

Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования
МОСКОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
ГЕОДЕЗИИ И КАРТОГРАФИИ (МИИГАиК)

На правах рукописи

НГУЕН ВАН НАМ

**РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ОБНАРУЖЕНИЯ И ПРОГНОЗИРОВАНИЯ
ЗАМЕЩЕНИЯ ВИДОВ ЗЕМЛЕПОЛЬЗОВАНИЯ НА
ВОДОНЕПРОНИЦАЕМЫЕ ПОВЕРХНОСТИ ПО МАТЕРИАЛАМ
МНОГОЗОНАЛЬНЫХ КОСМИЧЕСКИХ СЪЁМОК**

25.00.34 – Аэрокосмические исследования Земли, фотограмметрия

Диссертация на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Научный руководитель –
д.т.н., проф. Малинников В.А.

Москва – 2017

ОГЛАВЛЕНИЕ

| | |
|---|-----------|
| СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ | 4 |
| ВВЕДЕНИЕ..... | 6 |
| 1. АНАЛИЗ СОСТОЯНИЯ ПРОБЛЕМЫ ВОДОНЕПРОНИЦАЕМЫХ ПOKPЫТИЙ/ПОВЕРХНОСТЕЙ..... | 12 |
| 1.1. Проблема водонепроницаемых поверхностей мегаполиса и пути ее решения | 12 |
| 1.2. Современные космические системы дистанционного зондирования | 14 |
| 1.3. Современные методы тематического дешифрирования материалов космических съемок..... | 23 |
| 1.4. Постановка цели и задач исследования | 34 |
| 2. РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ОБНАРУЖЕНИЯ И ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ЗАМЕЩЕНИЯ ВИДОВ ЗЕМЛЕПОЛЬЗОВАНИЯ НА ВОДОНЕПРОНИЦАЕМЫЕ ПОВЕРХНОСТИ ПО РАЗНОВРЕМЁННЫМ МНОГОЗОНАЛЬНЫМ КОСМИЧЕСКИМ СНИМКАМ..... | 36 |
| 2.1. Особенности спектрально-отражательных характеристик мегаполисов | 36 |
| 2.2. Определение классов землепользования | 42 |
| 2.3. Методика обнаружения и прогнозирования замещения видов землепользования на водонепроницаемы поверхности по материалам разновременных многозональных космических съемок | 44 |
| 2.3.1. Общее описание методики | 44 |
| 2.3.2. Подготовительный этап (сбор и анализ данных многозональной космической съемки) | 45 |
| 2.3.3. Предварительный анализ и обработка многозональных космических снимков | 46 |
| 2.3.4. Алгоритмы и методы дешифрирования различных типов земных покровов.... | 49 |
| 2.4. Прогнозирование замещении видов землепользования с помощью цепей Маркова в крупных городских агломерациях..... | 55 |
| 2.5. Выводы по главе | 59 |
| 3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ЗАМЕЩЕНИЙ ВИДОВ ЗЕМЛЕПОЛЬЗОВАНИЯ И ПРОГНОЗИРОВАНИЕ СТРУКТУРЫ | |

| | |
|---|-----------|
| ЗЕМЛЕПОЛЬЗОВАНИЯ НА ПРИМЕРЕ МЕГАПОЛИСА ХАНОЙ (ВЬЕТНАМ)..... | 60 |
| 3.1. Общее описание природных и хозяйственных условий мегаполиса Ханой (Вьетнам) | 60 |
| 3.2. Эффективности метода объектно-ориентированной классификации типов земных покровов по многозональным космическим изображениям | 63 |
| 3.3. Результаты дешифрирования исходных разновременных многозональных космических изображений на основе различных спектральных индексов | 66 |
| 3.4. Прогнозирование тенденции замещения различных видов землепользования в мегаполисе Ханой на 2019 и 2027 годы | 91 |
| ЗАКЛЮЧЕНИЕ | 96 |
| СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ..... | 98 |

СПИСОК СОКРАЩЕНИЙ

Сокращения на русском языке

| | | |
|---------|---|---|
| ГИС | – | Геоинформационная система |
| ДЗЗ | – | Дистанционное зондирование Земли |
| ИК | – | Инфракрасный |
| ИСЗ | – | Искусственный спутник Земли |
| КА | – | Космических аппаратов |
| КС | – | Космический снимок |
| МООК | – | Метод объектно-ориентированная классификация |
| МПриООС | – | Министерство природных ресурсов и охраны окружающей среды |
| ПО | – | Программная обеспечение |
| СРВ | – | Социалистическая республика Вьетнам |

Сокращения на иностранных языках

| | | |
|------|---|--|
| ETM+ | – | Enhanced Thematic Mapper Plus Улучшенный тематический картограф |
| GPS | – | Global positioning System Глобальная система позиционирования |
| HRG | – | High Resolution Geometric Прибор высоко разрешения для изучения геометрически свойств земной поверхности |
| ISI | – | Impervious Surface Index Индекс водонепроницаемой поверхности |
| NDBI | – | Normalized Difference Built-up Index Нормализованный дифференциальный индекс застроенности |

| | |
|---------|---|
| | земельных участков |
| NDVI | – Normalized Difference Vegetative Index Нормализованный дифференциальный вегетационный индекс |
| NDWI | – Normalized Difference Water Index Нормализованный дифференциальный водный индекс |
| OLI | – Operational Land Imager Прибор съемки поверхности земли |
| RGB | – Red Green Blue Красный зеленый синий |
| SAVI | – Soil Adjusted Vegetation Index Почвенно-отрегулированный вегетационный индекс |
| SI | – Soil Index Индекс почвы |
| SPOT | – Système Pour l’Observation de la Terre Спутник система наблюдения за поверхностью Земли |
| SWIR | – Shortwave Infrared Коротковолновое инфракрасное излучение |
| TIRS | – Thermal Infrared Sensor Тепловой инфракрасный сенсор |
| TM | – Thematic Mapper Тематический картограф |
| UTM | – Universal Transverse Mercator Универсальная поперечная проекция Меркатора |
| WGS-84 | – World Geodetic System, 1984 Мировая Геодезическая Система, 1984 г |
| VN-2000 | – Вьетнамская государственная система геодезических координат, 2000 г. |

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы. Земля играет важную роль в жизни человеческого общества. Практика показывает, что процесс развития человеческого общества, формирование и развитие материальной и духовной культуры цивилизации, технические достижения, культура и наука построены с опорой на основы – землепользования. В зависимости от контекста развития общества, причины для изменения землепользования всегда в реальности преследовали своей целью удовлетворение потребности улучшения качества жизни и устойчивого развития человеческой жизни. Причины изменения использования земельных ресурсов разнообразны и сложны, однако, их можно обобщить в две основные группы: (i) изменения в связи с естественными причинами и (ii) изменения, вызванные деятельностью экономического развития - человеческого общества.

В настоящее время отчетливо видно влияние городских агломераций на экстенсивное потребление ресурсов Земли, загрязнение окружающей среды и изменение климата. Процесс урбанизации усилил это влияние, и вызвал ряд других негативных последствий для окружающей среды. Так, например, неконтролируемое горизонтальное расширение городов приводит к уничтожению сельского хозяйства и лесов, интенсивное развитие транспортной инфраструктуры - высокому уровню выбросов углерода, заторов на дорогах, более высоким расходам на инфраструктурное обеспечение, усилению проблем общественного здравоохранения и ряду других экологических, экономических и социальных проблем. Поэтому, в последние десятилетия растет осознание необходимости эффективного контроля процессом разрастания городских агломераций и выработке научно обоснованных мероприятий по устранению негативных последствий данного процесса.

Процесс урбанизации в последние два десятилетия набирает силу в Юго-Восточной Азии, особенно в крупных городских агломерациях. Во Вьетнаме, этот процесс начал набирать силу с 1990 г., поскольку курс на экономическое обновление Вьетнама был принят в 1986 г. Уровень урбанизации особенно высок для Ханоя и Хошимина, где население составляет 16,8% (15 миллионов человек) от всего

населения страны [122]. Что касается Ханоя, население увеличилось с 3,1 млн. в 2003 году до 6,1 млн. в 2008 году и до 7,2 млн. в 2015 году [123], тогда как уровень урбанизации составил 49,1% [122]. Высокий уровень урбанизации привел к возникновению сложных проблем, таких как сокращение открытого пространства, загрязнение окружающей среды, переполнение транспортных потоков и высокое давление на инфраструктуру [124].

Задача обеспечения устойчивого развития мегаполисов не может быть решена без решения проблемы оптимизации природной среды, что будет способствовать нахождению сбалансированного соотношения между эксплуатацией, консервацией и мелиорацией природной среды. При этом программа оптимизации должна разрабатываться с учетом географических условий, экологического состояния и уровня экономического развития рассматриваемого региона. Решение задачи оптимизации землепользования на территории мегаполиса требует комплексного подхода, не только в территориальном аспекте, но и во временном. Наиболее эффективно эта работа может быть проведена с использованием информационных аналитических систем (ИАС) поддержки принятия управленческих решений, которые должны быть достаточно гибкими и иметь возможность модернизации с учётом новых требований к ним и изменений в структуре. Информационное обеспечение ИАС должно базироваться на данных дистанционного зондирования Земли и автоматизированных методах тематической обработки геопространственной информации.

В рамках диссертационного исследования мы остановились на проблеме обнаружения и прогнозирования замещения видов землепользования на водонепроницаемые поверхности, так как эффективное управление и регулирование земельных ресурсов – одна из главных составляющих рационального природопользования.

Эффективное использование космических изображений для обнаружения и картографирования изменений видов землепользования на сегодняшний день во Вьетнаме является нерешенной проблемой из-за отсутствия соответствующих автоматизированных методик обработки данных дистанционного зондирования, получаемых со спутника. Поэтому, задача разработки подобной методики актуальна и имеет важное научное и практическое значение.

Степень разработанности решаемой научной задачи исследована по опубликованным в открытой печати научным статьям в области тематического дешифрования аэрокосмической информации, применительно к задачам наук о Земле. При написании диссертационной работы автор опирался на труды известных учёных в области космических методов дистанционного зондирования, цифрового картографирования и ГИС-технологий, в частности: Прэтта У., Кронберга П., Книжникова Ю.Ф., Кравцовой В.И., Зверева А.Т., Сладкопевцева С.А., Малинникова В.А., Марчукова В.С., Савиных В.П., Верещаки Т.В., Стурмана В.И., Злобина В.К., Журкина И.Г., Беленко В.В., Барталева С.А., Браткова В.В., Дейвис Ш.М., Ландгребе Д.А., Арнольд Ж., Шулер Т.Р., Pham Cu Van, Martin Herold, Lambin E.F., Geneletti D., Brandt Tso, Paul Mather, Ursula C Benz, Peter Hofmann, Aplin P., Lloyd C.D., Theobald D.M., Pairman D., Thomas Lillesand, Dongjie G., Dadhich P.N., Zhang R., Logsdon M.G, Muller R.M., Murteira B., Cabral P., и многих других.

Основной целью диссертационного исследования явилось решение актуальной научной задачи, а именно, разработка методики обнаружения и прогнозирования замещения видов землепользования на водонепроницаемые поверхности по материалам разновременных многозональных космических съемок на примере территории г. Ханой, Вьетнам.

Для достижения поставленной цели были решены следующие задачи:

1. Провести обзорный анализ состояния проблемы водонепроницаемых поверхностей на территории мегаполиса Ханой (Вьетнам) и выявить основные направления исследований. Выполнить анализ современных методов обнаружения прогнозирования водонепроницаемых поверхностей по материалам многозональной космической съемки.

2. Обосновать возможность использования объектно-ориентированного метода для обнаружения водонепроницаемых поверхностей на территории мегаполиса по их космическим изображениям.

3. Разработать методику обнаружения замещения видов землепользования на водонепроницаемые поверхности по материалам многозональных космических съемок.

4. Определить типы и содержание карт, актуальных для оценки площадей водонепроницаемых поверхностей на территории мегаполиса.

5. Разработать методику прогноза изменения площадей водонепроницаемых поверхностей с использованием цепей Маркова.

6. Выполнить экспериментальные исследования по обнаружению и прогнозированию площадей водонепроницаемых поверхностей на тестовой территории мегаполиса Ханой, Вьетнам.

Научная новизна работы, проведенной в рамках диссертационного исследования, заключается в следующем:

1. Впервые водонепроницаемые поверхности/покрытия концептуально представлены в землепользовании, социально-экономическом картографировании мегаполисов как единая система;

2. Впервые разработана автоматизированная методика обнаружения и прогнозирования замещения видов землепользования на водонепроницаемые поверхности по материалам многозональных космических съёмок. Предложенная методика, основывается на методе объектно-ориентированной классификации спектральных изображений земных поверхностей с использованием вегетационных индексов и индекса водонепроницаемых поверхностей;

3. Впервые выполнены расчеты показателей динамики замещения видов землепользования на водонепроницаемые поверхности для мегаполиса Ханой, позволившие составить авторские оригиналы карт, отображающих замещения видов землепользования на водонепроницаемые поверхности за период 2003 – 2011 гг.

4. Впервые выполнен прогноз замещения различных видов землепользования на водонепроницаемые поверхности с использованием Марковских цепей для моделирования изменений в землепользовании, включая как городские, так и негородские районы в больших пространственных масштабах.

Теоретическая значимость диссертационной работы состоит в совершенствовании теоретических и методических основ автоматизированного тематического дешифрирования материалов многозональных космических съёмок.

Практическая значимость работы. Разработанные автором

вычислительные алгоритмы и методика тематического дешифрирования многозональных космических изображений обеспечивают решение поставленной научной проблемы с целью обнаружения изменений видов землепользования, тематического картографирования и прогнозирования замещения видов землепользования на водонепроницаемы поверхности, на примере мегаполиса Ханой. Результаты научных исследований автора могут быть использованы при выполнении научными и производственными организациями Вьетнама исследований в следующих направлениях: организация системы экологического космического мониторинга, контроль и прогноз состояния окружающей среды, повышение эффективности рационального природопользования, охрана природных ресурсов для обеспечения устойчивого развития мегаполиса, цифровое картографирование видов землепользования и другие.

Методология и методы исследования. В диссертационной работе использован аналитический и картографический методы для исследования структуры землепользования в сочетании со статистическим и математическим методами, а также методы цифровой автоматизированной обработки космических изображений.

На защиту выносятся научные результаты:

- автоматизированная методика обнаружения и прогнозирования замещения видов землепользования на водонепроницаемы поверхности по материалам многозональных космических съёмок;
- картосхемы индексов SI, SAVI, NDWI, ISI и индекса водонепроницаемых поверхностей на территорию города Ханой, вычисленные с помощью объектно-ориентированного классификатора на 2003, 2007 и 2011 гг.;
- прогнозные оценки замещения видов землепользования на водонепроницаемы поверхности на 2019 и 2027 годы в городе Ханой, Вьетнам.

Апробация результатов работы.

Апробация работы. Основные результаты диссертационной работы были доложены, обсуждены и получили одобрение на следующих научных конференциях:

– 71-ой научно - технической конференции студентов, аспирантов и молодых учёных МИИГАиК (5.04.2016 г.);

– 72-ой научно - технической конференции студентов, аспирантов и молодых учёных МИИГАиК (12.04.2017 г.).

Публикации. По теме диссертации опубликованы 3 научные статьи, все статьи опубликованы в рецензируемых изданиях, рекомендованных ВАК Минобрнауки РФ.

Объём и структура диссертационной работы. Диссертационная работа состоит из введения, трех глав, заключения и списка цитируемой литературы. Основной текст диссертационной работы изложен на 110 стр., в том числе 28 табл., 35 рис. Список использованной литературы включает 134 наименований, в том числе 26 на русском и 108 на иностранных языках.

Автор выражает благодарность научному руководителю – д.т.н., проф. В.А. Малинников, а также всем сотрудникам кафедры космического мониторинга и экологии МИИГАиК за оказанную помощь в подготовке диссертационной работы.

1. АНАЛИЗ СОСТОЯНИЯ ПРОБЛЕМЫ ВОДОНЕПРОНИЦАЕМЫХ ПОВЕРХНОСТЕЙ/ПОВЕРХНОСТЕЙ

1.1. Проблема водонепроницаемых поверхностей мегаполиса и пути ее решения

Непроницаемые поверхности (англ. **Impervious surfaces**) в русскоязычной научной литературе, называемые водонепроницаемыми поверхностями/ покрытиями являются поверхностями в основном искусственных сооружений таких, как дороги, тротуары, проезды и парковки, которые покрываются непроницаемыми материалами, такими как асфальт, бетон, кирпич, камень и крыши. Грунты, которые часто уплотняют в ходе городского развития также являются весьма непроницаемыми. В работах [12, 13] показано что, если в городах имеется более чем на 40% водонепроницаемых поверхностей, то это является серьезной угрозой для окружающей среды, потому что, в этом случае, может стремительно развиваться цепь экологически процессов событий, что существенным образом изменяет качество городского воздуха и водных ресурсов.

Искусственные покрытия, такие как асфальт, цемент и кровля, препятствуют проникновению осадков в почву, нарушают водный цикл и влияют как на количество, так и на качество водных ресурсов. Например, исследования последних лет [4, 13] показали, что величина площади водонепроницаемых поверхностей в водоразделе является надежным показателем воздействия развития на водные ресурсы.

Количество непроницаемой поверхности в регионе может служить сокращенной или суррогатной мерой не только качества воды, но и других аспектов здоровья экосистемы. Например, исследование, проведенное в [13], показало, что восковые, инвазивные и неродные виды растений в основном ограничены местами с высокой долей непроницаемой поверхности и, наоборот, растения, характерные для относительно невозмущенных лесных ландшафтов, ограничены районами с небольшим количеством непроницаемых поверхностей. Установлено, что пороговый уровень величины площадей непроницаемой поверхности, над которой

встречаются редкие виды леса, составляет около десяти процентов. Интересно, что величина данного порога практически совпадает с порогом непроницаемых поверхностей для деградации качества воды. А если значение площадей непроницаемой поверхности составляет более семнадцати процентов, сорняки растений преобладают, исключая более чувствительные виды.

Следует отметить, что водонепроницаемые поверхности являются своеобразными «улавливателями» твердых частиц из атмосферы, оксидов азота из выхлопных газов автомобилей, частиц резины от покрышек, мусора от тормозных систем, фосфатов из жилых и сельскохозяйственных удобрений, а также десятков других загрязняющих веществ. Кроме того, площадь поверхности и пространственное расположение водонепроницаемых поверхностей могут существенно влиять на городской климат, изменяя тепловые потоки в различных районах городских агломераций [12].

Негативные последствия от увеличения площадей непроницаемых площадей в городских агломерациях неизбежно приводят к ухудшению качества жизни жителей мегаполиса. Существенное ухудшение экологии мегаполиса приводит к серьезным социальным проблемам, в частности снижению продолжительности жизни и периода активной деятельности городских жителей, росту показателей заболеваемости и смертности, ухудшению психического и социального здоровья, что выражается в более широком распространении наркомании, алкоголизма и др., росте правонарушений и т.д. [12]. Существенно ухудшаются условия для занятий спортом, организации отдыха, остается все меньше возможностей для удовлетворения многих других материальных и духовных потребностей человека.

В мировой практике проблема непроницаемых поверхностей решается проведением в городских агломерациях специальных природоохранных восстановительных мероприятий, поддерживающих благоприятный микроклимат. Это могут быть: реализация проектов по озеленению крыш городских искусственных сооружений, строительство систем задерживающих дождевую воду в специальных ручейных прудах, искусственное понижение рельефа на площадках с зелеными насаждениями и газонами для инфильтрации и испарения дождевых вод, дренажи

обратного действия и прочее.

Научный интерес представляет не только разработка подобных мероприятий, но и разработка современных космических технологий исследования актуального состояния и тенденций в балансе непроницаемых городских покрытий и экологического качества застроенных и застраиваемых территорий. Данные изыскание водонепроницаемых поверхностей и создание тематических карт (обнаружение, мониторинг и анализ) важны не только для управления окружающей средой, например, оценки качества воды и регулирование температурного режима города и т.д., но и для городского планирования, например, для создания инфраструктуры и устойчивого развития городов.

1.2. Современные космические системы дистанционного зондирования

Информация о непроницаемых поверхностях имеет важное значение для городского планирования и окружающей среды, и управления ресурсами. Поэтому, космическому дистанционному зондированию водонепроницаемых поверхностей в городских районах в последнее время уделяют беспрецедентное внимание [1, 3, 7].

Оптико-электронные спутниковые системы дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) позволяют получать пространственную информацию о земной поверхности в видимом и инфракрасном диапазонах длин электромагнитных волн. Они способны распознавать пассивное отраженное излучение земной поверхности в видимом и ближнем инфракрасном диапазонах. В таких системах излучение попадает на соответствующие датчики, генерирующие, электрические сигналы в зависимости от интенсивности излучения. Мировая группировка спутников ДЗЗ включает в себя 74 спутника, из которых 14 относятся к категории радарных спутников [17].

В настоящее время для количественной оценки водонепроницаемых поверхностей в основном используются спутниковые данные дистанционного зондирования в высокого/среднего пространственного разрешения [16], например, LANDSAT TM/ETM (тематический картограф), МОДИС (спектрорадиометр

среднего разрешения), SPOT (многозональная съемка). В ряде работ [20] использовались космические системы дистанционного зондирования высокого пространственного разрешения, например, спутника IKONOS и QUICKBIRD, что позволило детально изучить особенности текстуры земных покровов для количественного определения водонепроницаемых поверхностей.

Наиболее широко при изучении непроницаемых земных поверхностей использовались следующие действующие космические системы природно-ресурсного и экологического мониторинга назначения: SPOT (Франция), Landsat, OrbView-3, IKONOS, (США), Fomosat-2 (Тайвань), Kompsat-2 (Корея), VNREDSat-1 (Вьетнам). Рассмотрим некоторые из них.

SPOT (Satellite Pour L'Observation de la Terre) спроектирована Национальным космическим агентством Франции. Космическая система SPOT содержит космические и наземные средства, предназначенные для управления спутником, получения данных, производства и распространения цифровых космических изображений.

В рамках проекта SPOT было запущено пять космических аппаратов. Из них три успешных. Спутник SPOT-2 был успешно выведен на орбиту 21 января 1990 года. Спутник SPOT-4, функционирующий с 24 марта 1998 года, отличается от других спутников системы SPOT тем, что имеет дополнительный коротковолновый ИК диапазон для исследования различных типов земной поверхности.

КА SPOT-5 был выведен 3 мая 2002 года на солнечно-синхронную орбиту высотой 822 км с космодрома Куру ракетоносителем «Ариан-42Р». Особенностью данного спутника является наличие на его борту высокоточного стереоскопического детектора, позволяющего получать стереопары для изучения топографических объектов и построения моделей рельефа, а также двух камер высокого разрешения, позволяющих получать черно-белые изображения с разрешением 5 м (в режиме SuperMode – до 2,5 м) и цветные - с разрешением 10 м. Кроме того, на SPOT-5 установлена камера VEGETATION-2, позволяющая получать практически ежедневно снимки всей поверхности Земли с разрешением 1 км.

Информация, получаемая с КА SPOT-5 используется в областях производственной и хозяйственной деятельности: сельского хозяйства, картографирования (включая трехмерное), лесоводства, городского планирования, слежения за стихийными бедствиями, геологии, нефтяной разведки, поиска других полезных ископаемых, контроля водных ресурсов, изучения прибрежных морских районов, океанографии, экологического мониторинга. Технические характеристики КА SPOT-5 приведены в таблице 1.1. Отличительной особенностью спутника SPOT 5 является режим согласованной съемки одной и той же территории двумя датчиками с разрешением 5 м [17, 18, 20].

Таблица 1.1 – Технические характеристики КА SPOT-5 [17, 20]

| | |
|--|--|
| Оператор спутниковой съёмки | CNES (Франция) |
| Дата запуска | 3 мая 2002 года |
| Окончание эксплуатации | 31 марта 2015 года |
| Комплекс оборудование на борту КА SPOT | HRG - High Geometric Resolution VEGETATION -2 |
| Пространственное разрешение, м/пиксель | 2,5; 5 (панхроматический) 10 (мультиспектральный) 20 (средний ИК) |
| Спектральные диапазоны, мкм | Панхроматический: 0,48-0,71 Зеленый: 0,50–0,59 Красный: 0,61–0,68 Ближний ИК: 0,78–0,89 Средний ИК (SWIR): 1,58-1,75 |
| Радиометрическое разрешение, бит/пик | 8 |
| Формат изображений | GeoTIFF |
| Ширина полосы обзора, км | 800 |
| Ширина полосы съемки, км | 60 |
| Высота съёмки, км | 832 |
| Наклонение орбиты | 98,7° |
| Точность геопозиционирования | <30 м СКО |
| Возможность стереосъемки | Есть (с одного витка) |
| Периодичность съемки | 26 дней (при съемке в надири) |

Космический аппарат OrbView-3 был запущен 26 июня 2003 г. С авиабазы Ванденберг (США). КА имеет одну камеру OrbView High Resolution Imaging System (OHRIS) способную получать панхроматические снимки разрешением 1 м и мультиспектральные снимки с разрешением 4 м. В таблице 1.2 приведены

технические характеристики камеры OHRIS установленной в КА OrbView-3 [20].

