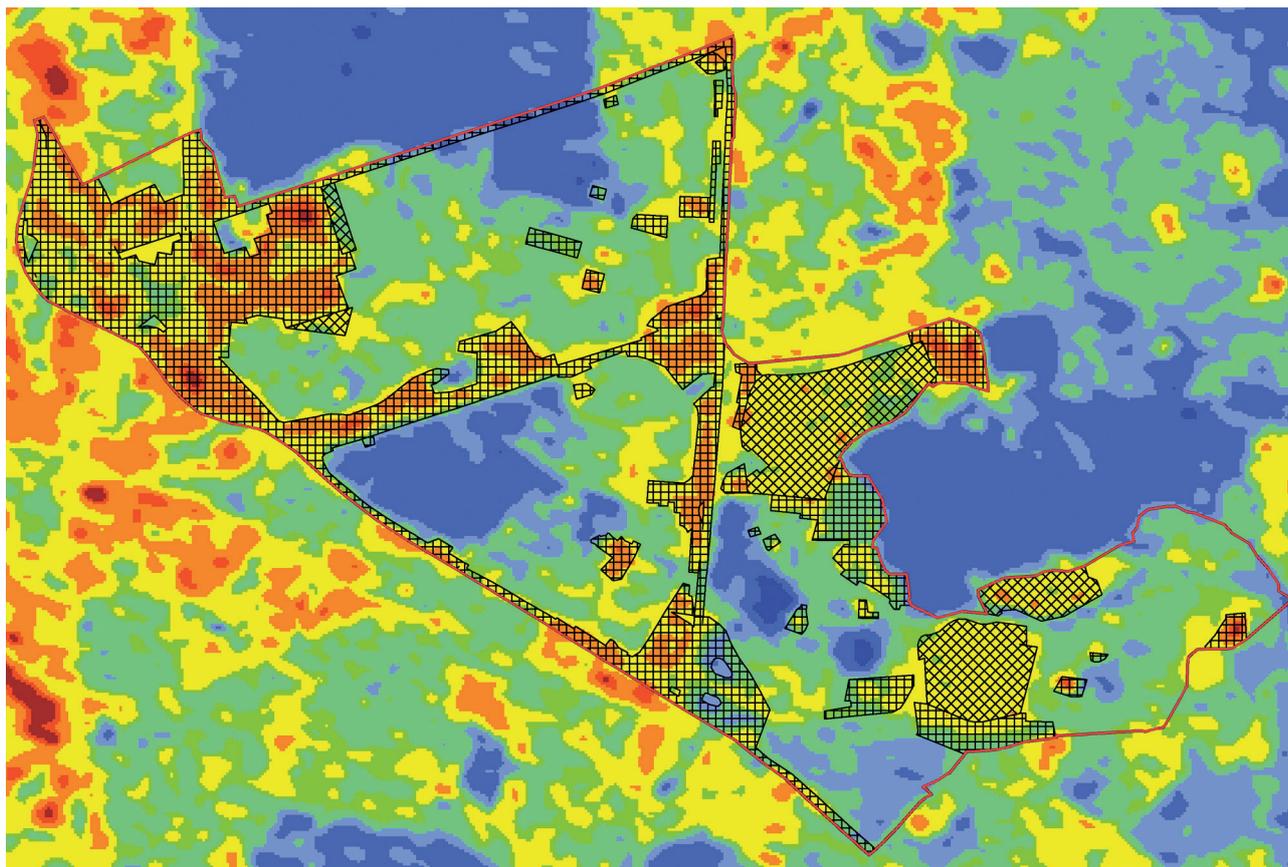


Рис. 4. Квантованный снимок Landsat-5 с наложенными границами производственно-транспортной зоны (прямая штриховка) и участков многоэтажной застройки в селитебной зоне (косая штриховка)

характеризуется повышенным тепловым фоном по сравнению с основными массивам жилого фонда, но в целом для нее не характерны локальные тепловые «островки», занимающие обширные площади производственно-транспортной зоны. Наличие значительной доли таких максимумов в пределах площади квартала указывает на его промышленное назначение или связано с активным транспортным движением на его территории, что позволяет отнести квартал к данной функциональной зоне.