Таблица 1.2 – Технические характеристики камеры OHRIS

| Режим съемки | Панхроматический | Мультиспектральный (MS) |
|--------------------------------|--|---|
| Пространственное разрешение, м | 1 | 4 |
| Диапазоны съемки | 1 | 4 MS |
| Спектральные диапазоны, нм | PAN: 450 - 900 | MS1: 450-520 (голубой) MS2: 520-600 (зеленый) MS3: 625-695 (красный) MS4: 760-900 (ближний инфракрасный) |
| Размер линейки | 8000 пикселей | 2000 x 4 |
| Размер пиксела линейки | 6.0 мкм x 5.4 мкм (поперек и вдоль) | |
| Динамический диапазон | 11 бит (сжатое для передачи до 2 бит/пиксел) | |

Область применения данных дистанционного зондирования, полученных с КА OrbView-3:

- Создание и обновление карт и планов масштабов 1:5000-1:10 000;
- Создание ЦМР на основе стереопар с точностью порядка 3м;
- Городское и земельное планирование;
- Сельское и лесное хозяйство;
- Мониторинг состояния окружающей среды;
- Решение прикладных задач [18].

Космический аппарат IKONOS находится на космической орбите с 24 сентября 1999 г.

Спутник находится на солнечно-синхронной орбите высотой 680 км, обеспечивающей его прохождение над любым районом Земли каждые 1–5 дней (в зависимости от широты). Данный спутник предназначен для получения цифровых изображений земной поверхности с пространственным разрешением 1 м в панхроматическом режиме и 4 м – в мультиспектральном режиме. Технические характеристики целевой аппаратуры КА IKONOS представлены в таблице 1.3 [20].

Таблица 1.3. Технические характеристики КА IKONOS

| Параметры | Режим | |
|--|--|--------------------|
| | Панхроматический | мультиспектральный |
| Спектральный диапазон, нм | 445-900 | 450-520 |
| | | 520-610 |
| | | 640-720 |
| | | 770-880 |
| Пространственное разрешение, м | 1 | 4 |
| Максимальное отклонение от надира, градусы | 45 | |
| Ширина полосы охвата, км | 11 | |
| Радиометрическое разрешение, бит/пиксел | 11 | |
| Формат файлов | GeoTIFF 1.0 | |
| Обработка | Радиометрическая, сенсорная и геометрическая коррекция Приведение к картографической проекции | |
| Периодичность съемки, дни | 1-5 (в зависимости от широты области съемки) | |

Многоцелевой спутник Kompsat-2 (Korean Mutil-purpose Satellite 2) запущен 28 июля 2006 г. с помощью ракеты-носителя «Рокот» с космодрома Плесецк (Россия). В таблице 1.4 приведены характеристики целевой аппаратуры спутника:

Таблица 1.4 – Технические характеристики КА Kompsat-2

| Параметры | Режим | |
|---|------------------|--------------------|
| | Панхроматический | Мультиспектральный |
| Спектральный диапазон, нм | 500-900 | 450-520 |
| | | 520-600 |
| | | 630-690 |
| | | 760-900 |
| Пространственное разрешение, м | 1 | 4 |
| Ширина полосы охвата, км | 15 | |
| Радиометрическое разрешение, бит/пиксел | 10 | |
| Формат файлов | GeoTIFF | |
| Периодичность съемки, дни | 3 | |

Область применения данных дистанционного зондирования, полученных со спутника Kompsat-2:

- Создание и обновление карт и планов масштабов 1:5000;
- Создание ЦМР на основе стереопар;
- Освоение новых территорий;
- Городское и земельное планирование;
- Сельское и лесное хозяйство;
- Контроль чрезвычайных ситуаций;
- Мониторинг состояния окружающей среды;
- Решение прикладных задач [20].

Космический аппарат Formosat-2

Космический аппарат Formosat-2 запущен 21 мая 2004 г. Космическим агентством Тайваня - NSPO (National Space Organization). Основные технические характеристики целевой аппаратуры представлены в таблице 1.5.

Таблица 1.5 – Технические характеристики КА Formosat-2

| Параметры | Режим | |
|--|--|--------------------|
| | Панхроматический | мультиспектральный |
| Спектральный диапазон, нм | 500-900 | 450-520 |
| | | 520-600 |
| | | 630-690 |
| | | 760-900 |
| Пространственное разрешение, м | 2 | 8 |
| Максимальное отклонение от надира, градусы | 45 | |
| Ширина полосы охвата, км | 24 | |
| Радиометрическое разрешение, бит/пиксел | 8 | |
| Формат файлов | GeoTIFF | |
| Обработка | Радиометрическая, сенсорная и геометрическая коррекция. Приведение к картографической проекции | |
| Периодичность съемки, дни | ежедневно | |

Данные дистанционного зондирования, полученные со спутника Formosat-2, используются для решения следующих задач:

- Создание и обновление карт и планов масштабов 1:10 000;
- Городское и земельное планирование;

- Сельское и лесное хозяйство;
- Контроль окружающей среды;
- Регулярный мониторинг территории;
- Решение прикладных задач [20].

LANDSAT 8 – спутник дистанционного зондирования Земли

Данный спутник в отличие от предыдущих модификаций спутниковой системы Landsat, на LandSat-8, использует не сканирующее зеркало, а схему Push broom scanner с линейными датчиками. В фокальной плоскости основного инструмента спутника, Operational Land Imager (OLI), установлено 14 модулей Focal Plane Modules, в каждом модуле установлено 10 линейных сенсоров различных диапазонов. Телескоп OLI состоит из 4 неподвижных зеркал. В инфракрасном инструменте Thermal Infrared Sensor (TIRS) используется сходная схема с 3 модулями в фокальной плоскости и отдельным телескопом из 4 линз, изготовленных из германия и селенида цинка [131].

На спутнике Landsat 8 используются два набора инструментов: Operational Land Imager (OLI) и Thermal InfraRed Sensor (TIRS). Первый набор позволяет получать изображения в 9 диапазонах видимого света и ближнего инфракрасного излучения (ИК), второй набор - в 2 диапазонах дальнего (теплового) ИК. В таблице 1.6 приведены каналы и их свойства.

Спектральный диапазон 1 чувствителен к темно-синим и фиолетовым цветам. Выбран синий цвет потому, что он хорошо рассеивается на частицах пыли и частицах воды в воздухе, а также на самих молекулах воздуха.

Спектральные диапазоны 2, 3 и 4 это видимые диапазоны спектра электромагнитных волн, соответствующие к синим, зеленым и красным зонам спектрам.

Диапазон 5 является очень важной частью спектра - ближний инфракрасный спектр. Благодаря тому, что излучение этого диапазон отражает вода находящаяся в листьях здоровых растений, он используется при вычисление вегетационных индексов с целью оценки состояния, качества растений.

Таблица 1.6 – Технические характеристики КА Landsat 8 [127, 131]

| | |
|-------------------------------------|---|
| Оператор спутниковой съёмки | STI-VAST (Вьетнам) |
| Страна | США |
| Разработчики | Orbital Sciences Corporation (OSC) (США; быв. General Dynamics Advanced Information Systems); Ball Aerospace (США) |
| Дата запуска | 11 февраля 2013 года |
| Наименование съёмочной аппаратуры | OLI и TIRS |
| Спектральные диапазоны, мкм | <u>Диапазоны OLI</u> В1- Фиолетовый: 0,43-0,45 В2- Синий: 0,45–0,52 В3- Зеленый: 0,53–0,60 В4- Красный: 0,63–0,68 В5- Ближний ИК: 0,85–0,89 В6- Ближний ИК: 1,56-1,66 В7- Ближний ИК: 2,10-2,30 В8- Панхроматический: 0,50-0,68 В9- Перистые облака: 1,36-1,39 |
| | <u>Диапазоны TIRS</u> В10- Тепловой ИК: 1: 10,30 – 11,30 В11- Тепловой ИК: 2: 11,50 – 12,50 |
| Разрешение на местности, м | 15 (PAN), 30 (VNIR, SWIR), 100 (TIR) |
| Динамический диапазон, бит | 12 |
| Ширина полосы съёмки, км | 185 |
| Скорость передачи данных, Мбит/сек | 265(OLI), 26,2(TIRS) |
| Высота съёмки, км | 705 |
| Период повторного наблюдения, сутки | 16 |
| Срок активного существования, лет | 5 |

Спектральные диапазоны 6 и 7 охватывают разные участки коротковолнового инфракрасного излучения (ИК). Они позволяют отличать сухую землю от влажной, а также скалы и почвы, которые практически не отличаются в других диапазонах, но отличаются в ИК диапазоне.

Спектральный диапазон 8 - панхроматический, имеющий самое большое пространственное разрешение (15метров). Сенсор данного канала воспринимает больше света и поэтому дает наиболее четкую картинку среди всех диапазонов съёмки.

Спектральный диапазон 9 — интересная отличительная от других модификаций Landsat особенность Landsat 8. Данный диапазон покрывает очень узкую

полосу длин волн - 1.36 - 1.39 мкм. Немногие из космических инструментов регистрируют эту область спектра, поскольку она почти полностью поглощается атмосферой. Landsat 8 использует это как преимущество. В Диапазоне 9 видны только облака, которые представляют реальную проблему для спутниковых снимков земной поверхности. С помощью диапазона 9 это легко отследить особенности облачного покрова.

Диапазоны 10 и 11 – это тепловое ИК. Вместо измерения температуры воздуха, как это делают наземные погодные станции, с помощью них измеряют радиационную температуру поверхности [24, 131].

VNREDSat-1

Первый Вьетнамский спутник дистанционного зондирования Земли, созданный по заказу компанией Astrium, запущен 7 мая 2013 года. Спутник предназначен для выполнения задач мониторинга природных ресурсов, стихийных бедствий.

Таблица 1.7 – Технические характеристики КА VNREDSat-1 [125, 126]

| | |
|--|---|
| Оператор спутниковой съёмки | STI-VAST (Вьетнам) |
| Дата запуска | 7 мая 2013 года |
| Разработчики | Airbus Defence and Space |
| Ракета-носитель (РН) | VEGA |
| Пространственное разрешение, м/пиксель | 2,5 (панхроматический) 10 (мультиспектральный) |
| Спектральные диапазоны, мкм | Панхроматический: 0,45-0,75 Мультиспектральный: Синий: 0,45-0,52 Зеленый: 0,53-0,60 Красный: 0,62-0,69 Ближний ИК: 0,77-0,89 |
| Радиометрическое разрешение, бит/пик | 12 |
| Формат изображений | GeoTIFF |
| Ширина полосы захвата, км | 17,5 |
| Расчетная орбита, км | 680 |
| Высота съёмки, км | 700 |
| Наклонение орбиты | 98,7° |
| Точность геопозиционирования CE90, м | 300 |
| Скорость передачи данных, Мбит/сек | 60 |
| Период повторного наблюдения, сутки | 2 |
| Срок активного существования, лет | 5 |

Данные со спутника позволят Вьетнаму лучше отслеживать и анализировать последствия изменения климата, прогнозировать и принимать меры по предотвращению стихийных бедствий, и оптимизировать управление своими природными ресурсами.

VNREDSat-1 способен проводить съемку территории с полосой захвата 17,5 км, с пространственным разрешением 2,5м в панхроматическом режиме и 10м в мультиспектральном (четыре канала) [125]. Основные технические характеристики целевой аппаратуры КА VNREDSat-1 представлены в таблице 1.7.

Анализ результатов исследований в области обнаружения и картографирования непроницаемы поверхностей в городах показал, что наиболее эффективное применение космических данных получается при использовании разномасштабных многозональных космических изображений.

1.3. Современные методы тематического дешифрирования материалов космических съемок

Методы определения изменений видов землепользования (таблица 1.8)

Динамика видов землепользования может быть определена как процесс определения замещения видов землепользования, путем наблюдения их в разные моменты времени [13]. Этот процесс, как правило, регистрируется путем нанесения наблюдаемых изменений землепользования на динамическую картографическую поверхность (представленную в виде серии одномоментных картографических слоев) в двух или более временных точках. Основные источники данных о прошедших изменениях обычно представляются в цифровом формате (аэрофотоснимки, спутниковые изображения) или векторном формате (карты). Рассмотрим наиболее широко используемые методы определения изменений землепользования.

1. Прямой метод сравнения изменений в картах землепользования, основан на полевых измерениях.

Суть этого подхода базируется на непосредственном измерении характеристик землепользования в полевых условиях. Карты землепользования создаются на

основе полевых измерений, а затем проводится сравнение состояний объектов землепользования непосредственно по картам, созданным в разное время. Основное преимущество этого метода в достоверном определении изменений в пространственном расположении и назначении каждого объекта, использующего определенный участок земли. Однако, основными недостатками данного метода, является дороговизна с точки зрения времени, усилий и дорогостоящих затрат на рабочую силу.

2. Методы исследования изменения землепользования на основе данных дистанционного зондирования (ДДЗ).

Дистанционные методы обнаружения изменений в землепользовании начали использоваться с момента запуска в 1972 году Landsat-1 (первый спутник, который был предназначен для изучения ресурсов Земли). Массив цифровых данных о земной поверхности, сформированный в мультиспектральных каналах впервые позволил ученым получать оперативные данные о состоянии земных объектов и описывать их изменения на относительно большой площади.

Вышеописанные методы и сегодня доминирует в мировой практике проведения работ по обнаружению динамики землепользования с использованием методов цифровой обработки изображений, применяется к серии разновременных космических изображениях [29, 35].

При проведении цифровой обработки изображений, с целью выявления динамики землепользования обычно используют следующие методы:

а. Разностный метод

В этом методе пространственно зарегистрированные изображения в моменты времени t_1 и t_2 вычитаются, пиксель за пикселем, чтобы создать дополнительное разностное изображение, которое представляет собой изменение землепользования, которое произошло между этими двумя моментами времени. В математической форме:

$$Dx_{ij}^k = x_{ij}^k(t_2) - x_{ij}^k(t_1) + C \quad (1.1)$$

где Dx_{ij}^k – разница между значениями пикселей x расположенных в строке i , колонке j , для диапазона k , в момент времени (t_1) и момент времени (t_2) и $C =$

константа, используемая для создания положительных цифровых чисел [29].

Простота данного метода является кажущейся, так всегда существует определенная неточность в совмещении разновременных изображений.

Кроме того, сложной технической задачей является разработка алгоритма расчета порогового критерия установления факта изменения или не изменения в результирующих изображениях. Разностный метод изображения обычно применяется для расчета в одном канале изображений [29].

б. Прямой анализ разновременных изображений

В этом методе, два разновременных изображения накладывают друг на друга, с тем, чтобы образовать новое подлежащее классификации изображение. Два исходных изображения имеют N каналов перекрытых друг с другом, а созданное изображение имеет $2N$ каналов. Результаты классификации этого перекрытия изображений – это совокупность классов неизменных и классов изменения. Большое преимущество этого метода заключается в том, чтобы просто классифицировать один раз мультитременное изображение, однако, самый большой недостаток данного метода, как показала практика классификации по данному методу, заключается в исключительной сложности организации корректной процедуры отбора проб. Кроме того, этот метод чувствителен к неблагоприятным внешним воздействиям на момент регистрации изображений, такие как погода, атмосфера, что будет существенно влиять на точность результатов классификации. Поэтому этот метод очень редко используется исследователями из-за его сложности [29].

в. Анализ вектор динамики (CVA)

Этот метод был предложен Malila в 1980 году [30]. Вектор динамики с двумя компонентами, включающими в себя: индекс различий растительности и индекс свободных земель, описывается следующими величинами: длина вектора - представляет собой интенсивность динамики, направление вектора - указывают на характер изменения [31]. В результате применения метода вместо двух исходных одноканальных изображений будет создано одно векторное. Для того, чтобы быть в состоянии идентифицировать были пиксели изменены или

нет, вводится порог изменения. Самый большой недостаток этого метода заключается в сильной зависимости результатов классификации от корректного выбора значения порога изменений.

г. Постклассификация

Это метод определяет наиболее очевидное изменение, путем сравнения независимо классифицированных изображений [29, 32]. Основываясь на результатах классификации на моменты времени t_1 и t_2 , аналитики могут создавать карты изменений и матрицы изменений между классами. Тем не менее, если рассматривать классификацию землепользования, сгенерированную из спутниковых данных изображений на моменты их получения, не трудно увидеть, что изменение картосхем классификации двух изображений, скорее всего, имеет точности, которая сравнима с точностью каждой отдельной классификации изображений [34]. Данный метод в значительной степени зависит от точности частных классификаций, поэтому точность результатов данного метода обычно не высока. Например, Singh [33] показал, что, если точность классификации двух исходных изображений достигает 80%, точность оценки динамики изменений может быть не более $(0,80 \times 0,80) \times 100\% = 64\%$. Таким образом, при использовании этого метода, необходимо предельное внимание и осторожность при выполнении отдельных частных классификаций [29].

В последнее время было выполнено много исследований, в которых сравнивались методы обнаружения динамики изменения землепользования, чтобы найти метод, который был бы наиболее эффективен. Универсального метода нет, точность результатов использования того или другого метода во многом зависит от корректности обоснования использования того или иного метода применительно к решаемой научной задаче [35].

На основе анализа преимуществ и недостатков вышеописанных методов, в диссертационном исследовании для анализа динамики землепользования выбран и применен метод постклассификации, чтобы получить результаты, которые дают ясное и точное представление об изменениях видов землепользования.

Таблица 1.8 – Методы классификации космических снимков

| Групповые методы | Методы | Характеристики методов | Алгоритмы |
|--|--|--|--|
| Используются ли обучающие образцы или нет | Контролируемая классификация | Определены классы земельного покрова. Достаточные справочные данные доступны и используются в качестве учебных образцов. Подписи, созданные на основе учебных образцов, затем используются для подготовки классификатора для классификации спектральных данных в тематическую карту. | Максимального правдоподобия (maximum likelihood), параллелепипедов (parallelepiped), минимального расстояния (minimum distance), искусственная нейронная сеть. |
| | Неконтролируемая классификация | Алгоритмы на основе кластеризации используются для разделения спектрального изображения на ряд спектральных классов на основе статистической информации, присущей изображению. не используются предыдущие определения классов. Аналитик отвечает за маркировку и объединение спектральных классов в значимые классы. | Алгоритмы ISODATA, K-Means. |
| Используя такие параметры, как средний вектор и ковариационная матрица или нет | Параметрическая классификация | Параметры, такие как средние векторы, ковариационная матрица вычисляется из статистического набора образца, используемого в качестве входных параметров. | Максимального правдоподобия, линейный дискриминантный анализ. |
| | Непараметрическая классификация | Требований к данным не требуется. Непараметрические классификаторы не используют статистические параметры для расчета разделения классов и особенно подходят для включения данных, не связанных с дистанционным зондированием, в процедуру классификации. | Искусственная нейронная сеть, классификатор дерева решений, экспертная система. |
| Какой вид информации о пикселях используется | Попиксельная классификация (Per-pixel classifiers) | Традиционный метод классификации представляет собой комбинацию спектров всех пикселей из данного образца. Каждый пиксель представляет собой информацию конкретного объекта тематики. | Максимального правдоподобия (maximum likelihood), минимального расстояния (minimum distance), классификатор дерева решений, искусственная нейронная сеть. |

| Групповые методы | Методы | Характеристики методов | Алгоритмы |
|---|--|--|---|
| | Субпиксельная классификация (Subpixel classifiers) | Спектральное значение каждого пикселя предполагается линейной или нелинейной комбинацией определенных чистых материалов (или конечных элементов), обеспечивающих пропорциональное членство каждого пикселя каждому члену. | Нечеткая классификация, субпиксельная классификация, спектральный анализ смеси. |
| | Объектно-ориентированная классификация | Сегментация изображения объединяет пиксели в объекты, и классификация проводится на основе объектов, а не отдельного пикселя. Не используются векторные данные ГИС. | eCognition. |
| | Per-field классификация | ГИС играет важную роль в Per-field классификации, интегрируя растровые и векторные данные в классификацию. Векторные данные часто используются для разделения изображения на участки, а классификация основана на участках. Этот метод классификации был введен, чтобы решить проблему неоднородной среды и преодолеть каждый спектр в том же классе на разновременных изображениях. | Классификационные подходы на основе ГИС. |
| На основе выходных данных каждого элемента пространства | Жесткая классификация (Hard classification) | Принимать решения решительно на земных покровах, который каждый пиксель выделяется одному классу. Оценка площади с помощью жесткой классификации может привести к большим ошибкам, особенно из-за грубых данных пространственного разрешения из-за проблемы смешанных пикселей. | Большинство классификаторов, таких как максимального правдоподобия (maximum likelihood), минимального расстояния (minimum distance), искусственная нейронная сеть, дерево решений и опорных векторов. |
| | Мягкая классификация (Soft (fuzzy) classification) | Обеспечение для каждого пикселя мерой степени подобия для каждого класса. Мягкая классификация предоставляет больше информации и потенциально более точный результат, особенно для классификации данных с грубым пространственным разрешением. | Нечеткая классификация, субпиксельная классификация, анализ спектральной смеси. |

| Групповые методы | Методы | Характеристики методов | Алгоритмы |
|--|---|---|---|
| На основе информационного пространства | Спектральная классификация | Чистая спектральная информация используется в классификации изображений. Часто возникает «шумный» результат классификации из-за высокой вариации пространственного распределения одного и того же класса. | Максимального правдоподобия (maximum likelihood), минимального расстояния (minimum distance), искусственные нейронные сети. |
| | Контекстная классификация | Информация о пространственных соседних пикселях используется в классификации изображений. | Итерированные условные режимы, контекстная коррекция «точка» до «точки», контекстуальный классификатор |
| | Спектральная-контекстная классификаторы | В классификации используется спектральная и пространственная информация. Параметрические или непараметрические классификаторы используются для создания исходных изображений классификации, а затем контекстуальные классификаторы реализуются в классифицированных изображениях. | ЕСНО, комбинированные параметрический или непараметрический и контекстные алгоритмы. |

Несмотря на свое значение, методы оценки и создание карт водонепроницаемых поверхностей и применения водонепроницаемых поверхностных данных недостаточно изучены [128]. Многие методы применяются для характеристики и количественной оценки водонепроницаемых поверхностей с использованием либо наземных измерений, либо данных дистанционного зондирования. Полевое исследование с глобальной спутниковой системы определения местоположения (GPS), хотя и дорогостоящие, и отнимающие много времени, может обеспечить надежную информацию о водонепроницаемых поверхностях. Ручная оцифровка с бумажных карт или изображений с помощью дистанционного зондирования (особенно аэрофотоснимков) также использовалась для создания карт водонепроницаемых поверхностей.

В 1970-х и 1980-х годах данные дистанционного зондирования начали набирать популярность в исследованиях природных ресурсов и окружающей среды и использоваться в интерпретационных приложениях, спектральных приложениях и приложениях моделирования водонепроницаемых поверхностей [88]. При рассмотрении методов водонепроницаемого поверхностного картирования, [134] были определены следующие четыре различных подхода: (1) использование планиметра для измерения водонепроницаемой поверхности на аэрофотосъемке, (2) подсчет количества пересечений на сетке с наложением на аэрофотосъемке, (3) проведение классификации изображений и (4) оценка водонепроницаемого поверхностного охвата через процент урбанизации в регионе. В этих обзорах сделан вывод о том, что в 1970-х и 1980-х годах аэрофотосъемка была основным источником данных дистанционного зондирования для оценки и создание карт водонепроницаемых поверхностей. В ряде исследований [27, 128] была доказана возможность использования многозональных космических снимков для определения площади водонепроницаемой поверхности в городском районе.

В настоящее время, получение информации о городских непроницаемых поверхностях по данным спутниковых съемок высокого пространственного разрешения в основном осуществляются с помощью искусственных нейронных сетей или объектно-ориентированных методов [22]. Это связано с тем, что городскую землю

покрывают различные почвенные покровы с близкими спектральными сигнатурами, визуализации оптических изображений недостаточно, чтобы точно оценить водонепроницаемых поверхностей. Например, сообщалось, что воду и оттенки часто путают с темной непроницаемой поверхностью [5]. Таким образом, данные синтеза или интеграции нескольких источников данных дистанционного зондирования использованы, чтобы воспользоваться преимуществами различных изображений для повышения точности картирования [5]. Ранние исследования также показали, что интеграция оптических и данных РЛС с синтезированной апертурой (РСА) может существенно повысить точность классификации изображений и уменьшить неопределенность между городскими непроницаемыми поверхностями и другими типами растительного покрова [3, 5, 6, 20, 23]. Данные РСА с учетом геометрических характеристик поверхностей городских земель, могут дать дополнительную структурную информацию о текстуре, которая может быть важной составляющей данных получаемых с оптических изображений при описании водонепроницаемых поверхностей.

В настоящее время, слияние оптических и радиолокационных данных для картирования водонепроницаемых поверхностей осуществляются главным образом на уровне пикселей. Однако на уровне пикселей Fusion-анализ не подходит для РСА-изображений из-за спекл-шум [20]. Кроме того, характеристика водонепроницаемых поверхностей на уровне синтеза подвержена влиянию представительности выборок пространственных объектов, которые могут внести неопределенность в характеристики водонепроницаемых поверхностей. В данном исследовании, когда говорят о принятии решение на уровне синтеза, то речь ведут о результатах интегральной попиксельной классификации, которую выполняют на основе различных источников данных (оптических или радиолокационных данных) водонепроницаемых поверхностей и коэффициент герметичности (*perVIOUSness*), которая имеет и самостоятельное важное значение для решения целого ряда вопросов и тем в области экологии, с акцентом внимания на глобальные экологические изменения и взаимодействие человека и окружающей среды. Известно, что решение уровня синтеза оказалось потенциально эффективным методом для классификации

растительного покрова, но практически не исследовалась его эффективность для других типов покровов. В то же время синтетический метод классификации изображений показал более высокую результативность по сравнению с традиционным Байесовским подходом.

В последнее время основным направлением совершенствования сегментации и классификации данных дистанционного зондирования с целью обнаружения городских водонепроницаемых поверхностей является разработка субпиксельных алгоритмов на основе объектно-ориентированного метода, искусственных нейронных сетей, предполагающих знание следующей пространственной информации о водонепроницаемых поверхностях, а именно масштабы, расположение, геометрия, пространственная модель.

Выполненный нами обзор научной литературы за последнее десятилетие показывает, что основные методы тематического дешифрирования космических изображений базируются на пиксельных (классификация изображений, регрессия и т. д.), суб-пиксельных (линейного спектрального разделения, неуязвимость в состав фракции растительности и т. д.), объектно-ориентированных алгоритмах и искусственных нейронных сетях. Развиваются также методы, которые базируются на методах слияния разнородной информации, экспертных системах, контекстной информации. Большинство исследователей направляют свои усилия на картографирование городских ландшафтов в различных масштабах и с использованием космических изображений соответствующего пространственного разрешения. Напротив, значительно меньший интерес проявляют исследователи в изучении спектральных и геометрических свойств водонепроницаемых поверхностей.

В арсенале научных исследователей, сегодня имеется ряд программных пакетов [19] созданных на базе известных программных продуктов или ГИС-оболочек, позволяющих проводить по материалам космической съемки среднего пространственного разрешения оценка и картирование непроницаемых поверхностей. На рисунке 1.1 представлено главное окно инструмент непроницаемого поверхностного анализа (ISAT), расширение ArcView 3.x, используется для расчета процента непроницаемой площади поверхности выбранных пользователем

географических зон (например, водоразделов, муниципалитетов, подразделений). ISAT был разработан как партнерство между NEMO и Национальным центром управления прибрежными службами океанических и атмосферных исследований (NOAA). ISAT можно бесплатно скачать с веб-сайта Coast Coast Services Center Digital Coast.

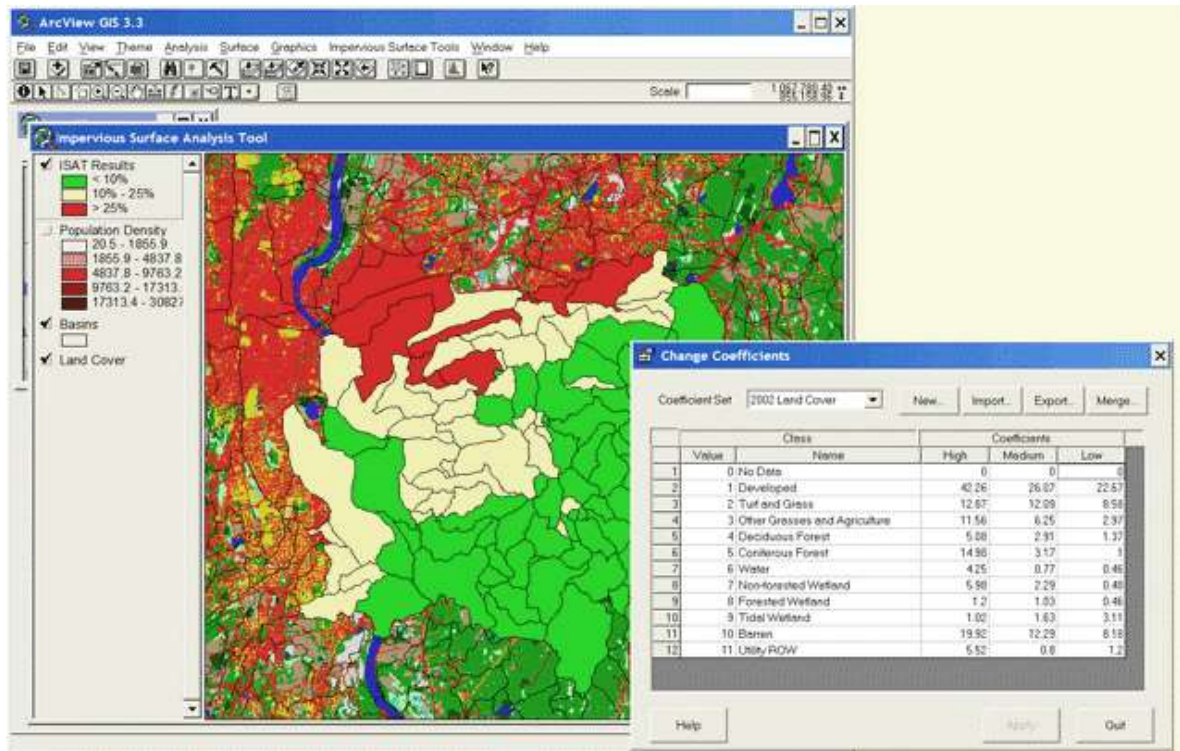


Рисунок 1.1 – Главное окно программного инструмента для анализа непроницаемых поверхностей (ISAT)

Проанализированные выше возможности поиска объектов неприродного происхождения с использованием современных методов обработки многоспектральных данных дистанционного зондирования Земли, указали на наличие существенных ограничений традиционных методов классификации космических изображений. Поэтому, целесообразно выполнять поиск объектов неприродного происхождения на субпиксельном уровне (т.е. с использованием сегментации), причем характеризовать субпиксельный уровень, как спектральными, так и пространственными признаками. При этом пространственные характеристики изображения включать в анализ через учет признаков локальных окрестностей пикселей. Данный подход к извлечению объектов из изображений носит название объектно-ориентированного подхода. В рамках данного подхода объекты создаются с помощью

процесса сегментации изображения, где пиксели, находящиеся в непосредственной близости и имеющие аналогичные спектральные характеристики, группируются в сегмент. Сегменты, обладающие определенными формами, спектральными и пространственными характеристиками, могут быть дополнительно сгруппированы в объекты. Объекты могут быть сгруппированы в классы, которые представляют реальные объекты на поверхности Земли. Объектно-ориентированный процесс похож на традиционный процесс классификации пиксельного изображения, использующий методы контролируемой и неконтролируемой классификации. Вместо того, чтобы классифицировать пиксели, процесс классифицирует сегменты, которые можно рассматривать как субпиксели. Каждый сегмент или субпиксел, представлен набором атрибутов, которые используются инструментами классификатора для получения классифицированного изображения. Характеристики сегментов изображения зависят от трех параметров: спектрального разрешения, пространственного разрешения и минимального размера сегмента. Вы можете варьировать уровень детализации, который характеризует интересующий объект. Например, если вас интересуют все объекты, сквозь которые не проходит свет, а не только отдельные здания, настройте параметр пространственного разрешения (детализации) на малое число; меньшее число приводит к большему сглаживанию и уменьшению количества деталей. Детальное описание используемого в настоящем исследовании объектно-ориентированного метода классификации космических изображений представлено в главе 2.

1.4. Постановка цели и задач исследования

Необходимость информационного обеспечения оценки состояния и прогнозирования изменений площади водонепроницаемых поверхностей в крупных городских агломерациях для научно обоснованной организации устойчивого развития мегаполисов, определила направление, главную цель и задачи исследования.

Цель ниже изложенной диссертационной работы заключается в разработке методики обнаружения и прогнозирования замещения видов землепользования на

водонепроницаемые поверхности по материалам разновременных многозональных космических съемок на примере территории г. Ханой, Вьетнам.

Для достижения поставленной цели были решены следующие задачи:

1. Провести обзорный анализ состояния проблемы водонепроницаемых поверхностей на территории мегаполиса Ханой (Вьетнам) и выявить основные направления исследований. Выполнить анализ современных методов обнаружения водонепроницаемых поверхностей по материалам многозональной космической съемки;

2. Обосновать возможность использования объектно-ориентированного метода для обнаружения водонепроницаемых поверхностей на территории мегаполиса по их космическим изображениям;

3. Разработать методику обнаружения и картографирования водонепроницаемых поверхностей по материалам многозональных космических съемок;

4. Определить типы и содержание карт, актуальных для оценки площадей водонепроницаемых поверхностей на территории мегаполиса;

5. Разработать методику прогноза изменения площадей водонепроницаемых поверхностей с использованием цепей Маркова;

6. Выполнить экспериментальные исследования по обнаружению и прогнозированию площадей водонепроницаемых поверхностей на тестовой территории мегаполиса Ханой, Вьетнам.

2. РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ ОБНАРУЖЕНИЯ И ПРОГНОЗИРОВАНИЯ ЗАМЕЩЕНИЯ ВИДОВ ЗЕМЛЕПОЛЬЗОВАНИЯ НА ВОДОНЕПРОНИЦАЕМЫЕ ПОВЕРХНОСТИ ПО РАЗНОВРЕМЁННЫМ МНОГОЗОНАЛЬНЫМ КОСМИЧЕСКИМ СНИМКАМ

2.1. Особенности спектрально-отражательных характеристик мегаполисов

Как известно, изображения различных природных и антропогенных образований, получаемые аэрокосмическими системами ДЗ, существенно зависят от длины волны электромагнитного спектра. Моделирование получаемых при этих полях яркости одновременно в нескольких спектральных диапазонах предполагает сохранение пространственной организации оптически активных компонентов при переходе от одних участков спектра к другим. В зависимости от спектральных диапазонов, в которых производится наблюдение, изображения различных объектов, являющихся элементами моделируемой сцены, могут либо сильно контрастировать друг с другом, либо быть неразличимы. При этом границы локальных неоднородностей физической среды, обусловленных элементами сцены или их внутренней структурой, не зависят от спектральных диапазонов наблюдения, в то время как текстура поля яркости может изменяться при переходе от одной области спектра к другой за счет сглаживания или усиления контрастов.

Космическим изображениям присуща нестационарность и пространственная неоднородность. Нестационарность космических изображений, связана прежде всего с разнообразием объектного состава исследуемой территории, что изменяет как характер текстуры в фиксированной области изображения, так и абсолютные значения яркости в каждом его элементе. Кроме того, нестационарность обусловлена изменением условий освещения и затенением наблюдаемых элементов. Это изменяет абсолютные значения яркости каждого элемента изображения и вносит в фиксируемые сцены дополнительные, зависящие от положения Солнца, компоненты. При моделировании изменений объектного состава

необходимо обеспечить, с одной стороны, “узнаваемость” каждого конкретного объекта на изображениях, разделенных временными промежутками, а с другой стороны, изменение положения и геометрической формы каждого объекта со временем.

К источникам пространственной неоднородности космических изображений относятся: изменение угла наблюдения в пределах поля обзора, приводящее к соответствующим геометрическим искажениям; изменение типа зондируемой поверхности в пределах поля обзора, вызывающее изменение текстуры и значений яркости в соответствии с географическими координатами; наличие разрывной облачности, которая случайным образом располагается в кадре; горизонтальная неоднородность атмосферы, приводящая к увеличению или уменьшению яркости при прочих равных условиях и т.п.

Необходимость учета тех или иных механизмов, обуславливающих пространственную неоднородность полей яркости и уровень генерализации их моделей, определяются исходными требованиями к решаемой задаче. Результаты исследований пространственных неоднородностей поля уходящего излучения показывают, что в отражательной части оптического спектра наблюдаемые поверхности являются ламбертовскими (кроме водной поверхности, снега и льда в области солнечного блика). Мегаполисы имеют индикатрисы более сложной формы. Значения спектральных альбедо также значительно различаются для различных состояний зондируемой поверхности.

В области спектра, где превалирует тепловое излучение, различия температур объектов земной поверхности между собой, как правило, значительно меньше, чем температур объектов на ней.

Но из данных и результатов исследовательских и практических спектрометрических работ по изучению спектральных характеристик природных и антропогенных объектов, опубликованных в открытой печати [20, 21] можно получить данные об осредненных величинах спектральных яркостей горных пород, почв и растительности, которые приведены нами на рисунках 2.1 - 2.5.

Отражательная и поглощательная способности горных пород.

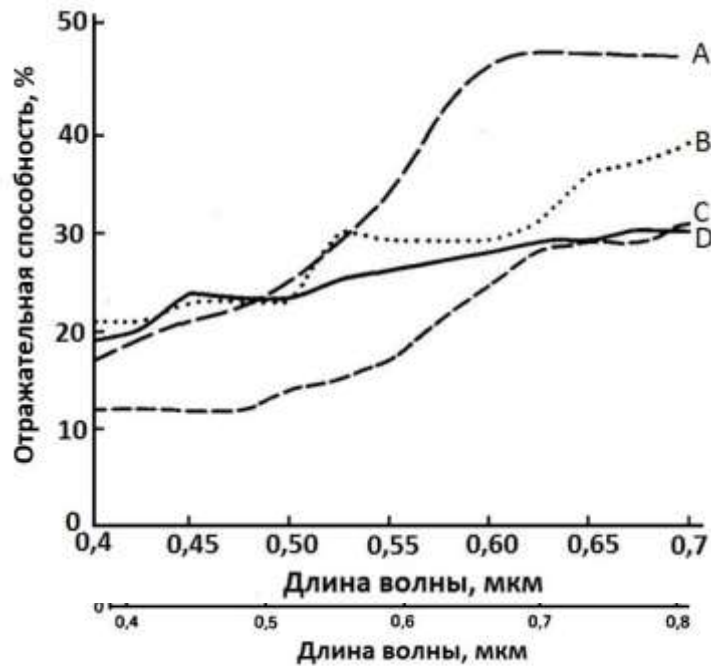


Рисунок 2.1 – Спектральные характеристики различных типов горных пород: светло-коричневого песчаника (А), серого известняка (В), красного алевролита (С) и серого песчаника (D) [21].

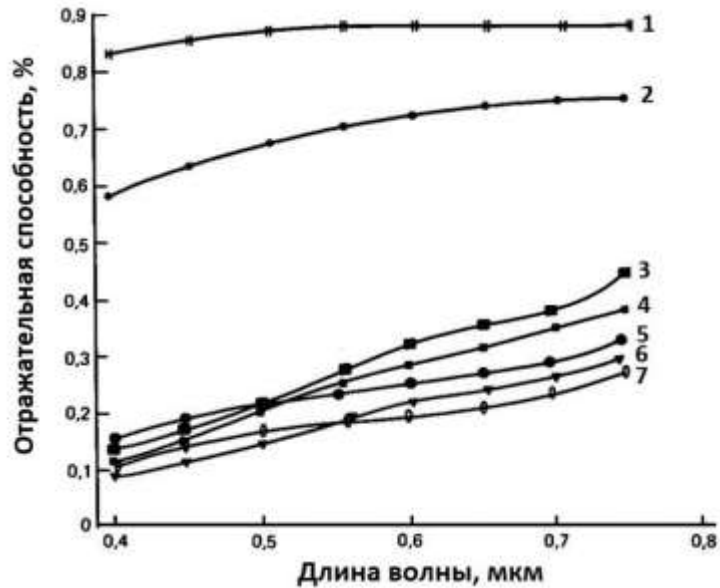


Рисунок 2.2 – Спектральные характеристики свежей выветрелой поверхности различных горных пород. 1-стандартная поверхность; 2-кварцевый песчаник (свежий скол); 3-гранит (свежий скол); 4-гранит, покрытый зеленым лишайником; 5-известняк выветрелый; 6-гранит выветрелый; 7-доломит выветрелый [21].

Отражательная и поглощательная способности почв.

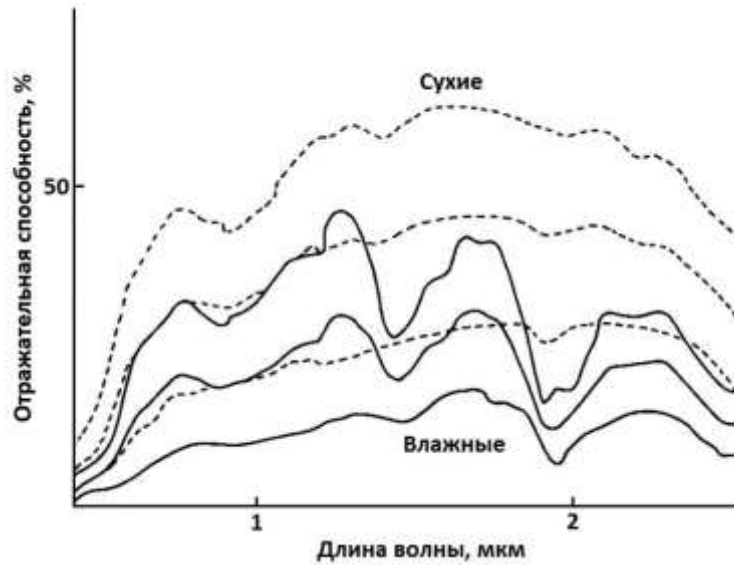


Рисунок 2.3 – Спектральные характеристики сухих и влажных песчаных почв [21].

Почва отражает падающий на нее световой поток очень слабо. С увеличением длины волны падающего излучения мощность отраженного потока энергии от поверхности почвы увеличивается. Наиболее ярко спектральная характеристика почв выражена в красной части спектра, в ближнем, среднем и тепловом диапазонах инфракрасного излучения [26].

Минеральный состав почвы, оказывает доминирующее влияние на спектральные характеристики почвы.

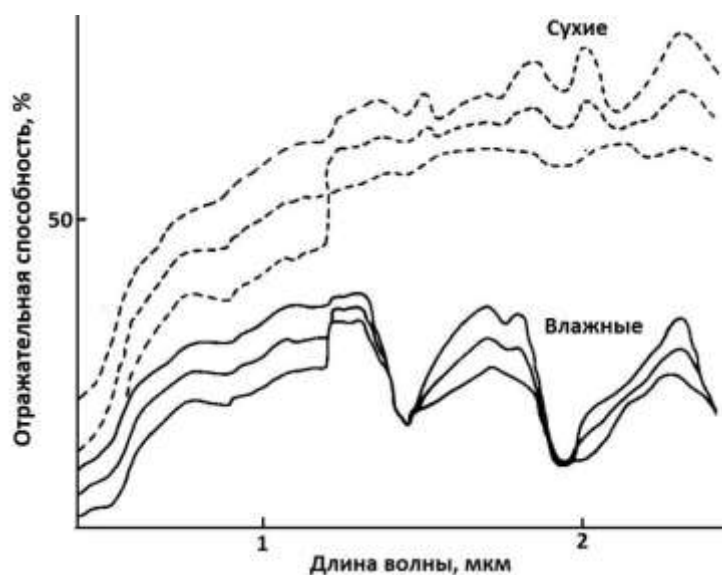


Рисунок 2.4 – Спектральные характеристики илистых почв, штат Арканзас, в видимом и ближнем ИК диапазонах [23].

Влажные и мокрые почвы на многоспектральных космических изображениях имеют более темные тона, чем аналогичные сухие почвы. Участки сухих и влажных почв распознаются и по величине спектральной яркости. Из анализа поведения коэффициента спектральной яркости можно сделать заключения о свойствах нижнего почвенного слоя и его основания, или субстрата (пористости, проницаемости, прочности), что в свою очередь позволяет судить о возможности его инженерного использования, о его дренировании, а также о содержании в нем грунтовых вод [26].

Спектральные характеристики растительности.

Спектральные характеристики растений определяются в основном способностью их листы отражать, поглощать и пропускать солнечную энергию. Поверхность листа почти прозрачна для солнечного излучения в видимом и ближнем инфракрасном диапазонах. Лишь малая часть потока солнечной энергии отражается от поверхности листьев.

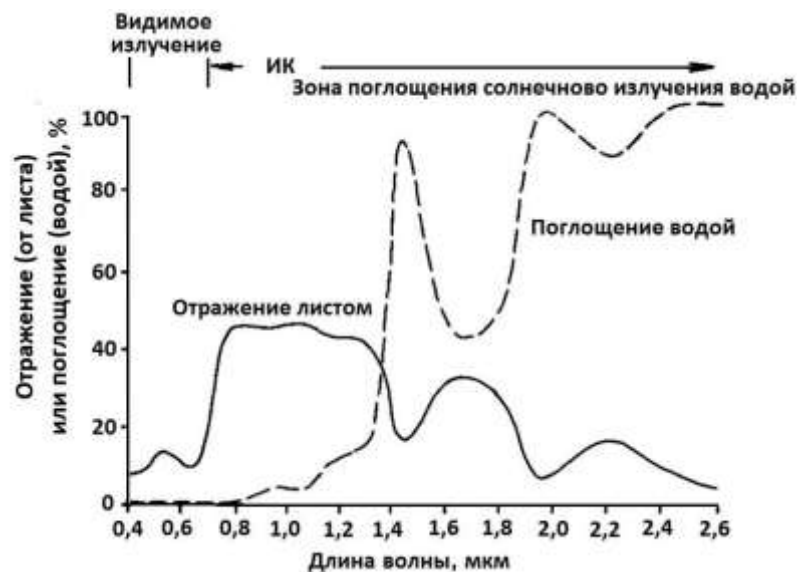


Рисунок 2.5 – Спектральные характеристики здоровых зеленых листьев и спектральная поглощательная способность воды [23].

Спектрометрические измерения показали, что кривые спектра отражения различных типов растительности и различных растительных сообществ имеют явно выраженные особенности в определенных интервалах длин волн как в положении пика спектра, так и в конфигурации кривой спектрального отражения (рисунок 2.5). Эти характерные особенности спектрального отражения растительного

покрова позволяют проводить тематическое дешифрирование разных видов растительности по данным космического зондирования и в сочетании с другими дешифровочными признаками (например, текстурными) относить исследуемый растительный объект к растительности определенного вида.

Помимо спектров отражения, характерных для базовых природных объектов, в соответствии с работой Root и Mille [82] приведем характеристики спектров отражения для некоторых наиболее распространенных объектов в городах, таких как бетон, асфальт, гравий, кровля и голая почва (рисунки 2.6, 2.7).