Чтобы совместить полученные ранее результаты классификации многозонального снимка и анализа тепловых изображений, можно воспользоваться операциями геоинформационного анализа, например, рассчитать статистику по преобладающим пикселям применительно к городским кварталам. Сетку кварталов следует получить, проведя предварительную оцифровку улиц и железных дорог, или воспользоваться открытыми базами данных, например OpenStreetMap.

В данном исследовании был проведен расчет статистики с помощью операции Zonal statistics (опция majority), доступной во многих ГИС-пакетах, например в ArcGIS 9.3. Таким образом был получен следующий результат (рис. 5).

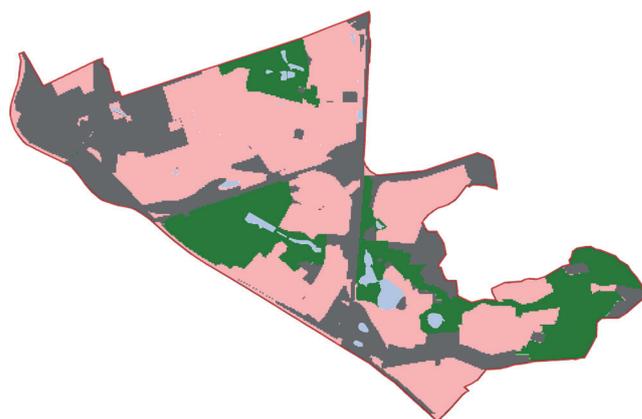


Рис. 5. Функциональные зоны после совмещения результата классификации и квантования яркостей

Для оценки достоверности полученного результата выполнено его сравнение по площади каждой из категорий зонирования с составленной ранее картой (рис. 2). При этом удалось сделать вывод, что площадь функциональных зон исследуемой территории различается на двух изображениях в пределах 5%. С учетом относительно низкой точности

картографирования по снимкам с пространственным разрешением 20-30 м такой результат является вполне приемлемым для эколого-географического исследования городской среды, поскольку он довольно точно передает на карте соотношение отдельных зон города.

Дешифрирование снимков с разрешением лучше 10 м

Такое дешифрирование снимков для функционального зонирования чаще всего основано на визуальных методах. Роль визуального дешифрирования обычно растет вместе с разрешением снимков, ведь только с помощью логических умозаключений о функциях городской территории, основанных на опыте дешифровщика и реализованных посредством компьютерного цифрования границ, можно добиться самого надежного результата. Поэтому эти методы особенно распространены при составлении детальных карт в масштабах крупнее 1:50 000 для нужд градостроительного проектирования.

Визуальное дешифрирование основано на работе с прямыми и косвенными дешифровочными признаками объектов застройки. Для функционального зонирования главную роль играют последние. Только логические знания и отношения между отдельными элементами снимка могут служить надежной информацией о функции участка городской территории. Иными словами прямые дешифровочные признаки одних объектов являются совокупно косвенными признаками других.

Благодаря визуальным методам стандартную классификацию основных функциональных зон можно дополнить множеством других характеристик, важных с точки зрения содержания и предназначения карты. Например, в пределах селитебной зоны можно выделить подзоны по этажности домов, показать типы структуры жилой застройки, ее озеленение и запечатанность; в пределах производственно-транспортной зоны – отразить дополнительно складские территории и гаражные кооперативы; для природно-рекреационной зоны – выделить типы парковых зон, древесную и травянистую растительность и прочее.

Алгоритмы автоматизированного дешифрирования для высокодетальных снимков с разрешением лучше 10 м работают несколько иначе, чем в случае менее детальных данных. Яркая выраженность границ отдельных объектов городской территории с размерами вплоть до малых строений и проездов мешает проводить обучающую выборку контролируемой классификации непосредственно по функциональным зонам, поэтому необходимо делать обучение для самих объектов.