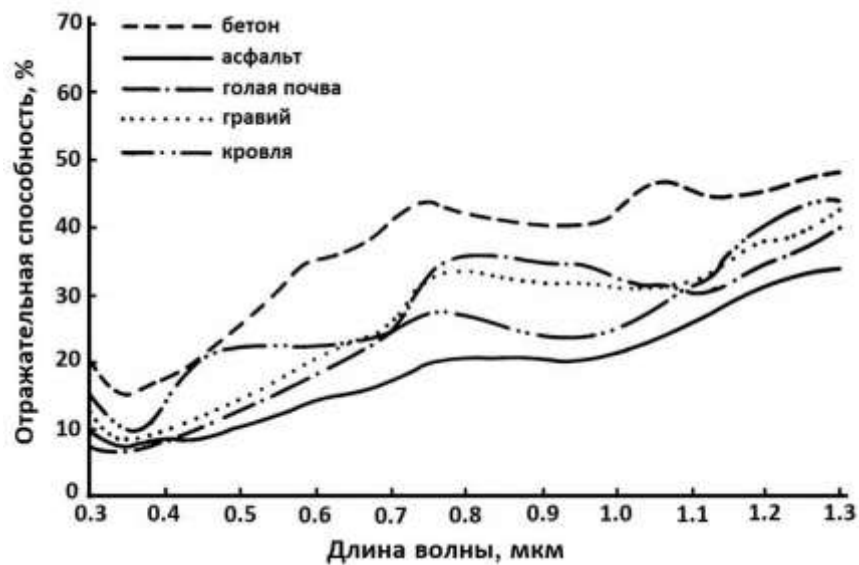


Рисунок 2.6 – Спектральная отражательная способность типичных объектов в городском ландшафте [82].

Мы видим, бетон имеет самую высокую отражательную способность, особенно в инфракрасной области спектра. Объекты имеют кривые спектральной отражательной способности, которые по-разному изменяются в зависимости от длины волны. Голая почва и гравий имеют более высокие значения отражательной способности в видимой и ближней инфракрасной областях. Асфальт и кровля имеют более низкие и стабильные значения отражательной способности. Таким образом, состав почвы (органических и неорганических соединений) будет влиять на спектральную отражательную способность. В зависимости от амплитуды спектральной отражательной способности графика будет отличаться. Основные факторы, влияющие на спектральную отражательную способность поверхности земли – это структура почвы, влажность почвы и состав органических соединений, неорганических почв.

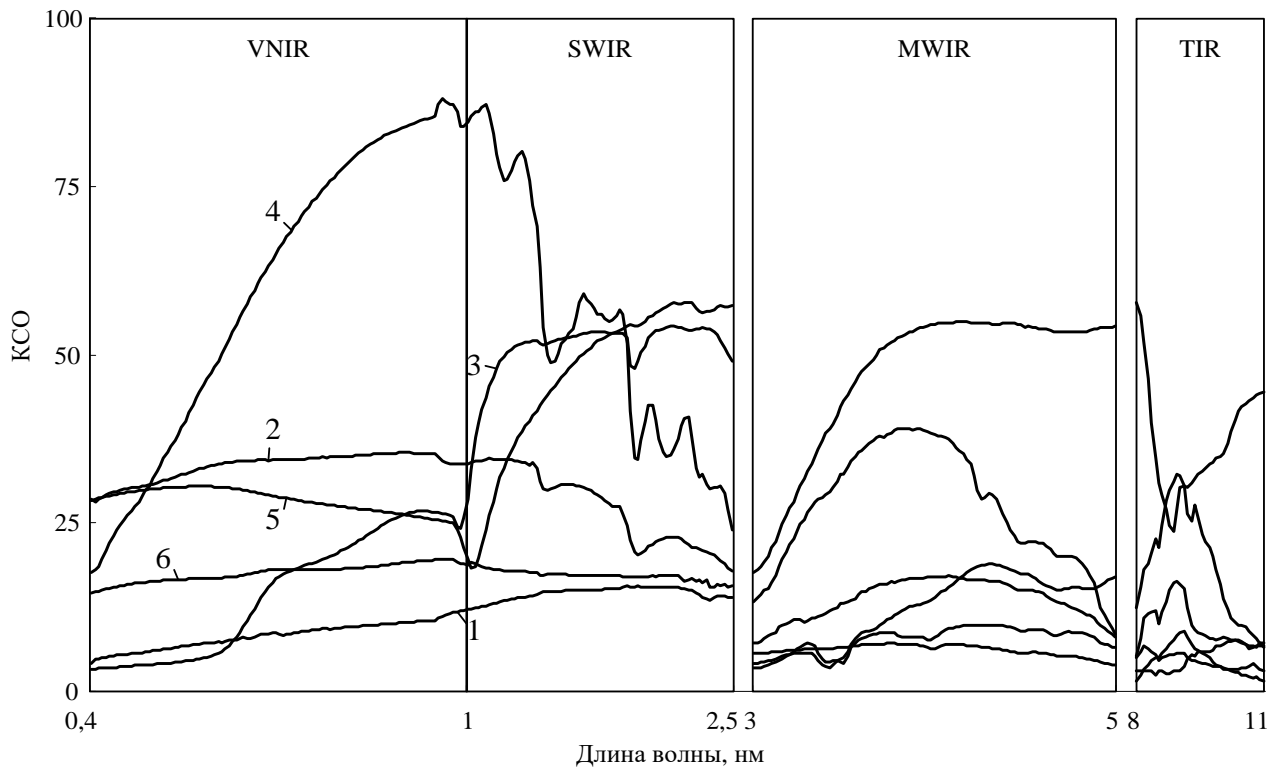


Рисунок 2.7 – Спектральные характеристики антропогенных объектов:

1 – асфальт; 2 – бетон; 3 – кирпич; 4 – строительная древесина;

5 – оцинкованная сталь; 6 – шифер

Вышеприведенный аналитический обзор особенностей спектральных характеристик основных классов природных и антропогенных образований осознанно представлен в расширенном виде, так в настоящее время в научной литературе отсутствует систематизированное описание спектров отражения и поглощения природных и антропогенных объектов, и данный обзор в определенной мере восполнит этот недостаток.

2.2. Определение классов землепользования

Определение классов землепользования для построения аннотированных систем является важным и необходимым условием для успешной классификации данных дистанционного зондирования с целью определения изменений в землепользовании [32]. Классы землепользования определяются на основании содержания задачи пользователя, пространственного разрешение данных дистанционного

зондирования и в соответствии с имеющимися алгоритмами классификации. Что касается методологии, то земной покров и изменения в нем определяются непосредственно из данных дистанционного зондирования. Напротив, землепользование, а также информация о землепользовании в основном получают путем детального анализа полевых данных или путем создания вторичных данных, таких как данные обследования сельского хозяйства, населенных пунктов, не отражаемых непосредственно по данным дистанционного зондирования, но мы можем извлечь эту информацию из сопоставления данных о земельном покрове и землепользовании [103, 129].

Определение классов землепользования с использованием систем почвенного покрова по результату дешифрирования данных дистанционного зондирования изображений ученые делают уже давно и до сих пор эти исследования еще дорабатываются и существуют глоссарии различных систем землепользования [60, 129, 130]. Louisa Jansen в свой исследовании [129] для маркировки классов землепользования предложил следующие правила:

1. Определить основные функции землепользования в районе исследования;
2. Выявлять и маркировать классы землепользования из различных функций основных категорий землепользования;
3. Необходимо провести полевое обследование, в котором собираются данные о землепользовании в районе исследования, особенно старые картографические данные;
4. Наблюдения в соответствующих областях в развитых странах для определения набора правил;
5. Применять последний набор правил, описывающих области земельного покрова, которые привели к решению о создании набора данных о землепользовании.

Таким образом, основываясь на вышеуказанных правилах и принципах, таблица аннотирования землепользования в районе изучения Ханоя устанавливается в соответствии с типами землепользования, определенными Законом о земле [133].

Таблица 2.1 – Классы землепользования на исследуемой территории в Ханое

| Название | Подробное описание каждого типа земли |
|-------------------------------|---|
| Водонепроницаемые поверхности | Покрытиями являются поверхностями в основном искусственных сооружений таких, как дороги, тротуары, проезды и парковки, которые покрываются непроницаемыми материалами, такими как асфальт, бетон, кирпич, шифер, камень и крыши ... |
| Смешанная растительность | Это тип земли, смешанной в жилых районах, но для выращивания фруктовых деревьев или овощей, придорожных деревьев и садов... |
| Растительный покров | Древесная растительность; кустарники; травянистая; растительность; теплицы, оранжереи; лесные кварталы; заболоченность; вырубки; ветровалы; лесопосадки. |
| Открытые грунты | Промышленные территории; изрытые поверхности; участки земли, занятые отходами. |
| Поверхностные водные объекты | Озёра, реки, пруды, ручьи, источники, родники, канала, обводненного карьера. |

2.3. Методика обнаружения и прогнозирования замещения видов землепользования на водонепроницаемы поверхности по материалам разновременных многозональных космических съемок

2.3.1. Общее описание методики

В настоящее время существует множество методов классификации для данных дистанционного зондирования изображений, но в целом, подходы к классификации цифровых изображений могут быть сгруппированы в следующие основные группы: контролируемые и неконтролируемые, или параметры классификации четкие (нечеткие), или жесткие и мягкие, или на основе пикселя, субпикселя и объекта [32]. Тем не менее, методы основанные на методе классификации пикселей по-прежнему востребованы в мире и наиболее широко используются [111, 112]. Но точность результатов классификации такого подхода не могут удовлетворить

потребности многих исследований, в первую очередь из-за проблемы учета влияния каждого пикселя смеси [32].

Недавние исследования указывают, что явно прослеживается тенденция комбинации двух или более методов классификации с целью улучшения результатов классификации. Важным шагом в этой комбинации является разработка соответствующих правил для объединения результатов от различных методов классификации, которые способствуют реализации максимума преимуществ каждого подхода к классификации.

Выбор метода классификации разновременных космических снимков диссертации.

В диссертации был выполнен анализ и выбор метода оценки динамики методом постклассификации. Точность данных динамики после классификации данным методом зависит от точности каждого отдельного этапа частной классификации. Между тем, при извлечении информации о изменениях землепользования по разновременным космическим изображениям SPOT-5, было обнаружено влияние смещения спектров объекта того же класса на разные периоды времени на точность результатов классификации. Поэтому, было принято решение о применении метода Per-field классификации (Per-field classification) с целью исключения неоднородностей и смещения спектров объектов того же класса на разные периоды времени. Этот метод требует знания точных векторных данных о границах объекта в области интереса. В диссертации была разработана методика комплексного использования методов объектно-ориентированной классификации и Per-field классификации, для получения стандартных результирующих векторов классификации.

2.3.2. Подготовительный этап (сбор и анализ данных многозональной космической съемки)

Создание карт состояния землепользования / земельных покровов по данным спутниковых изображений является сложным процессом, и необходимо учитывать множество факторов. данный процесс включает в себя следующие этапы: (1) отбор

типов данных и изображений дистанционного зондирования, (2) определение и выбор класса землепользования сообразно, (3) предварительная обработка изображений, (4) выбор соответственного метода классификации, (5) выбор методов для оценки точности результатов классификации.

Поставленная задача, масштаб области исследования, экономические условия и навык анализа специалистов являются важными факторами, влияющими на выбор данных дистанционного зондирования, методы классификации и качество результатов классификации [32].

Выбор данных дистанционного зондирования

Выбор соответствующих данных дистанционного зондирования является первым важным шагом для успешной классификации [113, 114]. Это требует учета таких факторов, как потребности пользователей, размер и характеристики исследуемого района, доступность различных изображений и их характеристик, затрат и ограничений времени и опыта специалистов в области использования выбранного изображения. Понимание о сильных и слабых сторонах всех видов различных данных датчика имеет важное значение для выбора соответствующих данных дистанционного зондирования для классификации изображений. В некоторых исследованиях, рассмотрены и сравнены характеристики типы данных дистанционного зондирования [110, 104].

Требование пользователя определяет сущность классификации и масштаб областей исследований, которые влияют на выбор пространственного разрешения изображений дистанционного зондирования. В общем, для крупного масштаба области классификации (такие масштабы как, район, город, провинциальные и на национальном уровне), требуются изображения с высокими и средним пространственным разрешением как IKONOS, SPOT, Landsat, Terra ASTER [32].

2.3.3. Предварительный анализ и обработка многозональных космических снимков

Предварительная обработка изображений может включать в себя

обнаружение и восстановление испорченных строк сканирования, геометрическую коррекцию, спектральную нормализацию, коррекцию влияния атмосферных условий и корректировки влияния рельефа. Геометрическая коррекция изображений является необходимым шагом при комбинации различных источников данных в процессе классификации [105].

В многих исследованиях и статьях эта тема предварительной обработки космических изображений подробно изучена [106]. Между тем, если в классификации используется только одно изображение, то может быть не требуется коррекция влияния атмосферных условий [107]. Но когда используемые данные являются разновременными или полученными с помощью различных датчиков, то обязательно необходимо изучать влияние атмосферных условий [32]. Это особенно верно, когда используемые данные получаются от спутника, у которого есть несколько датчиков, например, SPOT или Landsat TM и радиолокационных данных, интегрированных для классификации и дешифрирования изображений. Топографическая коррекция является важным аспектом, если область исследования характеризуется большим высотным перепадом [108].

Между тем, в диссертации рельеф области исследования является относительно ровным, поэтому нет необходимости корректировать изображения из-за влияния рельефа. Кроме того, используемые изображения были получены от датчиков одного и того же SPOT-5 спутника. Метод классификации разновременных изображений применяется к отдельным изображениям, затем оценивается динамика на основе результатов частных классификаций (метод оценки динамики пост-классификации), поэтому нормализация датчиков и атмосферная коррекция для этих изображений не является необходимой.

Как мы указали ранее, целью данной диссертации является решением задач исследования динамики и конверсии типов землепользования за период 2003-2011 в городе Ханой и прогнозирования конверсии в будущее время. Поэтому необходимо выбрать разновременные изображения для однотипных сезонов съемки. Из вышеизложенных соображений, в диссертации используются изображения SPOT-5, полученные во Вьетнамском национальном департаменте

дистанционного зондирования. Характеристики используемых изображений приведены в таблице 2.2.



(a)

(б)

(в)

Рисунок 2.8 – Многозональные снимки SPOT-5 на районы города Ханой, на 24.06.2003 (a), 21.08.2007 (б) и 12.12.2011 (в), RGB = NIR:RED:GREEN

Таблица 2.2 – Данные о используемых изображениях SPOT-5

| № | Спутник | Сенсор | Столбец/ строка | Дата съёмки (дд/мм/гггг) | Пространственное разрешение (м) | Диапазоны |
|---|---------|--------|--------------------|-----------------------------|------------------------------------|-----------|
| 1 | SPOT-5 | HRG | 269/307 | 24/06/2003 | 10 | 1-4 |
| 2 | SPOT-5 | HRG | 270/308 | 21/08/2007 | 10 | 1-4 |
| 3 | SPOT-5 | HRG | 270/308 | 12/12/2011 | 10 | 1-4 |

Перед проведением классификации проводился процесс предварительной обработки этих изображений. Поскольку изображения SPOT-5 были получены на уровне 1A, модель орбитальной модели Push-broom SPOT-5 использовалась для геокорректирующих данных SPOT-5 с наземными контрольными точками (GCPs), полученными из карты землепользования в масштабе 1:10 000. Следует отметить, что цифровая модель высот для Ханоя не использовалась, поскольку эта область довольно плоская. Затем эти полученные изображения проецировались на проекцию UTM (VN2000) (рисунок 2.8). Для решения эффектов, связанных с разным временем приобретения, также выполнялось уменьшение мутности и атмосферная

коррекция для этих изображений. На следующем шаге комбинация гомоморфного фильтра и соответствующего среднего отражения в обоих методах туманного/прозрачного региона была использована для удаления мутности канал SPOT-5. В результате изображения отражательной способности поверхности были получены путем удаления атмосферного эффекта с помощью, полученной аэрозольной оптической глубины с использованием MOTRAN 4.0 [120]. Наконец, контрастное растяжение и пространственное фильтрование использовались для повышения качества этих изображений.

2.3.4. Алгоритмы и методы дешифрирования различных типов земных покровов

Схема тематической обработки многозональных космических изображений с целью оценки доли водонепроницаемых поверхностей в исследуемом районе представлена на рисунке 2.9. В разработанной нами методике тематическая обработка многозональных изображений базируется на комплексном использовании двух методов классификации: объектно-ориентированной классификации и Per-field классификации.

Метод объектно-ориентированной классификации (Object-oriented classification). В последние годы, в научной литературе [36-40] большое внимание уделяется развитию нового метода классификации цифровых спектрально-зональных космических изображений земной поверхности, основанного на использовании объектно-ориентированных алгоритмов тематического дешифрирования. В отличие от традиционных методов, метод объектно-ориентированной классификации основывается не на отдельных пикселях изображения, а на тематических полных объектах, которые могут распознаваться на исследуемом изображении невооруженным глазом. В этом методе рассматривают не только спектральные значения отдельных пикселей изображения, но и форму, текстуру классифицируемых объектов и отношения между ними.

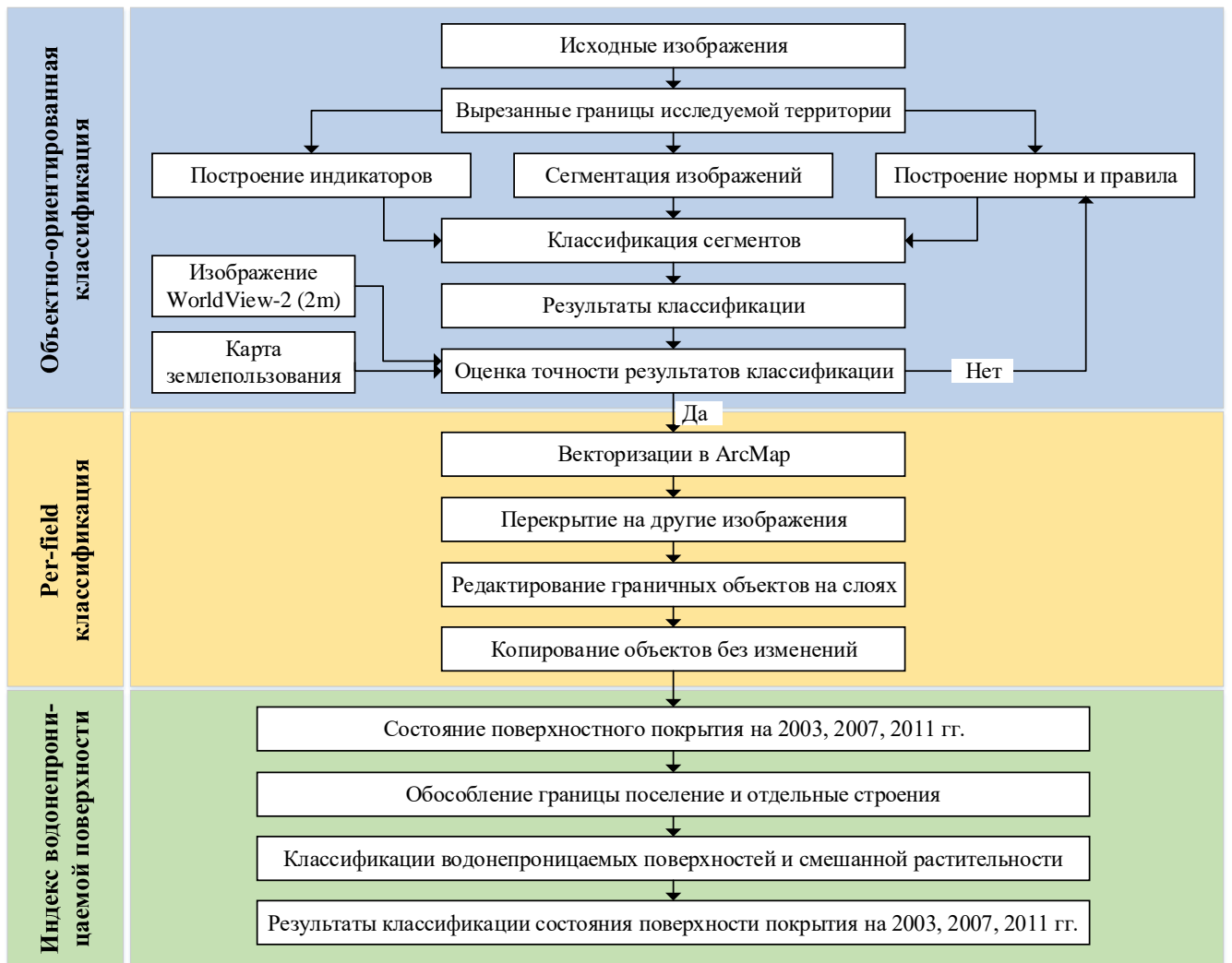


Рисунок 2.9 – Схема тематической обработки многозональных космических изображений для выделения водонепроницаемых поверхностей

Метод объективно-ориентированной классификации становится более популярным, чем другие методы классификации из-за его более широких возможностей в области сегментации изображений, широкого распространения спутниковых изображений с высоким и сверхвысоким пространственным разрешением.

Многие исследования использовали различные виды космических изображений, изучения эффективности этого метода классификации. Так, например, Gao Yan, Sun Xiaoxia и его коллеги [42, 43] с использованием данных QuickBird; Bauer и Steinnocher [44]; Martin и Joseph [45] использовал данные IKONOS с разрешением 4m; Kressler [28] использовали KOMPSAT-1; Oruc и Buyuksalih [46]. Pham Cu Van [132] использовал данные космических снимков SPOT-4. Результаты их исследований показывают, что метод объективно-ориентированной классификации по

точности классификации дает результаты выше, чем методы попиксельной классификации.

Таким образом, для изучения изменений землепользования с требованием к результатам классификации достижения высокой точности, выбор метода объективно-ориентированная классификация вполне обоснован для решения поставленной задачи. Этот метод считается более эффективным, потому что он имеет возможность интеграции спектральных данных с другими данными, такими как тематические карты и знания экспертов для дополнения процесса классификации изображений с целью повышения уровня доверия к результатам дешифрирования [46-48].

Процесс объектно-ориентированной классификации может быть произведен в два основных этапа: кратномасштабная сегментация изображения и классификация сегментов на основе спектральных, пространственных и других характеристик.

Шаг 1: Кратномасштабная сегментация изображения

Сегментацией изображения является процесс его расщепления на более мелкие изображения (сегменты) на основе следующих критериев: цвет (color), форма (shape), компактность (compactness), гладкость (smoothness). Отметим, что выбор масштаба параметров (scale parameter) сегментации является очень важным и оказывает непосредственное влияние на размер выделенных сегментов в исходном изображении. Таким образом, в зависимости от типа спутниковых изображений, величины и степени разделения объектов на исследуемом изображении, выбранные параметры могут существенно различаться. Качество сегментации изображений напрямую влияет на результаты классификации изображения [41, 115].

Многомасштабная сегментация изображений (multi-resolution segmentation) в используемом нами программном пакете eCognition осуществляется следующим образом. В начале процедуры каждый пиксель представляется отдельным объектом, затем смежные пиксели объединяются для формирования больших по размеру сегментов согласно критерию локальной гомогенности. В качестве такового критерия могут использоваться спектральные признаки, текстурные характеристики (гладкость, компактность) или их вариации. Пара объектов изображения с

наименьшей разницей значений критериев, подлежит слиянию. Процесс завершается, когда наименьшая разница значений критериев превышает определяемый пользователем порог. Поэтому повышение порога позволяет провести больше слияний и, следовательно, получить более крупные объекты (сегменты), и наоборот.

В общем, процесс сегментация изображений выполняется на основе следующих основных этапов:

- Выбор алгоритма сегментации изображений в eCognition. Обычно используется алгоритм многомасштабной сегментации изображений (multi-resolution segmentation), который уменьшает неоднородности объектов с определенным разрешением. Этот алгоритм выполняется на основе выбора веса таких параметров, как форма (shape), цвет (color), компактность (compactness), гладкость (smoothness).

- Выбор масштаба (Scale parameter): это важный шаг в интерпретации информации содержащейся в изображении и применяется на основе размера пикселя. Этот параметр определяет размер объекта в процессе сегментации. Чем больше этот параметр, тем больше размер объекта и наоборот.

После того как вышеописанный процесс с выбранными параметрами, завершен, результаты процесса сегментации изображения находятся в зависимости от заданных параметров. Поэтому используются визуальный метод и координация с методом оцифровки границ объектов на изображении, чтобы проверить и определить какая совокупность параметров процесса дает лучший результат сегментации.

Шаг 2: Установка правил и классификации

- В процессе обработки изображений, правила (Rule set) включают в себя критерии установленные таким образом, чтобы объекты могли быть отделены друг от друга для классификации изображений. Выбор алгоритма и точное определение порогового значения является решающим шагом в процессе точной классификации изображении.

- Обследование характеристик изображения объекта очень важно для нахождения порогового значения (threshold). Каждый объект содержит информацию изображения различных атрибутов. Информация атрибутов может содержать сведения о спектре класса, яркости, форме, расположении, структуре, области,

расстоянии до края справа, левого края изображения.