Нами были проведены эксперименты по обработке снимков QuickBird с целью разработать методику, позволяющую сократить объем визуального дешифрирования функциональных зон городской территории. Методика основана на выделении отдельных объектов городской территории, достаточно уверенно распознающихся в результате обработки многозональных снимков (водных объектов, вегетирующей растительности, антропогенных объектов), и последующих расчетах и логических заключениях.

Из-за различий в спектральных характеристиках четыре группы объектов – водные объекты, древесная растительность, травянистая растительность и объекты застройки – достаточно уверенно распознаются в результате обработки многозонального снимка сверхвысокого разрешения (рис. 6).

Водные объекты. Вода обладает свойством поглощать солнечное излучение, вследствие чего ее изображение имеет низкую яркость, особенно в длинноволновых участках спектра. Поэтому поверхность воды – один из наиболее надежно дешифрируемых объектов на многозональных космических снимках.

Вегетирующая растительность наиболее достоверно распознается на многозональных снимках с участием изображений в ближнем инфракрасном участке спектра, где она обладает самыми высокими отражательными свойствами. В результате классификации вполне надежно определяются древесные насаждения и травянистая растительность скверов из-за различий в их спектральных свойствах. Хороший результат выделения зеленых насаждений можно получить путем вычисления вегетационного индекса NDVI, основанного на различиях яркости в ближнем инфракрасном и красном участках спектра.

Объекты застройки. Спектральные свойства большинства городских объектов в мегаполисах и крупных промышленных городах (асфальтовое покрытие улиц и площадей, бетонные крыши и стены зданий) очень схожи, поэтому даже на детальных снимках они классифицируются неуверенно. Еще одно обстоятельство, ухудшающее результаты, – наличие плотной падающей тени от высоких зданий, которая по спектральным характеристикам близка к водным объектам.

Получить более надежные результаты можно несколькими приемами. В обучающую выборку целесообразно включать несколько классов падающей тени, различных по яркости, и несколько классов объектов, закрытых тенью. Опытным путем выявлено, что можно выделить такие классы, как «тень на растительном покрове», «тень на антропогенных сооружениях» и т.п. Чтобы определить, какой объект перекрывает падающая тень, достаточно провести визуальный анализ изображения или привлечь