- Использование пространственных спектральных индексов в процессе построения правил позволяет легче разделять объекты на изображении. Есть много показателей используемых для классификации. Их выбор производится в зависимости от объекта исследования на изображении.

б. Метод Per-field классификации (Per-field classification)

Метод Per-field классификации создан для решения вопроса неоднородности окружающей среды, и есть много прикладных исследований утверждающих, что этот метод был эффективным в повышении точности результатов классификации изображения [49-51]. Попиксельный метод часто дает ошибочное отнесение отдельных пикселей к другим близким классам (называемые зонами) в виде отдельных мелких объектов [51]. Геоинформационная система (ГИС) предоставляет средства и инструменты для выполнения классификации путем сортировки векторных и растровых данных [50, 52]. Векторные данные используются для разделения исходного изображения на части, и классификация проводится на основе выделенных фрагментов, таким образом удастся избежать спектральных ошибок.

Тем не менее, этот метод трудно применить, потому что на каждый регион часто оказывают влияние такие факторы, как спектральные характеристики и пространственное разрешение данных дистанционного зондирования, размер и формы объектов в реальном месте, определение границ в области расположения объектов [53]. Кроме того, трудности в обработке моделей векторных и растровых данных, влияют на широкое использование этого метода классификации. Данные дистанционного зондирования имеют растровый формат, в то время как большинство данных ГИС сохраняется в векторном формате, представляющем географические объекты (точки, линии и многоугольники).

Таким образом, по существу, метод Per-field классификации является совмещением спектральных данных с векторными данными. В частности, векторные данные являются границами объектов на земле, которые определяются с помощью таких методов, как прямое измерение поля; оцифровка с карт; из материалов дистанционного зондирования. Этот метод осуществляется на основе двух основных

этапов: (1) определение границы объектов на земле; (2) совмещение границ объекта на земле с изображениями, полученными в разное время, чтобы извлечь информацию об использовании земель.

Этап 1: Определение границы объектов на земле:

Границы объектов на земле определяются по данным топографических карт, карт землепользования или из данных дистанционного зондирования с помощью техники для определения границ (edge detection) и техники сегментации изображения (segmentation).

Этап 2: Совмещение границ объекта на земле с изображениями на разное время, чтобы извлечь информацию об использовании земель:

После определения границ объектов на земле, эти границы накладываются на изображение на заданные моменты времени. Участки с однородными пикселями, они описываются информацией землепользования для этой группы пикселей. Области со смешанными пикселями и редактирование граничных объектов осуществляется таким образом, чтобы каждая новая область земли включала в себя только чистые пиксели. Затем мы продолжаем присваивать информацию о слоях землепользования для новых районов на основе землепользования информации групп пикселей. Этот процесс выполняется в свою очередь, на каждом слое объекта и идентифицируется в области.

Таким образом, для Per-field классификации методов ГИС играет важную роль в классификации каждого конкретного объекта. В частности, вектор данных часто используется, чтобы разделить исходное изображение на небольшие разные фрагменты и классификация основана на таких маленьких частях, чтобы избежать существенных спектральных изменений в том же классе. В диссертации выбран метод совмещения объектно-ориентированной классификации с Per-field классификации с целью получения точного результата классификации типов земных покровов, затем результаты классификации экспортируются в программу ArcMap, где они преобразуются в векторные данные, представляющие фактические границы объекта и накладываются на изображение на разные времена, чем и завершается классификация изображений методом Per-field.

2.4. Прогнозирование замещения видов землепользования с помощью цепей Маркова в крупных городских агломерациях

В последние годы глобальные изменения окружающей среды стали одной из самых областей интенсивных исследований на международном уровне. История землепользования и роста городов показывает, что городские районы являются наиболее динамичными местами на поверхности Земли. Несмотря на важное региональное экономическое значение городов, следует учитывать, что рост городов оказывает значительное негативное воздействие на окружающую экосистему. В первую очередь это касается процесса конверсии видов землепользования - динамичного, широкомасштабного процесса, стимулирующего антропогенные факторы, которые в значительной степени влияют на природные экосистемы, приводя к повышению уровня их урбанизации.

Данные дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) стали жизненно важными для картирования особенностей земных ландшафтов и инфраструктур, управления природными ресурсами и изучения изменения окружающей среды [76]. Благодаря созданию более совершенных технологий получения и автоматизированного тематического дешифрирования ДЗЗ, материалы космических съемок высокого разрешения стали одним из наиболее оперативных, надежных и эффективных источников информации для мониторинга состояния и динамических изменений в землепользовании [85, 86].

Модели процесса изменений в землепользовании делятся на две группы: модели, основанные на регрессии и пространственных переходах [87-89]. Большинство исследований использует регрессионный подход, который связывает места изменения в землепользовании с набором явных пространственных переменных и использует логистические модели [90-92] и гедонистические ценовые модели [83]. Модели пространственного перехода часто относятся к моделированию клеточного автомата, которые позволяют прогнозировать будущее развитие землепользования на основе вероятностных оценок с помощью метода Monte Carlo или других методов [93, 94]. Однако одним из

ограничений для разработки таких моделей является недостаточная прозрачность инструментов моделирования для описания процессов изменений с помощью нынешнем поколении систем дистанционного зондирования и ГИС. Не менее важен вопрос доступности данных [87]. Кроме того, лишь в немногих исследованиях предпринимались попытки связать дистанционное зондирование со спутников и ГИС со стохастическими методами моделирования в исследованиях изменений в землепользовании, несмотря на то, что данные методы для исследования таких связей стали вполне пригодными благодаря достижениям в области технологий ГИС и их интеграции с дистанционным зондированием [95].

Из всех имеющихся моделей моделирования стохастических процессов Марковская модель наиболее широко использовалась для моделирования изменений в землепользовании, включая как городские, так и не городские районы в больших пространственных масштабах. Её применимость и осуществимость были подтверждены во многих научных статьях, а результаты её применения согласуются с экспериментальными данными [96-99].

В рамках диссертационной работы были выполнены научные исследования, направленные на изучение изменений, которые произошли в землепользовании на территории мегаполиса Ханой за период 2003 – 2011 годы. Временной ряд многозональных изображений SPOT-5, охватывающих указанный период времени, использовался для получения и анализа динамики изменений в землепользовании путем комбинированного использования технологий дистанционного зондирования и стохастического моделирования. Была также предпринята попытка прогнозирования землепользования на 2019 и 2027 годы с использованием модели Маркова. Модель представляет собой описание пространственного перехода землепользования в мегаполисе Ханой из одного состояния в другое, основанное на том, что области перехода и их вероятности генерируются из временного ряда карт землепользования, с последующим прогнозированием конверсии видов землепользования на определенное время в будущем [100].

Марковская модель.

Марковские цепи являются удобным инструментом для моделирования изменений в землепользовании, когда изменения и процессы в ландшафте носят стохастический характер. Марковский процесс – это процесс, в котором будущее состояние системы может быть смоделировано непосредственно на основе предшествующего состояния. Марковская модель будет описывать изменение землепользования от одного периода к другому и использовать его в качестве основы для прогнозирования будущих изменений. Это достигается путем вычисления матрицы вероятности перехода изменения в землепользовании с одного временного периода на другой, которая показывает характер изменений, и в то же время служит основой для прогнозирования на более удаленный период времени [100]. Марковская модель имеет ясную методологическую основу, с помощью которой можно расчленивать и исследовать динамическую систему [96-99, 101]. Многочисленные исследования подтвердили адекватность моделей Маркова [99, 102].

Построение стохастической модели конверсии видов землепользования с использованием цепей Маркова.

Марковская модель обобщает стохастический процесс с независимыми значениями и может быть сформулирована следующим образом:

- конверсию видов землепользования можно охарактеризовать взаимоисключающими состояниями землепользования, которые покрывают полный спектр изменений землепользования;
- выполняется допущение Маркова: вероятности перехода из одного состояния в другое зависят только от текущего состояния, но не зависят от предыдущих;
- вероятности перехода из одного состояния в другое не зависят от времени (однородность).

В цепной модели Маркова стохастический процесс может быть использован для генерации последовательностей случайных величин по вероятностным законам [117]. Процесс считается дискретным по времени, например, $T = 0, 4, 8 \dots$ лет, что считается разумным временным интервалом для изучения феномена изменения землепользования. Если стохастический процесс следует марковскому процессу, то последовательность случайных величин может быть сгенерирована с

использованием свойства Маркова, как в приведенном ниже уравнении (2.1):

$$P[X_{n+1} = a_{in+1} | X_0 = a_{i0}, \dots, X_{in} = a_{in}] = P[X_{in+1} = a_{in+1} | X_{in} = a_{in}], \quad (2.1)$$

где для двойного индекса (in) $n \in T$; $T = 0, 4, 8, \dots$ лет; $i = 5$, a_i - класс землепользования.

Когда диапазон возможных значений a_i либо конечен, либо бесконечен, как и в этом исследовании, марковский процесс можно назвать цепью Маркова. Поэтому необходимо доказать, что существует статистическая зависимость между X_{n+1} и X_n (уравнение 2.2); и что статистическая зависимость является Марковским процессом первого порядка (уравнение 2.3).

$$P(X_n = a_n | X_{n-1} = a_{n-1}) \neq P(X_n = a_n) * P(X_{n-1} = a_{n-1}). \quad (2.2)$$

$$P[X_n = a_n | X_{n-1} = a_{n-1}] = P[X_n = a_n, X_{n-1} = a_{n-1}] / P[X_{n-1} = a_{n-1}]. \quad (2.3)$$

Марковский процесс первого порядка — это марковский процесс, в котором переход от класса к любому другому не требует промежуточных переходов в другие состояния. Статистическая зависимость может быть проверена с помощью любой таблицы непредвиденных обстоятельств [117], где показано изменение землепользования между X_n и X_{n-1} . В нашем исследовании этот тест был выполнен для изменения землепользования в период с 2007 по 2011 год. Чтобы сделать вывод о ассоциации или независимости между классами землепользования в разные годы из таблицы непредвиденных обстоятельств, случайная величина с распределением хи-квадрат будет определяться уравнением (2.4):

$$\chi^2 = \sum_i \sum_j \frac{(O_{ij} - E_{ij})^2}{E_{ij}}, \quad (2.4)$$

где O - матрица непредвиденных обстоятельств, отображающая изменение землепользования в период с 2007 г. по 2011 г., и E – матрица непредвиденных обстоятельств с ожидаемыми значениями изменения, предполагающими выполнение гипотезы о независимости [118]. χ^2 измеряет расстояние между наблюдаемыми значениями изменения землепользования и ожидаемыми, принимающими независимость, и должно быть достаточно высоким, чтобы выполнилось уравнение (2.4), для 5 степеней свободы.

2.5. Выводы по главе

Во второй главе представлено описание особенностей спектрально-отражательных характеристик природных и антропогенных объектов, на основании анализа отечественного и зарубежного опыта, а также предварительных экспериментальных исследований, предложена методика обнаружения и прогнозирования замещения видов землепользования на водонепроницаемые поверхности, базирующаяся на тематической обработке разновременных многозональных космических снимков. Разработанная в рамках диссертационной работы методика обнаружения и прогнозирования замещений видов землепользования на водонепроницаемые поверхности базируется на комплексном использовании метода объектно-ориентированной классификации и Per-field классификации, что позволяет в полной мере использовать спектральную и текстурную информацию о изучаемых объектах, заложенную в исходных многозональных космических изображениях.

На основании литературного обзора, показано, что из имеющихся моделей моделирования стохастических процессов модели Маркова наиболее пригодны для моделирования замещения видов землепользования в мегаполисах, включая как городские, так и не городские районы в больших пространственных масштабах.

Разработанная в диссертационной работе методика стохастического моделирования, позволяет с помощью цепей Маркова выполнить описание пространственного перехода землепользования в мегаполисе из одного состояния в другое, основанное на том, что области перехода и их вероятности генерируются из временного ряда карт землепользования, с последующим прогнозированием конверсии видов землепользования на определенное время в будущем.

3. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫЕ ИССЛЕДОВАНИЯ ЗАМЕЩЕНИЙ ВИДОВ ЗЕМЛЕПОЛЬЗОВАНИЯ И ПРОГНОЗИРОВАНИЕ СТРУКТУРЫ ЗЕМЛЕ- ПОЛЬЗОВАНИЯ НА ПРИМЕРЕ МЕГАПОЛИСА ХАНОЙ (ВЬЕТНАМ)

3.1. Общее описание природных и хозяйственных условий мегаполиса Ханой (Вьетнам)

Общее положение

Ханой – столица и крупный город Вьетнама, расположенный по обе стороны Красной реки и в её устье, его географические координаты с $20^{\circ}53'N$, $105^{\circ}44'E$ – $21^{\circ}23'N$, $106^{\circ}02'E$. Он является центральной областью экономического, туристического обслуживания, культуры и природного ландшафта. Общая площадь Ханоя составляет около $3.324,92 \text{ км}^2$ с населением 6.448.837 на 2009 год. Ханой обладает типичным климатом для северного региона с характеристиками влажно - муссонного тропического, с жарким летом, обилием осадков и холодной зимой.

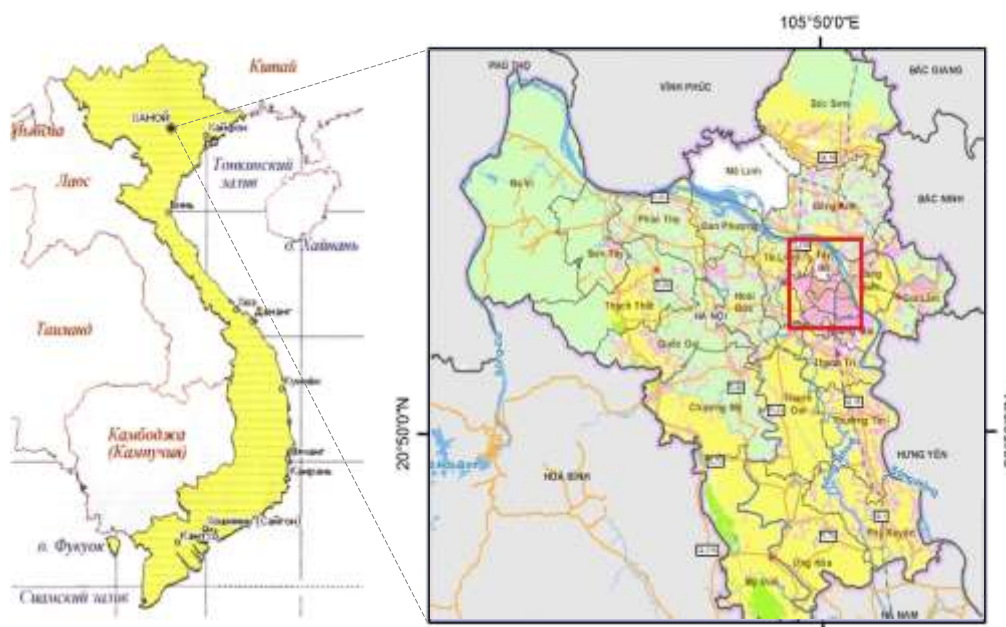


Рисунок 3.1 – Картограмма г. Ханой, исследуемая территория выделена красными линиями

Тестовая территория имеет следующие координаты $105^{\circ}44'11''E$,

20°58'13"N – 105°53'16"E, 21°8'18"N. Область исследования охватывает 16 районов города, протяженность территории с запада на восток - 15,63 км, с севера на юг - 18,41 км, площадь 28756 га, плотность населения и густота застройки высокая (рисунок 3.1, 3.2, таблица 3.1) [14].

Ландшафт и геоморфология. Из-за влияния многих различных геологических процессов, город имеет ярко выраженный контраст рельефа. В рельефе преобладает нескольких форм:

- Холмы и горы: горная местность на западе и юго-западе составляет около 30% площади, ниже со средней высотой от 5 м до 20 м с северо - востока на юго-западе и ниже с запада на восток. Большинство составляют горы со средней высотой 400 - 600 м, которые состоят из осадочных пород, карбонатов.

- *Равнина:* её площадь составляет около 60% территории, рельеф относительно плоский с высотами ниже 20м с запада на востоке, с северо-запада на юго-востоке. Поверхность равнины расчленена густыми реками и каналами.

Ханой имеет площади природных земель 92097 га, в том числе, сельскохозяйственные угодья 47,4%, леса 8,6%, и 19,26% жилые земли [25].

Таблица 3.1 – Среднегодовые значения температур воздуха и осадков в г. Ханой

| Месяц | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 10 | 11 | 12 |
|-------------------------|------|------|------|------|-------|-------|-------|------|-------|-------|------|------|
| Температура в °C | 16,4 | 17 | 20,2 | 23,7 | 27,3 | 28,8 | 28,9 | 28,2 | 27,2 | 24,6 | 21,4 | 18,2 |
| Количество осадков в мм | 18,6 | 26,2 | 43,8 | 90 | 188,5 | 230,8 | 288,2 | 318 | 265,4 | 130,7 | 43,4 | 23,4 |

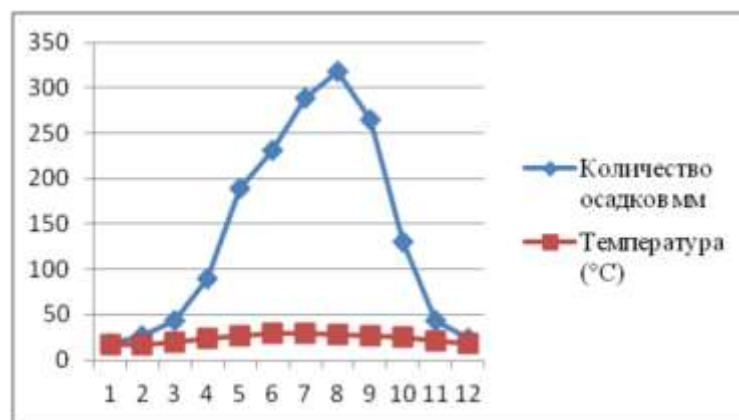


Рисунок 3.2. График среднемесячных значений количества осадков и температуры [25]

Почвенные характеристики. В дельте Красной реки преобладают в основном аллювиальные почвы. Процесс осадения, намыва, образование и развития различных земель создал разнообразие типов почв. Они имеют слабо кислые и кислые типы почв с гумусом и питательными веществами от умеренных до бедных.

Город Ханой расположен рядом с Красной рекой и Да рекой, двумя крупнейшими реками на севере - крупнейшей Красной рекой. В рамках Ханое сети естественного потока достаточно плотной, плотность примерно 0,5 – 1,0 км/км². Кроме того, в мегаполисе Ханой имеется много озёр, болот, прудов, что способствует развитию рыбного хозяйства и туризма, но из-за низкого рельефа и плохого дренажа, регулярно происходят локальные наводнения во время сезона дождей. Низкие холмы на севере и в центральной части города Ханой, благоприятны для градостроительства, промышленного развития, лесного хозяйства и организации туризма [25].

Социально-экономические проблемы

Город Ханой – главный центр культуры, науки, образование, экономика и международных сделки.

Город Ханой можно разделить на три географические регионы с социально-экономическими характеристиками следующим образом:

- Городской район: экономическая структура, в основном промышленные и коммерческие. Инфраструктура была завершено построена. Структура землепользования изменилась незначительно. Доход на душу населения высок.

- Пригородные уезды: Экономическая структура включает в себя коммерческая, промышленная, сельскохозяйственная, ремесленная. Инфраструктура находится в процессе строительства и отделки. Быстрая скорость урбанизация привела изменение структуры землепользования по времени. Уровень жизни и образования ниже, чем в городском районе.

- Загородные районы: в основе экономической структуре находятся сельское хозяйство и небольшая часть ремесленных и лесное хозяйство. Инфраструктура слаба и находится в процессе строительства. Скорость урбанизации медленная. Структуры землепользования изменяется, но не так сильно. Доход на душу населения остается низким.

Ханой - один из городов с самой высокой скоростью урбанизации в стране. Экономический рост и увеличение населения привели к тому, что необходимо модернизировать и расширять масштаб инфраструктуры. В последние годы в Ханое реализовались и продолжается реализоваться много проектов в области развития инфраструктуры: транспортные системы, многие проекты городских центров и многие произведения культуры и спорта, парки, промышленные зоны.

Население Ханоя составляет 6 449 млн человек (обследования в 2009 году), распределены неравномерно. Высокая плотность населения в городских районах, снижение в пригородных и загородных районах. Средняя плотность населения Ханоя в 2008 году составила 1 901 человек / км².

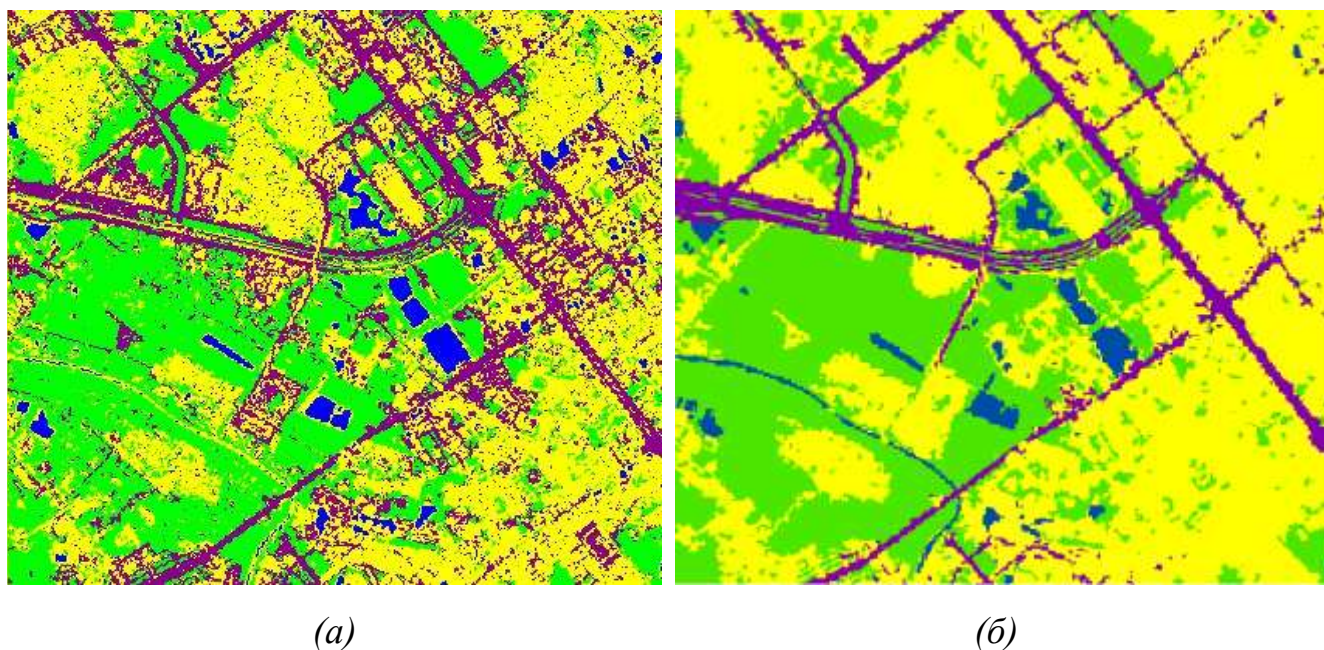
Согласно общему планированию социально-экономического развития Ханой до 2020 года и ориентаций к 2030 году с целью развития столицы в качестве мотивации развития для всей страны. Цель развития города является средняя скорость экономического роста в периоде с 2016 по 2020 составит около 11-12%/год и примерно 9,5-10%/год на периоде 2021-2030. К 2020 году ВВП на душу населения Ханоя достигнет около 7100-7500 долларов США и увеличится 16000-17000 долларов США в 2030 году (в текущих ценах). Население Ханоя достигает около 7,9 до 8 миллионов людей в 2020 году и около 9,2 миллиона людей в 2030 году. Доля квалифицированных рабочих достигнет 70-75% к 2020 году, в результате чего столица станет центром высокого качества обучения на национальном и региональном уровне.

3.2. Эффективности метода объектно-ориентированной классификации типов земных покровов по многозональным космическим изображениям





Оценка возможностей использования МООК для обнаружения водонепроницаемых поверхностей была выполнена с использованием многозональных изображений SPOT-5, полученных на небольшом тестовом участке территории мегаполиса Ханой. Обработка цифровых изображений осуществилось с помощью программы eCognition 8.7 [115]. Параллельно, была выполнена обработка тех же

изображений по пиксельной классификации с помощью программного обеспечения ENVI.

Результаты классификации многозональных космических снимков SPOT-5 выполненной с помощью методов попиксельной классификации и объектно-ориентированной классификации показаны на рисунке 3.3. Эти результаты были получены на тестовом участке, на котором контрольные точки были выбраны случайным образом. Для каждого класса объектов выбирались случайным образом по 24 контрольные точки. После этого была вычислена матрица ошибок и выполнена оценка показателей точности классификации, данные о которых приведены в таблице 3.2 и 3.3, в том числе приводятся точности производителя (producer's accuracy), точности пользователя (user's accuracy). Точность объектно-ориентированной классификации составляет 87,72%, в то время как для попиксельной классификации она составляет 70,64% с соответствующими коэффициентами Каппа равными 0,84 и 0,64.



Рисунке 3.3 – Результаты классификации:

(а) — попиксельная классификация; (б) — объектно-ориентированная классификация;  — транспорт;  — поверхностные водные объекты;  — поселение и отдельные строения;  — растительный покров

Как следует из представленных в таблицах 3.2 и 3.3 данных метод объектно-ориентированной классификации показал более высокую достоверность

результатов автоматизированной классификации, что можно объяснить не учетом при проведении попиксельной классификации таких характеристик, как форма, структура (текстура) объектов и отношений между ними.

Таблица 3.2 – Матрица ошибок классификации (%)

| Класс объектов | Попиксельная классификация | | | | | Объектно-ориентированная классификация | | | | |
|------------------------------------|----------------------------|--------------|--------------|--------------|--------|--|--------------|--------------|--------------|--------|
| | (P) | (П) | (Т) | (В) | Итого | (P) | (П) | (Т) | (В) | Итого |
| Растительный покров (P) | 86,59 | 4,29 | 5,32 | 0,00 | 96,20 | 96,12 | 3,07 | 0,00 | 0,00 | 99,19 |
| Поселение и отдельные строения (П) | 10,09 | 64,51 | 53,55 | 9,69 | 137,84 | 3,04 | 84,56 | 24,68 | 5,11 | 117,39 |
| Транспорт (Т) | 3,32 | 26,90 | 41,13 | 0,00 | 71,35 | 0,84 | 12,23 | 75,32 | 0,00 | 88,39 |
| Поверхностные водные объекты (В) | 0,00 | 4,30 | 0,00 | 90,31 | 94,61 | 0,00 | 0,14 | 0,00 | 94,89 | 95,03 |
| Итого | 100 | 100 | 100 | 100 | 400 | 100 | 100 | 100 | 100 | 400 |

Таблица 3.3 – Результаты оценки точности различных методов классификации

| Класс объектов | Попиксельная классификация | | Объектно-ориентированная классификация | |
|--------------------------------|----------------------------|----------------|--|----------------|
| | Точность | Точность | Точность | Точность |
| | производителя % | пользователя % | производителя % | пользователя % |
| Растительный покров | 86,59 | 90,01 | 96,12 | 96,90 |
| Поселение и отдельные строения | 64,51 | 46,80 | 84,56 | 72,03 |
| Транспорт | 41,13 | 57,65 | 75,32 | 85,21 |
| Поверхностные водные объекты | 90,31 | 95,46 | 94,89 | 99,85 |
| Общая точность | 70,64% | | 87,72% | |
| Каппа | 0,6414 | | 0,8423 | |

Выполненное исследование показывает, что использование метода объектно-ориентированной классификации позволяет существенно улучшить результаты автоматизированной классификации многозональных космических изображений за счет использования дополнительной вспомогательной информации (пространственных и текстурных атрибутов) при построении решающих правил классификации. Преимущество объектно-ориентированной классификации проявляется более ярко, если используются многозональные космические изображения высокого разрешения.

В то же время следует отметить, что существенным недостатком МООК является значительное влияние результатов сегментации, выполняемой на первой стадии выполнения алгоритма классификации, на конечный результат распознавания. Выбор наиболее оптимальных параметров сегментации изображения является узким местом объектно-ориентированного классификатора.

3.3. Результаты дешифрирования исходных разновременных многозональных космических изображений на основе различных спектральных индексов

По шаговое описание тематического дешифрирования многозональных изображений SPOT-5

Шаг 1: Выбор и предварительная обработка изображений.

Так как результаты классификации изображений это входные данные стандартного метода Per-field классификации, необходимо тщательно выбирать исходные многозональное изображение, чтобы оно было четким, имело больше поддающихся проверке данных, включая результаты полевых обследований.

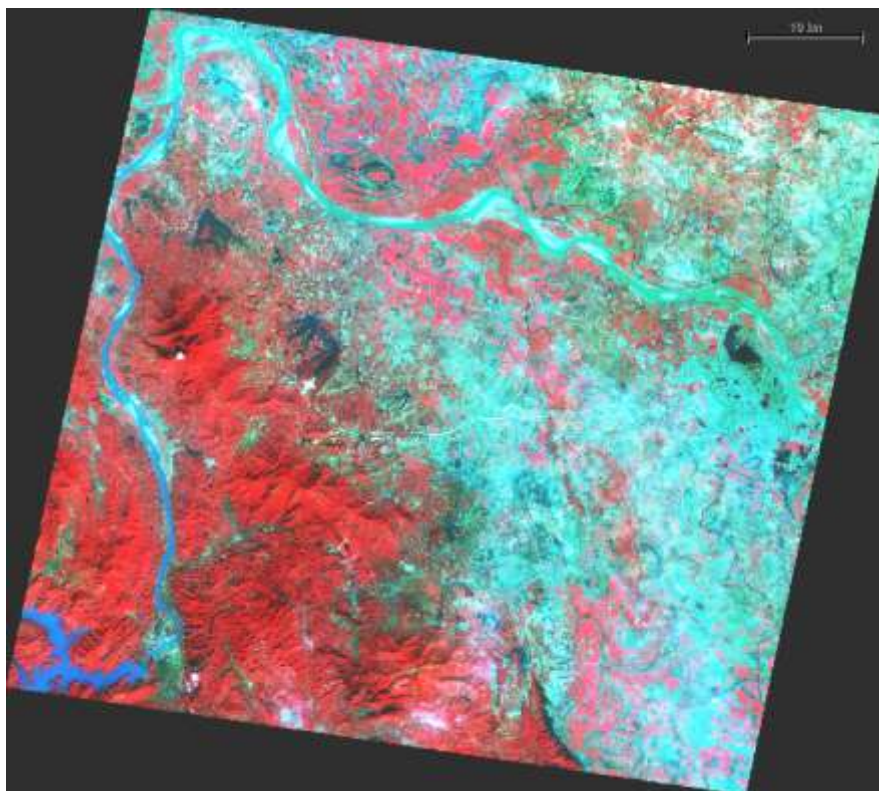


Рисунок 3.4 – Исходное изображение SPOT-5 в районе Ханой, на 21.08.2007

RGB = NIR:RED:GREEN

С учетом выше приведенных причин, изображение SPOT-5 на 21.08.2007 было выбрано, потому что отвечает критериям сформулированным в диссертации (покрывает район исследования, без облаков, четкое, разделение между объектами хорошее, имеет поддающихся проверке полный набор сопутствующих данных: WorldView-2 изображение, разрешением 2м, получено на 03.09.2007 и карты землепользования в 2008 году на район исследований, результаты полевого обследования в районе исследований, выполненные в ноябре 2008 года).

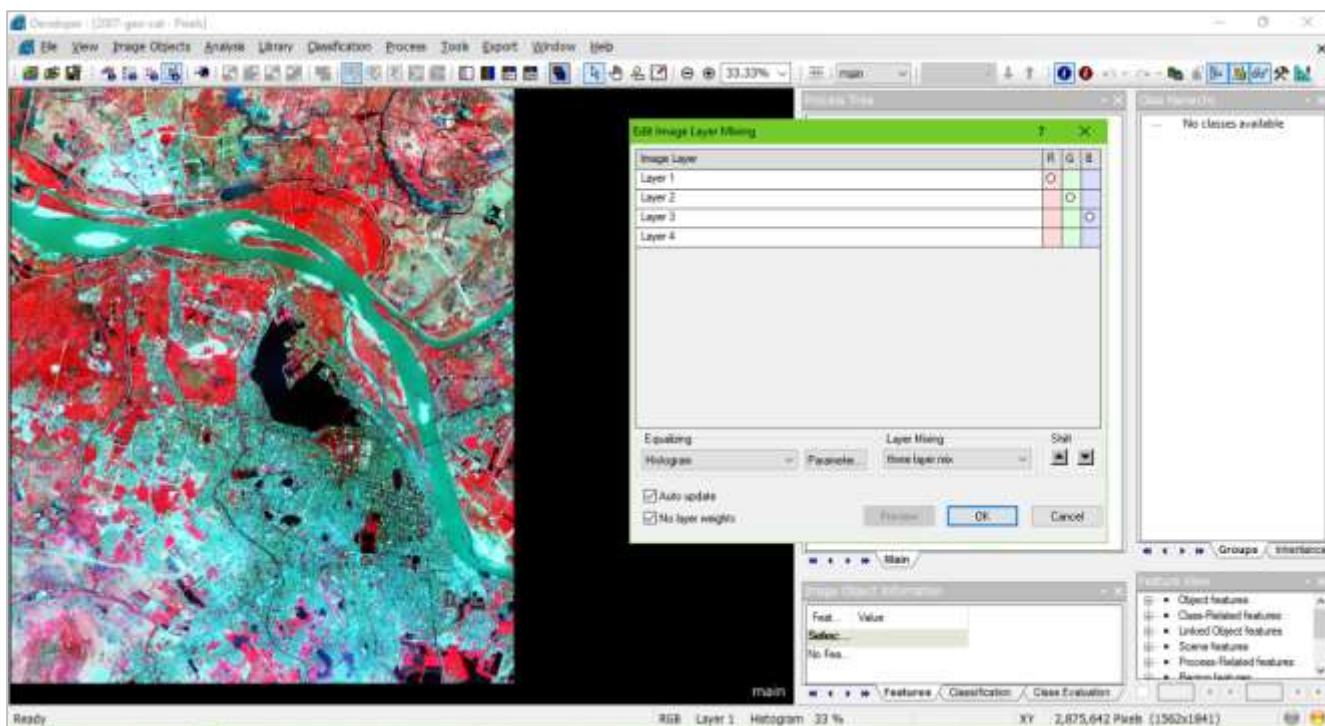


Рисунок 3.5 – Изображения SPOT-5 в 2007 году в пределах границы исследуемой территории

Шаг 2: Классификация изображения по методу объектно-ориентированной классификации

Это самый важный шаг во всем процессе тематической обработки изображений, точные результаты классификации изображения зависят от каждой конкретной операции на этом шаге. На этом шаге выполняется 3 отдельных действия: (1) Сегментация изображений; (2) Построение индикаторов; (3) построение нормы и решающих правил (rule set).

- **Сегментация изображений:** Методика процесс сегментации изображения было подробно описана нами в главе 2, конечный результат сегментирования

изображений на основе алгоритма выбора «правильных» сегментов, зависит от выбора масштаба и выбора веса параметров формы (shape), цвета (color), компактности (compactness), гладкости (smoothness). После пробного прогона и проверке результатов сегментирования изображений выбираются значения параметров сегментации. В нашем случае, для исследуемого изображения SPOT-5 2007 значения параметров, обеспечивающие получение наилучшей сегментации, имеют следующие значения: масштаб = 20, форма = 0,2 и компактность = 0,5. Результирующее сегментированное изображение представлено на рисунке 3.6.

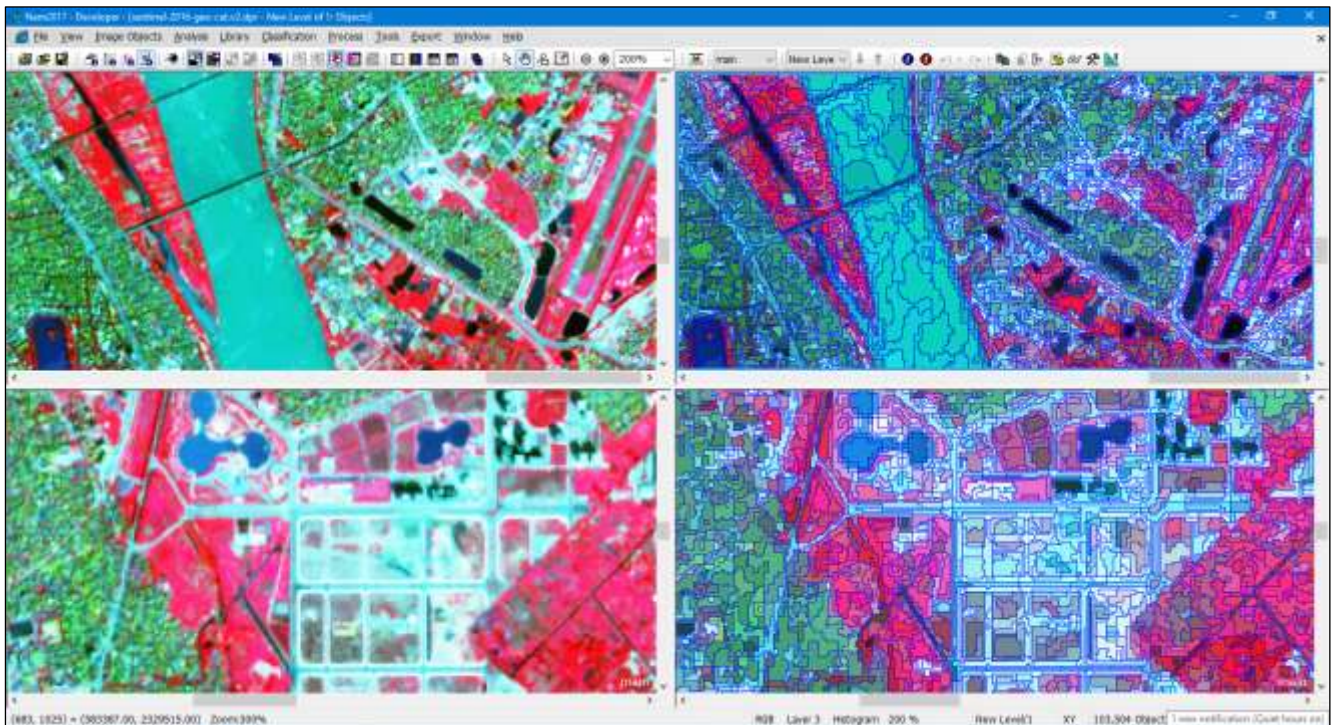


Рисунок 3.6 – Сегментированное изображение SPOT-5 (с выбранными параметрами: Scale parameter: 20; Shape: 0,2; Compactness: 0,5)

- **Построение индикаторов объектов (индексов):** Использование индекса в процессе построения решающих правил, помогает выделить объект в анализируемом изображении. Используется много индексов для классификации многозональных изображений, однако нами были использованы следующие индексы в процессе классификации SPOT-5:

- **Индексы 'tasselled cap' для изображения SPOT-5, предложенная Bektas Balçik [54]:**

$$+ \text{Brightness} = 0,201 (\text{Green}) + 0,397 (\text{Red}) + 0,548 (\text{Near Infrared}) + 0,707$$

(Short Wave Infrared)

$$+ \text{Greenness} = -0,180 (\text{Green}) - 0,330 (\text{Red}) - 0,832 (\text{Near Infrared}) - 0,408$$

(Short Wave Infrared)

$$+ \text{Wetness} = 0,388 (\text{Green}) + 0,573 (\text{Red}) + 0,013 (\text{Near Infrared}) - 0,724$$

(Short Wave Infrared)

- Индексы для выделения растительностей:

+ Почвенно-отрегулированный вегетационный индекс *SAVI* (Soil-Adjusted Vegetation Index) вычисляется по уравнению (3.1) [56]:

$$SAVI = [(NIR - RED) (1 + l)] / (NIR + RED + l), \quad (3.1)$$

где, l – коэффициент почвы, значение в диапазоне от 0 до 1. Нами выбрано значение равное 0.5, чтобы исключить влияние различных фоновых погрешностей.

+ Нормализованный дифференциальный вегетационный индекс *NDVI* (Normalized Difference Vegetative Index) вычисляется по уравнению (3.2):

$$NDVI = (NIR - RED) / (NIR + RED). \quad (3.2)$$

- Индексы для выделения застроенных земельных участков

+ Нормализованный дифференциальный индекс застроенности земельных участков *NDBI* (Normalized Difference Built-up Index), вычисляется по уравнению (3.3) [55]:

$$NDBI = (SWIR - NIR) / (SWIR + NIR), \quad (3.3)$$

где, *SWIR* – сигнал короткого инфракрасного канала; *NIR* – сигнал ближнего инфракрасного канала.

+ Индекс почвы *SI* вычисляется по уравнению (3.4):

$$SI = (GREEN - BLUE) / (GREEN + BLUE), \quad (3.4)$$

где, *GREEN* – значение пиксела изображения, полученного в зеленом диапазоне, *BLUE* – значение пиксела изображения, полученного в синем диапазоне спектра электромагнитных волн.

- Индексы для выделения воды

Нормализованный дифференциальный водный индекс *NDWI* (Normalized Difference Water Index) вычисляется по уравнению (3.5) [116]:

$$NDWI = (GREEN - NIR) / (GREEN + NIR). \quad (3.5)$$

Приведенные выше индексы (за исключением индексов для выделения застроенных земельных участков) построены в окне “Feature view” и используются для выполнения порогового обследования объектов на SPOT-5 изображения 2007. Результаты сегментирования представлены на рис. 3.6. По результатам полного обследования получены пороговые значения по каждому отдельному индексу и построены решающие правила и позволяющие выделить каждый объект в изображении наилучшим возможным способом (таблица 3.4).

Таблица 3.4 – Пороговые значения индекса, используемых для классификации объектов на изображении SPOT-5 в 2007 году

| Класс объектов | Индекс | | | | |
|--------------------------------|--------------------------------|----------|--------------------------------|-------------------------------|--------------------------------|
| | Brightness | Greeness | Wetness | SAVI | NDVI |
| Поверхностные водные объекты | | | $\geq -20,04$ $\leq -12,45$ | | $\geq -0,074$ $\leq -0,233$ |
| Поселение и отдельные строения | | | | $\geq -0,045$ $\leq 0,198$ | |
| Растительный покров | ≥ 80 ≤ 97 | | $\geq -9,36$ $\leq -1,6$ | | |
| Открытые грунты | $\geq 116,28$ $\leq 144,80$ | | | | |

- Построение нормы и правила (rule set)

В процессе обработки изображений, набор правил (Rule set) включает в себя критерии установлены таким образом, что этот объект может быть отделен от других объектов в изображении служить цели классификации.

Создание набора правил для объектно-ориентирования классификация требует аналитика изображений, чтобы иметь так много различного понимания как: характеристики каждого канала изображения, показывая отражения объектов в изображении, знание исследуемой территории, связь между объектами вместе на практике.

С учетом результатов полевого обследования, для сочетания выше указанных индексов были построены нормы и решающие правила (таблица 3.5) и выполнена

классификация изображения SPOT-5 в 2007 г., результаты классификации, показанные на рисунке 3.7.

Таблица 3.5 – Решающие правила для изображения SPOT-5 в 2007 г.
исследуемой области

| Класс объектов | Правила классификации |
|--------------------------------|--|
| Поверхностные водные объекты | $-20,04 \leq \text{Wetness} \leq -12,45$ $64 \leq \text{Brightness} \leq 77$ and $-0,198 \leq \text{Wetness} \leq -0,045$ $\text{NDVI} \leq 0,09$ and $\text{NDWI} \geq 0,29$ |
| Поселение и отдельные строения | $-0,198 \leq \text{SAVI} \leq -0,045$ |
| Растительный покров | $-9,36 \leq \text{Wetness} \leq -1,6$ $80 \leq \text{Brightness} \leq 97$ $\text{NDVI} \geq 0,07$ |
| Открытые грунты | $\text{Brightness} \geq 116,28$ |

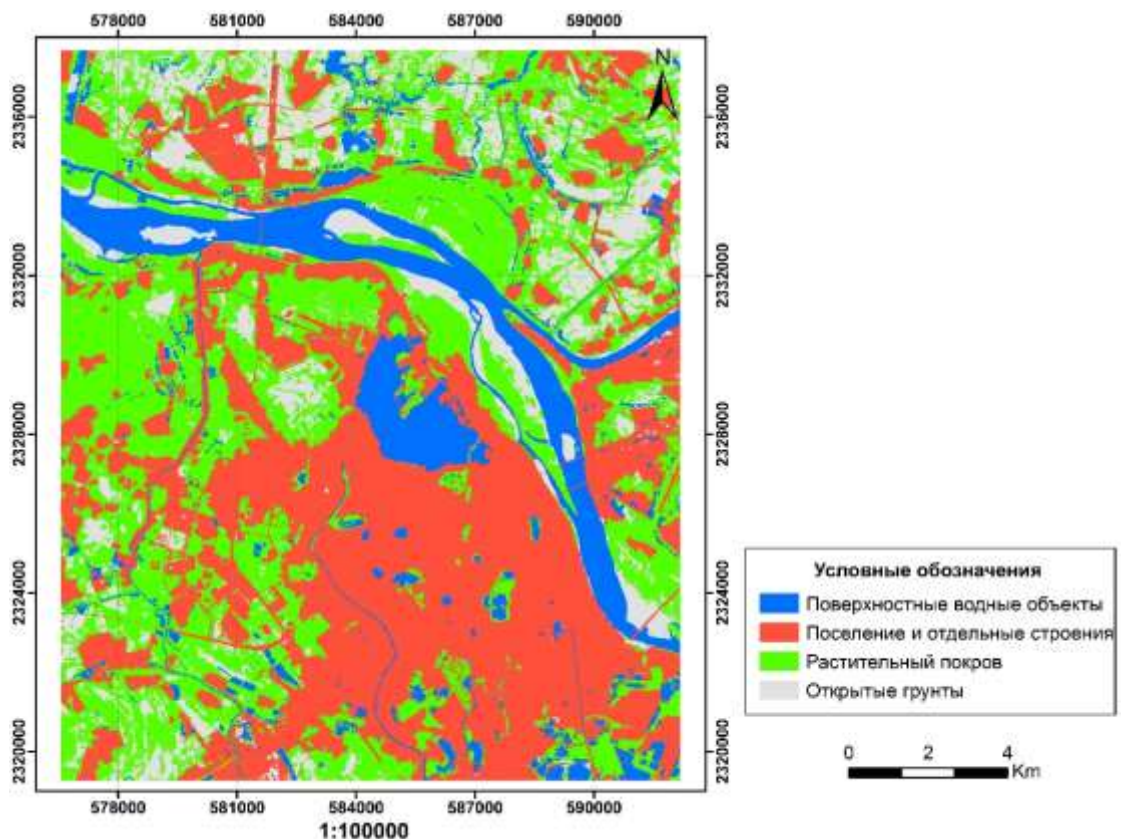


Рисунок 3.7 – Результаты классификации изображения SPOT-5 в 2007 г.

Шаг 4: Оценка точности результатов классификация землепользования в 2007 году:

Точность результатов классификации являются очень важным фактором,

поэтому мы провели ее исследование с помощью метода эталонных участков. Методика проведения такого исследования приведена в [80, 81] и включает в себя:

- Сбор и анализ соответствующих справочных данных;
- Определение количества эталонных участков на изображении;
- Расчет матрицы ошибок и анализ ошибок для каждого конкретного тематического класса.

Для оценки точности результатов классификации от изображения SPOT-5 в 2007 г. были использованы следующие справочные данные: карта землепользования Ханой в 2008 году, с масштабом 1: 10 000 и изображения, полученные со спутника WorldView-2 с пространственным разрешением 2м на 28 января 2007 года, а также статистические данные землепользования в Ханое в 2007г. В частности, данные образцом для оценки точности непосредственно является изображение спутник WorldView-2, так как эта изображения была сделана в прошлом сезоне с SPOT и пространственное разрешение больше, чем много раз, так что легко выбор эталонных участков.

Количество эталонных участков рассчитывалось по формуле [57]:

$$N = \frac{Z^2 \times (p) \times (q)}{E^2}, \quad (3.6)$$

где, p – ожидаемая процентная точность;

$$q = 100-p (\%);$$

E – допустимая ошибка;

$Z = 2$ отклонение от нормального стандарта 1,96 при 95% доверительном интервале.