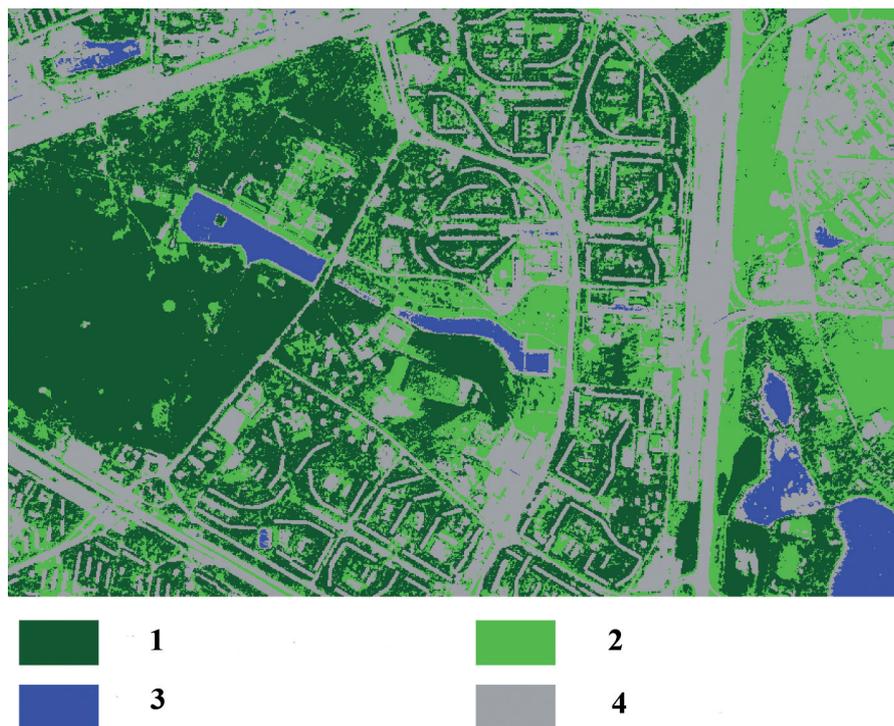


Рис. 6. Фрагмент классифицированного изображения со спутника QuickBird: 1 – древесная растительность, 2 – травянистая растительность, 3 – водные объекты, 4 – объекты застройки

дополнительные снимки, сделанные в другое время суток. В результате можно улучшить результаты классификации.

Соотношение площадей или числа пикселей отдельных классов объектов позволяет рассчитать ряд важных характеристик. Например, запечатанность участка городской территории есть отношение площади под асфальтобетонными покрытиями, зданиями, сооружениями к общей площади исследуемого участка. Аналогично определяется и степень озеленения как отношение озелененных территорий к общей площади участка. Для городских кварталов в большинстве случаев площади запечатанных земель и земель, занятых растительным покровом, суммарно равны площади квартала. Однако иногда в малых количествах могут встретиться участки с открытым почвенным покровом, одновременно снижающие и запечатанность, и степень озеленения. Но поскольку открытый почвенный покров связан либо с площадками под строительство, либо с посадками газонов и деревьев, то вскоре его площади перейдут, соответственно, под застроенные или озелененные территории, поэтому в данном исследовании для упрощения они не учитывались при подсчетах. Также из расчетов исключена площадь водных объектов.

Результаты компьютерного расчета степени запечатанности могут служить основой для создания упрощенной карты функциональных зон, которую можно использовать для сокращения времени при

визуальном дешифрировании или для обновления готовых детальных карт.

Для жилой застройки Москвы характерны регламентированные принципы озеленения жилых районов. В соответствии с нормами Генплана Москвы выделяют четыре класса озелененных территорий: менее 25% (ниже нормы), 25-50% (малая степень озеленения), 50-70% (средняя степень), более 70% (озелененные кварталы). Аналогично в НИиПИ экологии города выделяют классы запечатанности кварталов: районы с низкой запечатанностью (менее 30%), средней (30-50%) и высокой (более 50%) [3].

Анализ гистограмм распределения кварталов с разной степенью запечатанности, относящихся к разным функциональным зонам (рис. 2), показал, что на изучаемом участке ВАО г. Москвы для жилой зоны в среднем характерна запечатанность территории в пределах 30-52%, для производственно-транспортной зоны и складских земель – более 52%, а для природно-рекреационной зоны – менее 30%. Однако ряд кварталов не соответствовал этим критериям. Наибольшие отклонения относились к жилой зоне, где около трети жилых кварталов имели степень запечатанности территории выше 52% или ниже 30%, для остальных типов земель результат был более приемлемым – около 90% всех кварталов этих зон удовлетворяли «своим» интервалам запечатанности.

При визуальном анализе исходного снимка оказалось, что различия в степени запечатанности

кварталов жилой зоны объясняются характером застройки. Низкую степень запечатанности имеют районы индивидуальной застройки вследствие небольшой площади под строениями и отсутствием широких улиц, а высокая – характерна для районов жилой застройки нового многоэтажного строительства или для старой малоэтажной застройки с плотно расположенными домами.

Для разделения участков нового многоэтажного строительства и промзон с высокой запечатанностью можно воспользоваться предложенным выше способом дешифрирования падающей тени от зданий путем включения классов теней в обучающую выборку при контролируемой классификации снимка. В таком варианте высокие значения площади тени и будут признаками кварталов нового многоэтажного строительства. Производственно-транспортная и складская зоны по степени запечатанности схожи с жилой зоной, но для них не характерны обширные падающие тени, поскольку специфика их застройки – крупные, но невысокие строения, которые к тому же располагаются плотно, из-за чего небольшие по площади падающие тени теряются в межкорпусных пространствах. Районы старой плотной застройки часто приходится уточнять визуально, поскольку при компьютерной классификации они в большинстве случаев путаются с производственно-транспортной зоной.

Заключение

Анализируя все предложенные выше методы дешифрирования функциональных зон города по космическим снимкам, можно прийти к определенному алгоритму геоинформационного картографирования. При его выполнении на первом уровне работы следует начинать исследование с помощью съемки с разрешением 20-30 м, которую можно найти в открытых архивах, и автоматизированно получить результат, который можно использовать для оценки соотношения отдельных зон города, что необходимо, к примеру, для эколого-географических изысканий. Далее, на втором уровне, если масштаб исследования требуется увеличить, то можно привлечь детальные космические снимки с разрешением лучше 10 м и с помощью процедур классификации и геоинформационной обработки ее результата распознать основные объекты городской застройки и предварительно отнести кварталы к тем или иным функциональным зонам. И наконец, на третьем уровне работы, в случае когда точность полученной карты необходимо увеличить, можно воспользоваться визуальным дешифрированием применительно к наиболее спорным участкам результатов двух других уровней.

Таким образом, предложенная методика позволяет решить задачи функционального зонирования

городских территорий в зависимости от наличия различных источников съемки для разных целей картографирования с помощью различных методов как автоматизированного, так и визуального дешифрирования.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Русского географического общества и Российского фонда фундаментальных исследований (проекты № 13-05-41191 и № 13-05-41233).

Ключевые слова: городская территория, ГИС пакет, космические снимки.

ЛИТЕРАТУРА

1. Балдина Е.А., Грищенко М.Ю. Исследование «теплового острова» Москвы по разносезонным снимкам Landsat-7/ETM+ // Геоинформатика. – 2011. – № 3. – С. 61-69.
2. Гормаш А.В., Оньков И.В., Чернопазов В.А., Кривенко М.А. Опыт использования космических снимков IKONOS и QuickBird для решения задач муниципального хозяйства г. Перми // Геоматика. – 2010. – № 1. – С. 52-56.
3. Курбатова А.С., Баранникова Ю.А., Комедчиков Н.Н. Экологическое картографирование в градостроительном проектировании. – М. : Маджента, 2006. – 191 с.
4. Лабутина И.А., Хайбрахманов Т.С. Структура и содержание системы карт для обеспечения ландшафтно-геохимических исследований // Геодезия и картография. – 2012. – № 3. – С. 27-33.
5. Панарин В.А., Панарин Р.В. Применение космических снимков в муниципальном управлении урбанизированных территорий для задач территориального планирования // Геоматика. – 2009. – № 3. – С. 41-55.
6. Aubrecht C., Steinnocher K., Hollaus M., Wagner W. Integrating earth observation and GIScience for high resolution spatial and functional modeling of urban land use // Computers, Environment and Urban Systems. – 2009. – № 33. – P. 15-25.
7. Kressler F., Franzen M., Steinnocher K. Segmentation based classification of aerial images and its potential to support the update of existing land use databases // ISPRS Hannover workshop, Hannover, 2005 : Proceedings. – URL: <http://www.isprs.org/publications/related/hannover05/paper/papers.htm> (date of access 21.08.2013).
8. Miller R., Small C. Cities from space: potential applications of remote sensing in urban environmental research and policy // Environmental Science & Policy. – 2003. – № 6. – P. 129-137.
9. Wilson J., Clay M., Martin E., Stuckey D., Vedder-Risch K. Evaluating environmental influences of zoning in urban ecosystems with remote sensing // Remote Sensing of Environment. – 2003. – № 86. – P. 303-321.