Точность ожидаемых результатов классификации землепользования с использованием изображения SPOT 2007 составляет 85%, допустимая ошибка 10%, минимальное количество эталонных участков, рассчитываемое по формуле (3.6) составило 51 участок. Это минимальное количество эталонных участков, обеспечивает ожидаемую точность 85%.

Таким образом, мы выбрали 64 образца тестовых участков на изображении WorldView-2, чтобы лучше оценить точность, однако в разных классах

землепользования количества эталонов не одинаково. Все эталоны разделены на 4 класса в соответствии с критериями, созданными на основе сложности каждого класса объектов. Эталонные объекты выбирались случайным образом, что позволяет применять описательную статистику.

Таким образом, расчётное количество эталонных участков для всей исследуемой области составляет 64 с ожидаемой точностью классификации до 85%, допустимая ошибка 10%. Общая площадь эталонных участков составляет 2% ($0,02 \times 28756 = 559,1$ га) по сравнению с общей площадью всей исследуемой территории, расположение и выбор эталонных участков определено случайным образом по всему изображению.

После расчета матрицы ошибок из результата классификации изображений в 2007 году и на основе спутниковых снимков WorldView-2 была определена ошибка для каждого класса объектов. После этого была выполнена оценка показателей точности классификации, данные о которых приведены в таблице 3.6, в том числе приводятся точности производителя (producer's accuracy), точности пользователя (user's accuracy).

Таблица 3.6 – Матрица ошибок дешифрирования по изображению SPOT-5 в 2007 г.

| Класс объектов | (В) га | (П) га | (Р) га | (О) га | Итого строка га |
|--|-------------|--------------|------------------------------|--------------|--------------------|
| Поверхностные водные объекты (В) | 91,7 | 0,0 | 4,8 | 3,8 | 100,3 |
| Поселение и отдельные строения (П) | 3,2 | 111,6 | 17,2 | 15,0 | 147,0 |
| Растительный покров (Р) | 5,9 | 9,1 | 122,8 | 10,7 | 148,6 |
| Открытые грунты (О) | 1,1 | 23,6 | 4,3 | 135,2 | 164,1 |
| Итого столбец | 101,9 | 144,3 | 149,1 | 164,7 | 560,0 |
| Точность производителя | | | Точность пользователя | | |
| В = $91,7 / 101,9 = 90\%$ | | | В = $91,7 / 100,3 = 91\%$ | | |
| П = $111,6 / 144,3 = 77\%$ | | | П = $111,6 / 147,0 = 76\%$ | | |
| Р = $122,8 / 149,1 = 82\%$ | | | Р = $122,8 / 148,6 = 83\%$ | | |
| О = $135,2 / 164,7 = 82\%$ | | | О = $135,2 / 164,1 = 82\%$ | | |
| Общая точность = $(91,7 + 111,6 + 122,8 + 135,2) / 560,0 = 0,82$ | | | | | |

$$\text{Коэффициент Каппа [59]: } \hat{K} = \frac{N \sum_{i=1}^r x_{ii} - \sum_{i=1}^r (x_{i+} \times x_{+i})}{N^2 - \sum_{i=1}^r (x_{i+} \times x_{+i})} \quad (3.7)$$

где, r – количество строк в матрице ошибок;

x_{ii} – число наблюдений в строке i и столбце i (по большой диагонали);

x_{i+} – общее количество наблюдений в строке i (показано как маргинальный итог справа от матрицы);

x_{+i} – общее количество наблюдений в столбце i (показано как предельное общее значение в нижней части матрицы);

N – общее количество наблюдений, включенных в матрицу;

Вычисление каппа для матрицы ошибок в таблице 3.6:

$$N = 560,0$$

$$\sum_{i=1}^k (x_{ii}) = (91,7 + 111,6 + 122,8 + 135,2) / 560,0 = 461,3$$

$$\sum_{i=1}^k (x_{i+} \times x_{+i}) = 101,9 \times 100,3 + 144,3 \times 147,0 + 149,1 \times 148,6 + 164,7 \times 164,1 = 80615,5$$

Заменить все результаты в уравнение (3.7), мы получаем значение Карра:

$$K = \frac{560 \times 461,3 - 80615,5}{560^2 - 80615,5} = 0,76$$

Из представленных результатов видно, что общая точность и коэффициент Каппа классификации изображений в 2007 году относительно высокие. Продемонстрированная достоверность результатов классификации в 2007 году, предоставляет достаточные основания, чтобы считать ее исходными данными для дешифрирования следующего изображения по методу Per-field классификации.

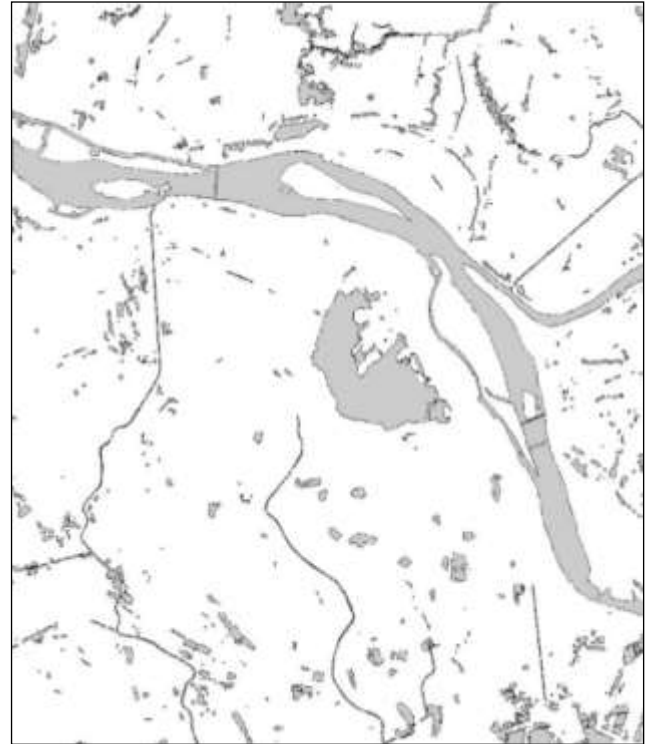
Применение метода Per-field классификации для классификации других изображений на основе программного обеспечения ArcMap10.4.

Реализация данного метода осуществляется на основе двух основных этапов: (1) определение границы объектов на земле; (2) совмещение границ объекта на земле с космическими изображениями, полученными в разное время, чтобы

выделить информацию об землепользовании.



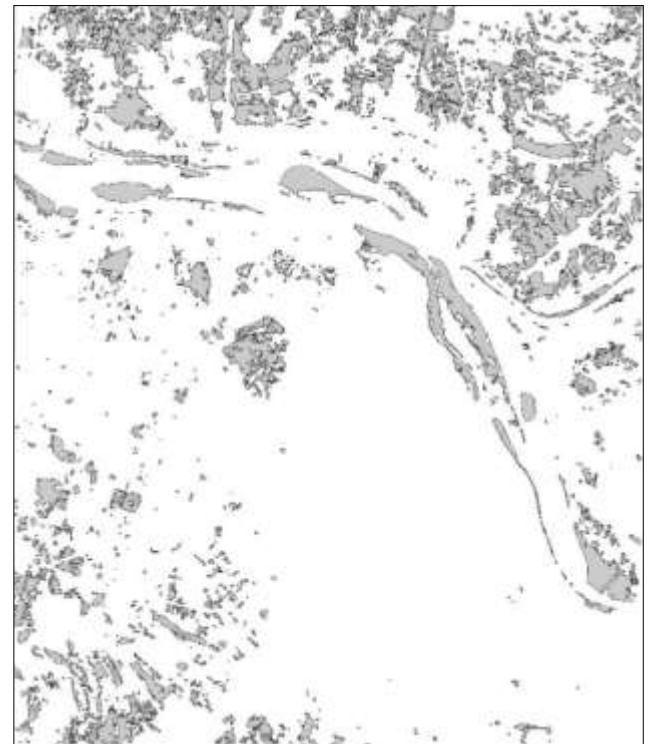
(а)



(б)



(в)



(г)

(а) – поселение и отдельные строения; (б) – поверхностные водные объекты;

(в) – растительный покров; (г) – открытые грунты

Рисунок 3.8 – Границы каждого объекта класса землепользования в 2007 г.

областей исследования Ханоя

Шаг 1: Определение границы объектов на земле

Полные результаты классификации изображений 2007 года были преобразованы в shape file и затем, была выполнена векторизация объектов (рисунок 3.8).

Шаг 2: совмещение границ объекта на земле космическими изображениями на разное время, чтобы выделить информацию об землепользовании.

После определения границ объектов на земле, эта граница была перенесена на изображение, полученное в 2011 году (рисунок 3.9).

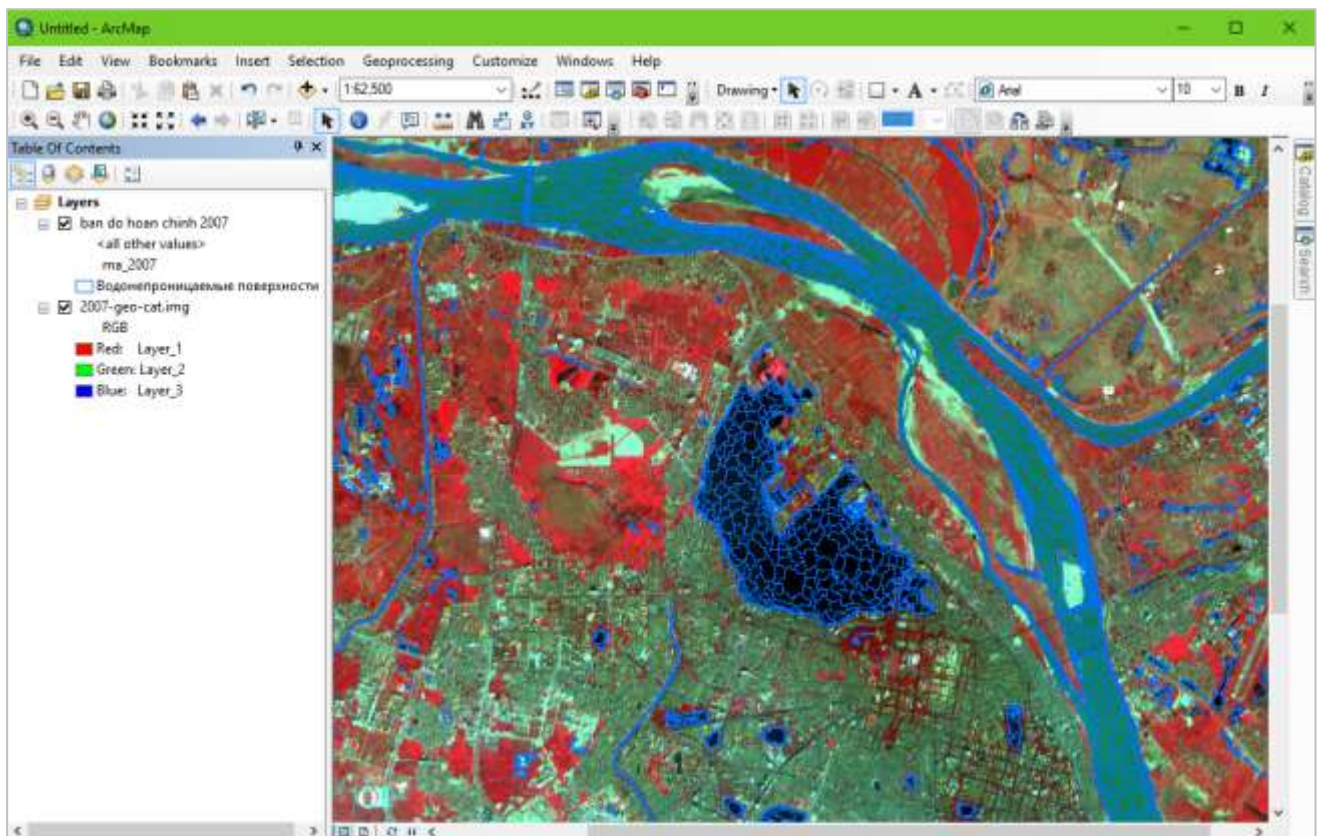


Рисунок 3.9 – Границы класса поверхностные водные объекты в 2007 году перенесенные на изображение 2011 года

Фрагменту однородных пикселей присваивается информация о виде землепользования соответствующая данной группе пикселей, а для фрагментов с неоднородными пикселями пересматриваются границы класса, таким образом, чтобы каждый новый фрагмент включал в себя только однородные пиксели. Затем этим фрагментам присваивать информацию по виду землепользования, соответствующего данной группе пикселей. Этот процесс постепенно осуществляется для каждого класса, которые определены в глоссарии.

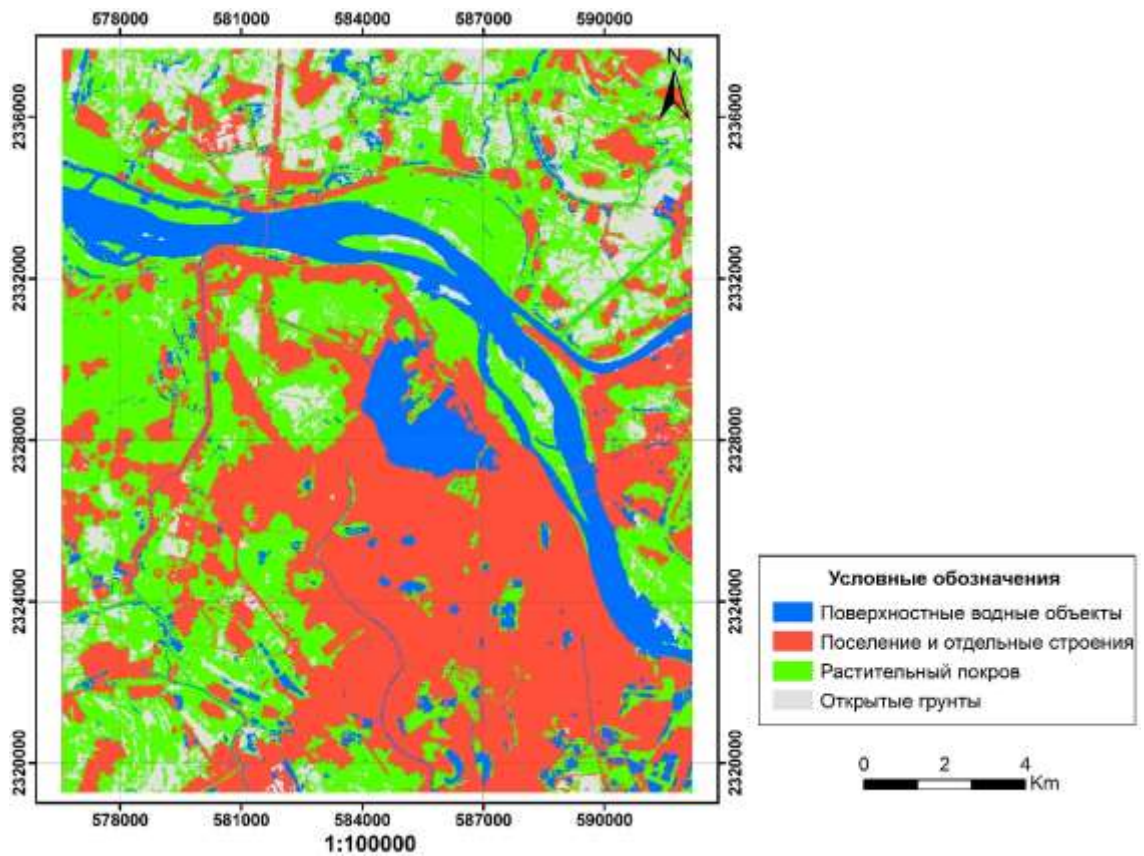


Рисунок 3.10 – Результаты классификации в 2003 году

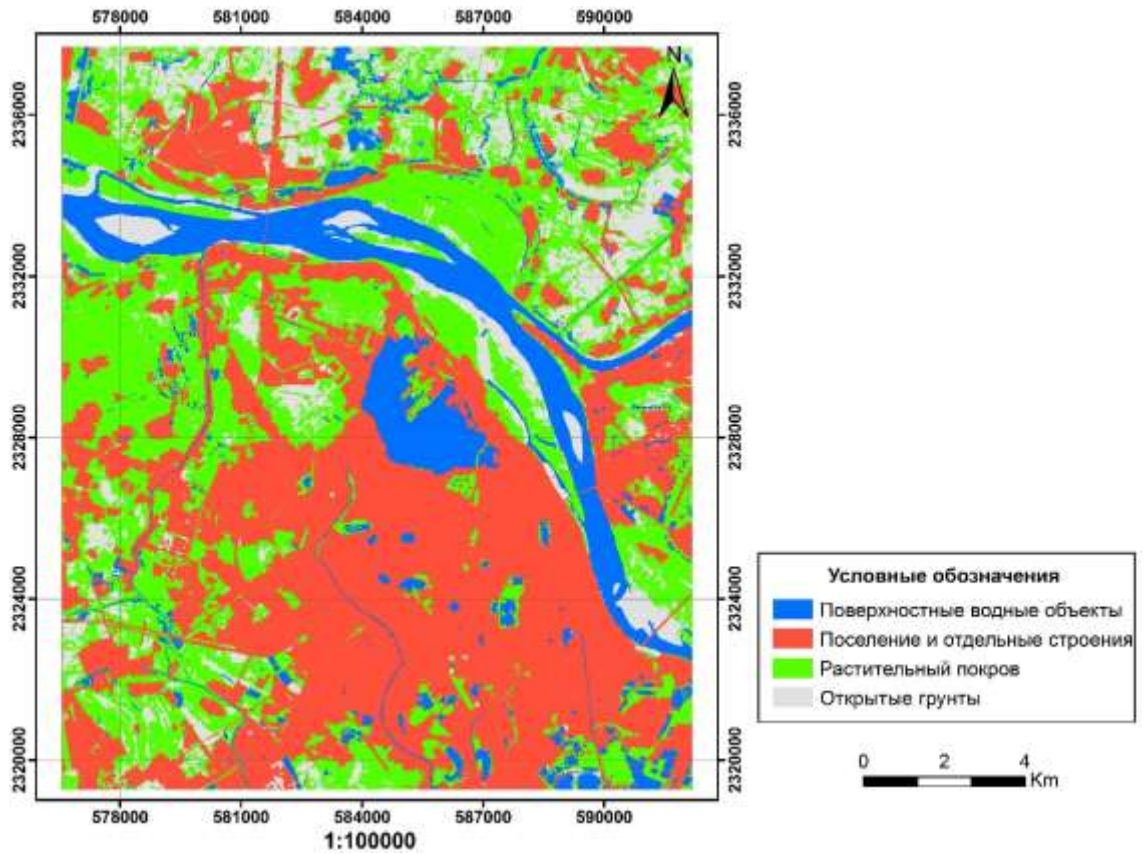


Рисунок 3.11 – Результаты классификации в 2011 году

После завершения процесса определения новых границ для объекта рассматриваемого класса, основанного, формируются картосхемы состояния землепользования соответственно 2003 и 2011 годах (рисунок 3.10 и 3.11).

Оценка точности результатов классификация землепользования в 2003 и 2011 гг.:

Таблица 3.7 – Матрица ошибок дешифрирования по изображению SPOT-5 в 2003 г.

| Класс объектов | (В) га | (П) га | (Р) га | (О) га | Итог строка | Точность пользователя |
|------------------------------------|-------------|-----------|-----------|-----------|----------------|--------------------------|
| Поверхностные водные объекты (В) | 93,3 | 0,0 | 3,8 | 2,7 | 99,8 | 0,94 |
| Поселение и отдельные строения (П) | 3,2 | 114,5 | 15,6 | 14,5 | 147,8 | 0,77 |
| Растительный покров (Р) | 6,4 | 8,6 | 122,8 | 10,2 | 148,0 | 0,83 |
| Открытые грунты (О) | 0,8 | 24,7 | 4,8 | 134,1 | 164,4 | 0,82 |
| Итог столбец | 103,8 | 147,8 | 147,0 | 161,5 | 560,0 | |
| Точность производителя | 0,90 | 0,77 | 0,84 | 0,83 | | |
| Общая точность | 0,83 | | | | | |
| Коэффициент Каппа | 0,77 | | | | | |

Таблица 3.8 – Матрица ошибок дешифрирования по изображению SPOT-5 в 2011 г.

| Класс объектов | (В) га | (П) га | (Р) га | (О) га | Итог строка | Точность пользователя |
|------------------------------------|-------------|-----------|-----------|-----------|----------------|--------------------------|
| Поверхностные водные объекты (В) | 92,8 | 0,0 | 4,3 | 3,2 | 100,3 | 0,93 |
| Поселение и отдельные строения (П) | 3,8 | 113,7 | 14,5 | 16,1 | 148,0 | 0,77 |
| Растительный покров (Р) | 5,4 | 8,0 | 124,4 | 10,2 | 148,0 | 0,84 |
| Открытые грунты (О) | 1,6 | 23,1 | 4,3 | 164,7 | 193,6 | 0,85 |
| Итог столбец | 103,5 | 144,8 | 147,5 | 194,2 | 590,0 | |
| Точность производителя | 0,90 | 0,79 | 0,84 | 0,85 | | |
| Общая точность | 0,84 | | | | | |
| Коэффициент Каппа | 0,78 | | | | | |

Это похоже на оценку точности результатов классификации изображений

SPOT-5 в 2007 г. (см. таблицу 3.6). Сводка оценки точности результатов классификации от изображения SPOT-5 в 2003 и 2011 г. была показана в таблицах 3.7 и 3.8 соответственно. Было обнаружено, что точность класса поверхностные водные объекты была самой высокой среди четырех классов земного покрова (точность как производителя, так и пользователя составляла приблизительно 90%), потому что поверхностные водные объекты очень гомогенны. В то же время, точность дешифрирования поселения и отдельных строения была самой низкой, что могло быть связано с перемещиванием писелов смешанной растительности и водонепроницаемой поверхности (точность как производителя, так и пользователя составляла приблизительно 77%).

Трудности классификации классов землепользования в городской местности из-за смешивания между растительным покровом, поверхностными водными объектам, открытыми грунтами, поселениями и отдельными строениями, усугубляется также преобразования между землепользованием в зависимости от времени в течение рассмотреть периода развития города. Коэффициент Каппы для всех карт земного покрова оценивался в пределах с 0,76 до 0,78. Между тем, общая точность колебалась от 0,82 до 0,84. Они продемонстрировали надежность классифицированных карт.

Извлечения объектам водонепроницаемые поверхности

Выделение водонепроницаемых поверхностей в поселениях и отдельных строениях городских районов с использованием многозональных космических изображений является трудной задачей, в связи с тем, что в них наблюдается смешивается различных объектов со смешанной растительностью.

В связи с чем, в диссертации использовался метод объектно-ориентированной классификации. При этом, в отличии от алгоритма Assign class (алгоритм применяется для извлечения всех объектов на изображении 2007), мы дополнительно использовали индекс водонепроницаемости для выделения водонепроницаемых поверхностей от объектов поселения и отдельные строения. Это позволило повышать точность результатов классификации водонепроницаемых поверхностей на всех обрабатываемых

изображениях SPOT-5. Схематично данная методика представлена на рисунке 3.12.



Рисунок 3.12 – Схема методики выделения водонепроницаемых поверхностей

Индекс водонепроницаемой поверхности (ISI): при расчете данного индекса был использован подход, предложенный в работе [58]. Для расчета индекса водонепроницаемой поверхности использовалась вычислительная процедура, описанная ниже:

1. По зональным снимкам спектрального космического изображения SPOT рассчитывается индекс NDVI по формуле:

$$NDVI = (B3 - B2) / (B3 + B2). \quad (3.8)$$

2. Рассчитывается центрированная частота для каждого спектрального диапазона:

$$B_i = (B_i - C_i),$$

где значения C выбираются из таблицы 3.7.

Таблица 3.7 – Значения C_i для четырех диапазонов SPOT и NDVI

| Диапазон | C_i |
|----------|-------------|
| B1 | 109,7867238 |
| B2 | 93,4891890 |
| B3 | 123,5814211 |
| B4 | 131,7855628 |
| NDVI | 0,1253237 |

3. По четырем зональным изображениям SPOT и NDVI рассчитываются главные компоненты. Рассчитанные значения PC компонент представлены в таблице 3.8.

Таблица 3.8 – Главные компоненты для четырех зональных изображений SPOT и NDVI

| PC | B1 | B2 | B3 | B4 | NDVI |
|----|---------------|--------------|--------------|---------------|-------------|
| 1 | 0,2009775066 | 0,188458551 | 0,641208254 | 0,7161995704 | 0,001251912 |
| 2 | -0,5492363414 | -0,618975652 | 0,536994325 | -0,1637753477 | 0,004828446 |
| 3 | 0,6596102484 | -0,027490344 | 0,462425597 | -0,5918743830 | 0,002425441 |
| 5 | -0,0005925268 | 0,005067903 | -0,003648692 | 0,0003514089 | 0,999980264 |

4. С помощью четырех PC - компонент (PC1, PC2, PC3, PC5), вычисляется индекс водонепроницаемой поверхности (ISI) по уравнению (3.9):

$$ISI = a_0 + I_j + a_1 \cdot PC_1 + a_2 \cdot PC_2 + a_3 \cdot PC_3 + a_5 \cdot PC_5. \quad (3.9)$$

Значения коэффициентов выбираются из таблицы 3.9:

Таблица 3.9 – Коэффициенты главных компонент

| N | Коэффициент |
|-------|--------------|
| a_0 | 0,525848406 |
| a_1 | -0,001709406 |
| a_2 | -0,005678677 |
| a_3 | 0,006158042 |
| a_5 | -0,876661842 |

Возмещение I_j является специфическим для каждого SPOT изображения, его значения представлены в таблице 3.10.

Таблица 3.10 – Значения возмещение I_j для каждого использованного SPOT изображения

| Дата получения изображения | Возмещение I_j |
|----------------------------|------------------|
| 24/06/2003 | 0,0000000 |
| 21/08/2007 | - 0,1709406 |
| 12/12/2011 | - 0,3212161 |
| 24/06/2003 | - 0,4549141 |

5. Если рассчитываемый индекс водонепроницаемой поверхности из предыдущего шага ниже 0 или выше 1, то он устанавливается соответственно равным 0 или 1.

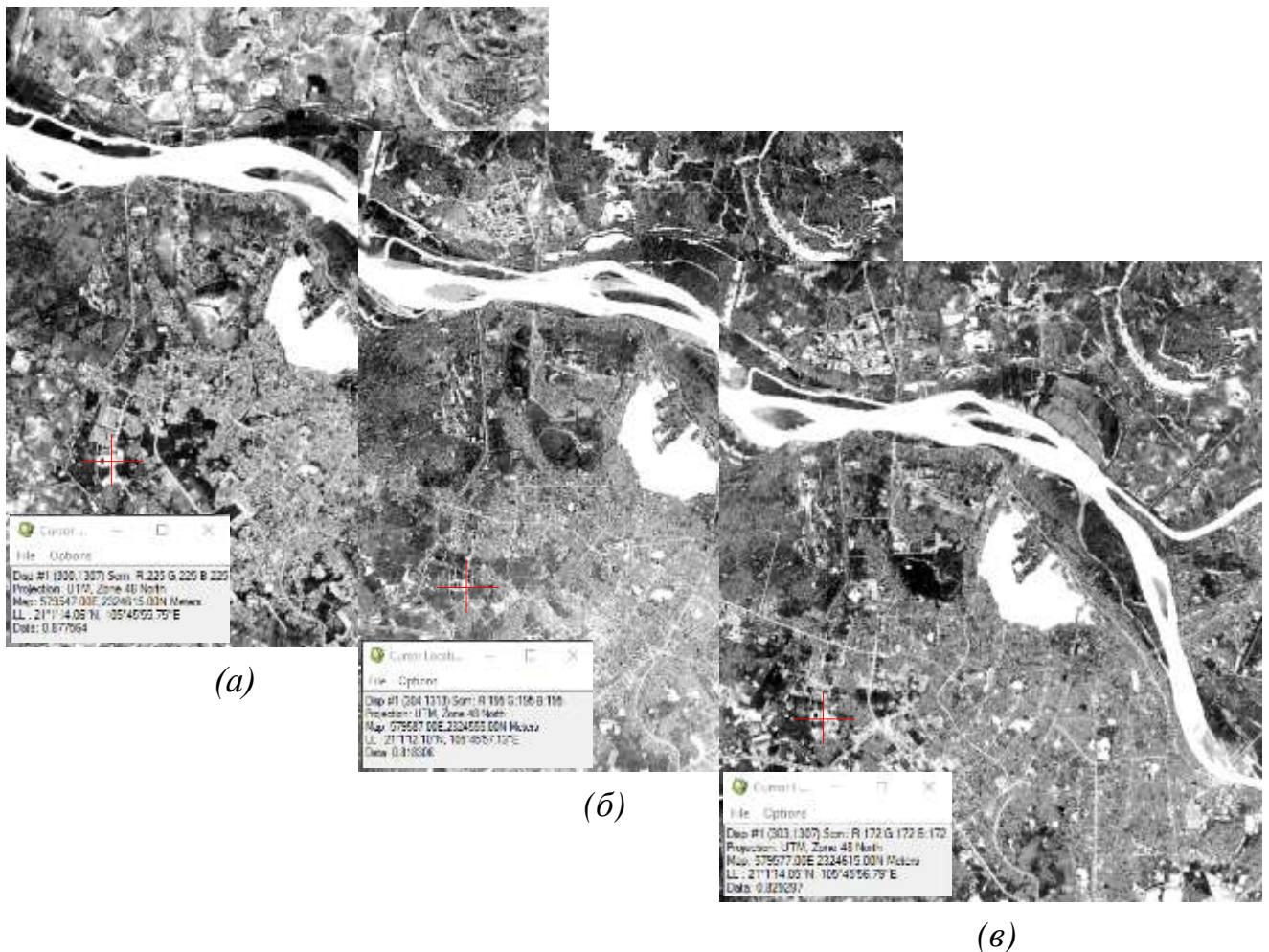


Рисунок 3.13 – Цифровые изображения ISI индекса и их значения для водонепроницаемой поверхности в 2003 г. (а), 2007 г. (б) и 2011 г. (в)

Вычисленные по данным SPOT значения индекса водонепроницаемой поверхности, на территорию города Ханой с помощью программ пакета ENVI 5.0. Результаты расчета индекса водонепроницаемой поверхности показано на рисунке 3.13.

Результаты классификации по времени изображения, показывающего распределение объектов водонепроницаемой поверхности в районе Ханоя с 2003 по 2011 год, показанные на рисунке 3.14.

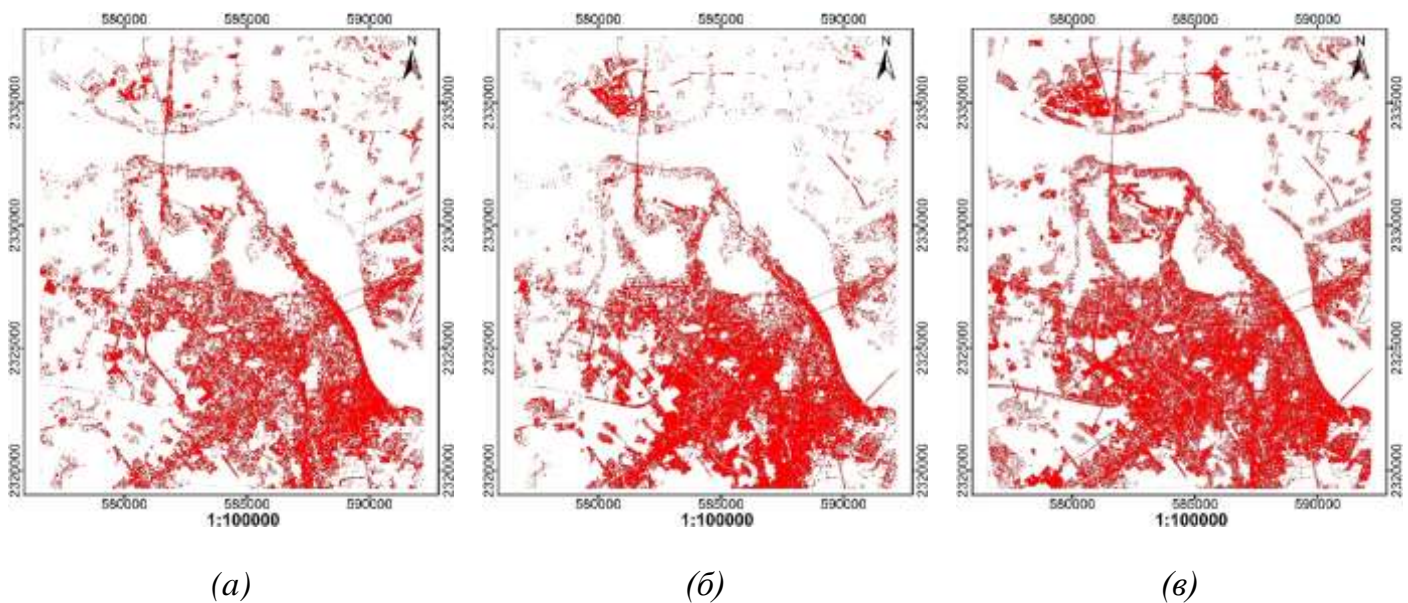


Рисунок 3.14 – Результаты классификации водонепроницаемых поверхностей в 2003 г. (а), 2007 г. (б) и 2011 г. (в)

После результатов классификации водонепроницаемых поверхностей и смешанной растительности, все результаты были объединены с картами состояния землепользования путем удаления поселения и отдельные строения всего класса и заменить его в качестве результаты водонепроницаемые поверхности и смешанная растительность с помощью инструменты Union в ArcMap 10.4. Результаты классификация землепользования в области Ханой показана на рисунке 3.15, 3.16 и 3.17.

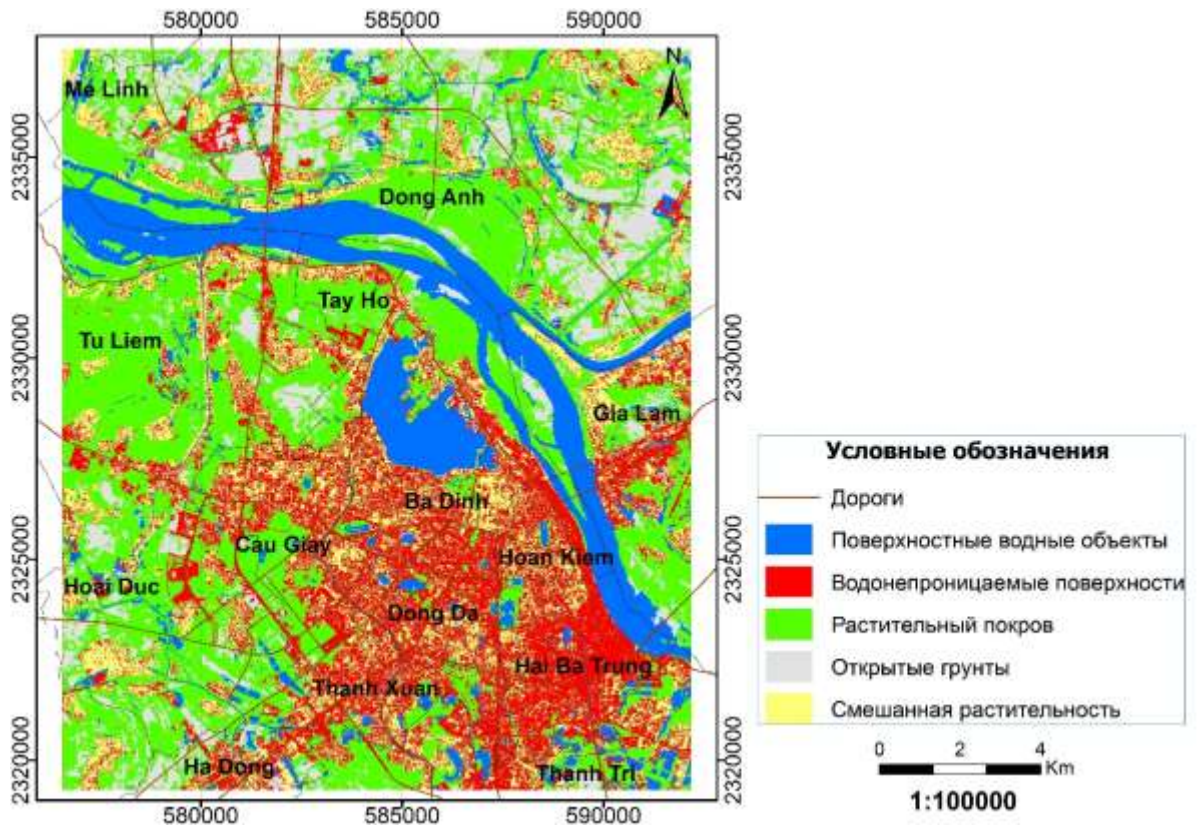


Рисунок 3.15 – Карты земных покровов и водонепроницаемых поверхностей в 2003 году

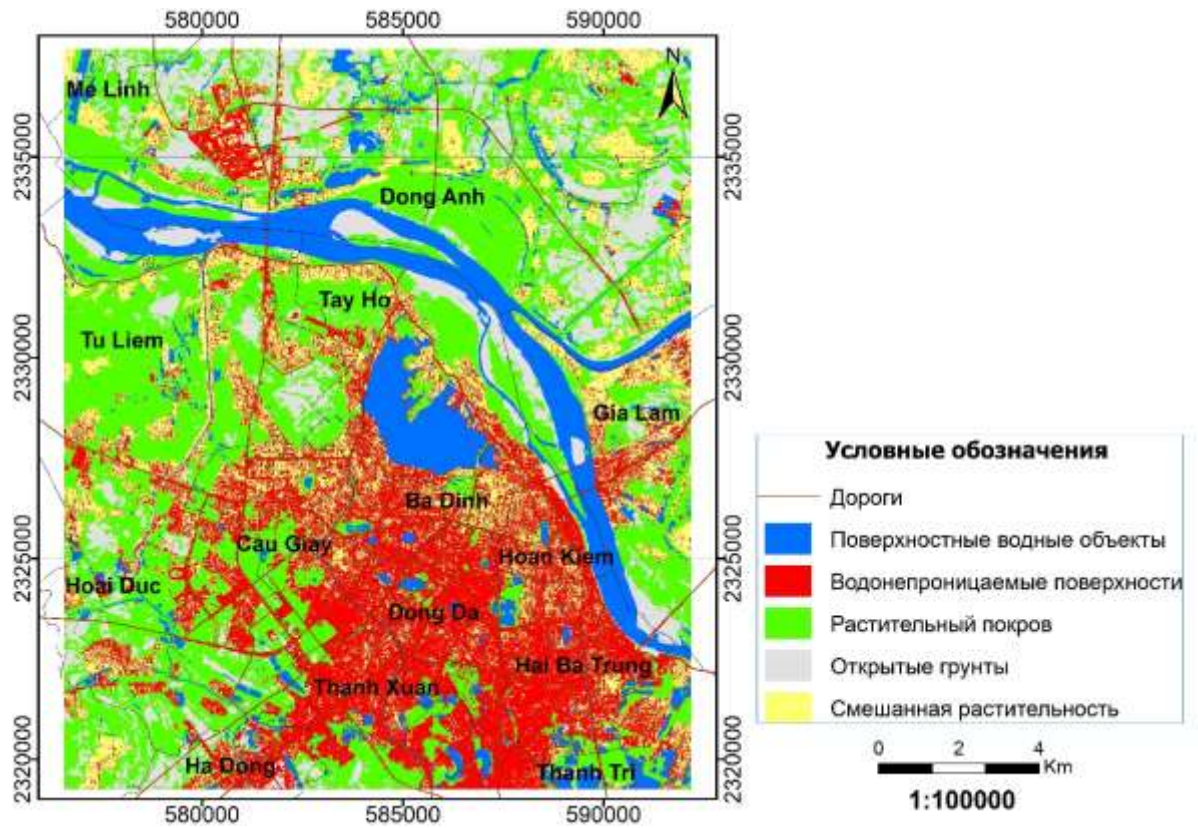


Рисунок 3.16 – Карты земных покровов и водонепроницаемых поверхностей в 2007 году

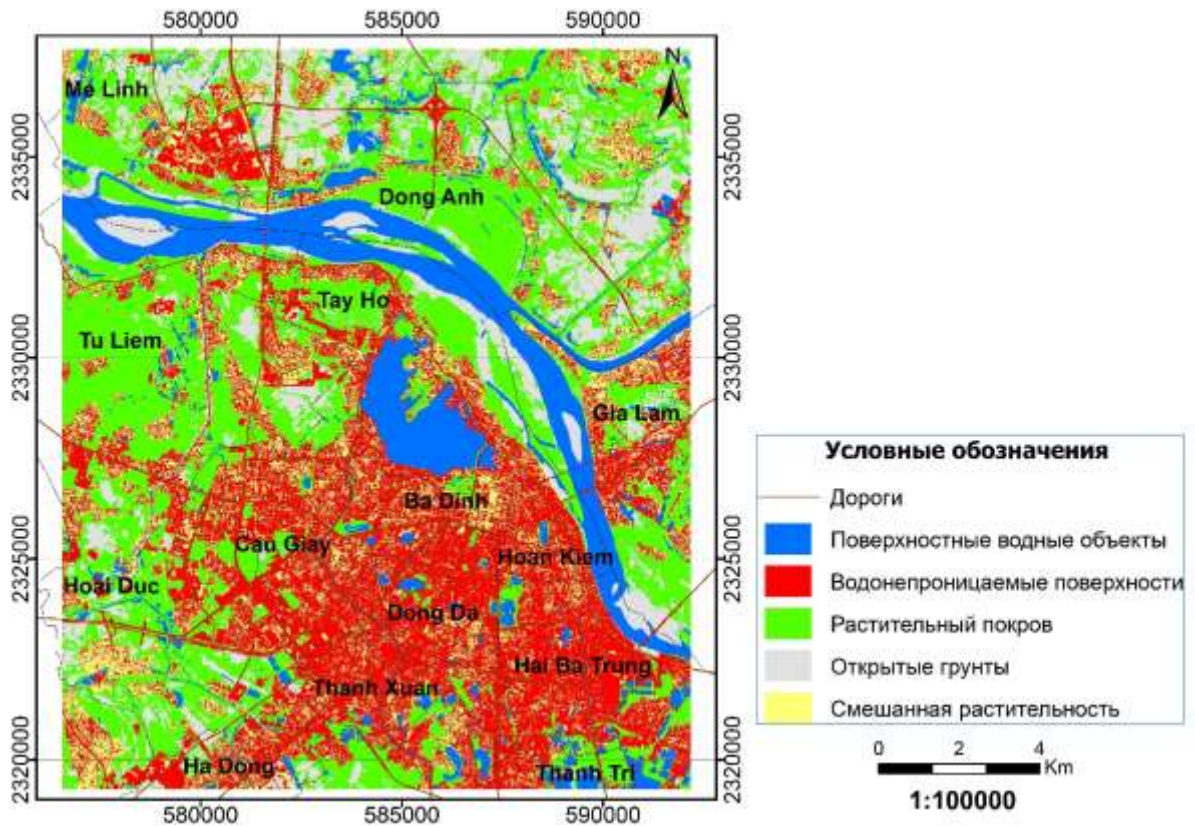


Рисунок 3.17 – Карты земных покровов и водонепроницаемых поверхностей в 2011 году

По данным карт были вычислены площади: поверхностные водные объекты, водонепроницаемых поверхностей, растительности, открытых грунтов и смешанной растительности, значения которых приведены в таблице 3.11.

Таблица 3.11 – Площади земных покровов и водонепроницаемых поверхностей, полученные из данных SPOT за период 2003-2011 гг.

| Класс объектов | 2003 г. | | 2007 г. | | 2011 г. | |
|-------------------------------|----------|-------|----------|-------|----------|-------|
| | га | % | га | % | га | % |
| Поверхностные водные объекты | 3899,77 | 13,56 | 3529,06 | 12,27 | 3465,95 | 12,05 |
| Водонепроницаемые поверхности | 6125,10 | 21,30 | 8426,88 | 29,30 | 10525,21 | 36,60 |
| Растительный покров | 10658,67 | 37,07 | 10157,38 | 35,32 | 9301,15 | 32,34 |
| Открытые грунты | 3312,35 | 11,52 | 3762,43 | 13,08 | 3499,72 | 12,17 |
| Смешанная растительность | 4760,47 | 16,55 | 2880,61 | 10,02 | 1964,33 | 6,83 |
| Итого | 28756,36 | 100 | 28756,36 | 100 | 28756,36 | 100 |

Полученные результаты позволяют сделать вывод, что площадь водонепроницаемых поверхностей постепенно увеличивать (6125,1 га (21,3%), 8426,9 га (29,3%), и 10525,2 га (36,6%) в 2003, 2007 и 2011 годах соответственно). В то время как площадь смешанной растительности уменьшается от 4760,5 га (16,6%) до 1964,3 га (6,8%) в течение 2003 - 2011 периода, как показано на рисунке 3.18.

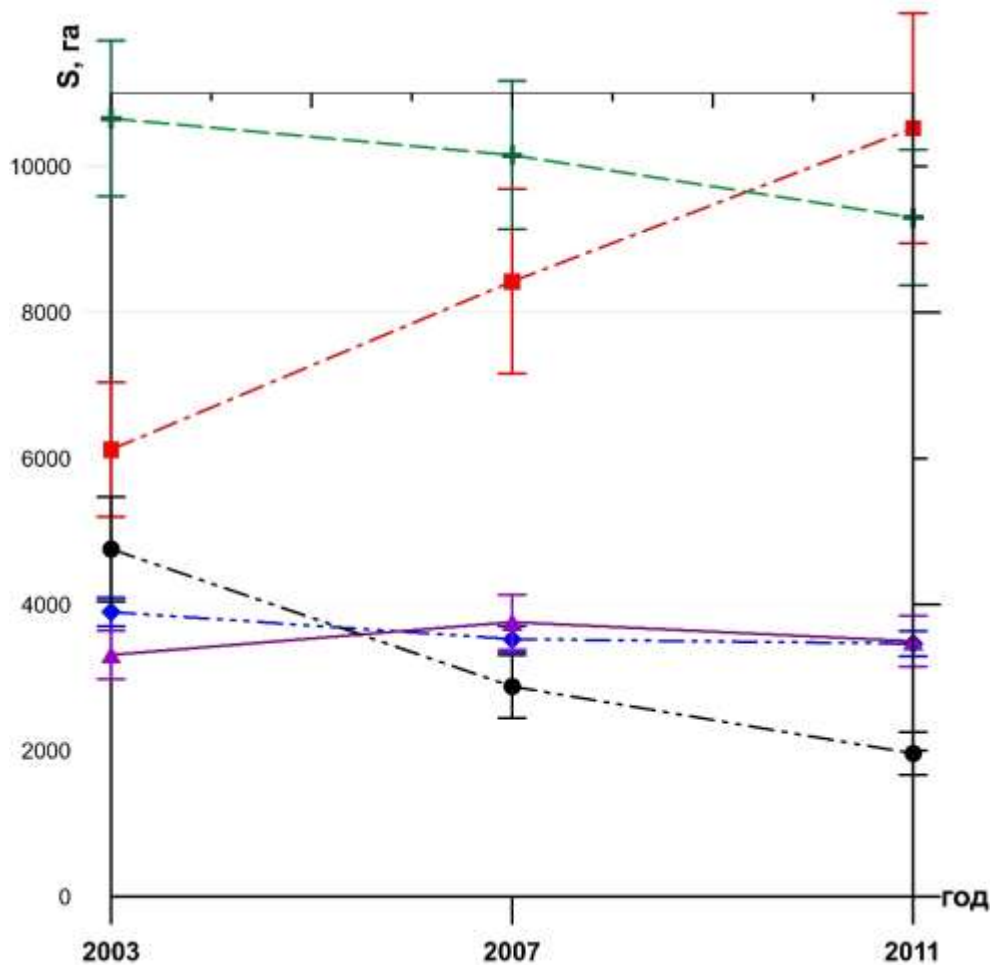


Рисунок 3.18 – Изменение площадей земных покровов и водонепроницаемых поверхностей:

- ◆— — поверхностные водные объекты; —▲— — открытые грунты;
- — водонепроницаемые поверхности;
- +— — растительный покров; —●— — смешанная растительность

Оценка динамики землепользования в Ханое

После есть классификации результатов, полученных со спутника

изображений, мы выполнили анализ перекрытия между классами объектов на разных период, чтобы наблюдать и определять изменение землепользования о пространстве, площади. Этот процесс выполняется с помощью программного обеспечения ArcMap 10.4 (рисунок 3.19).

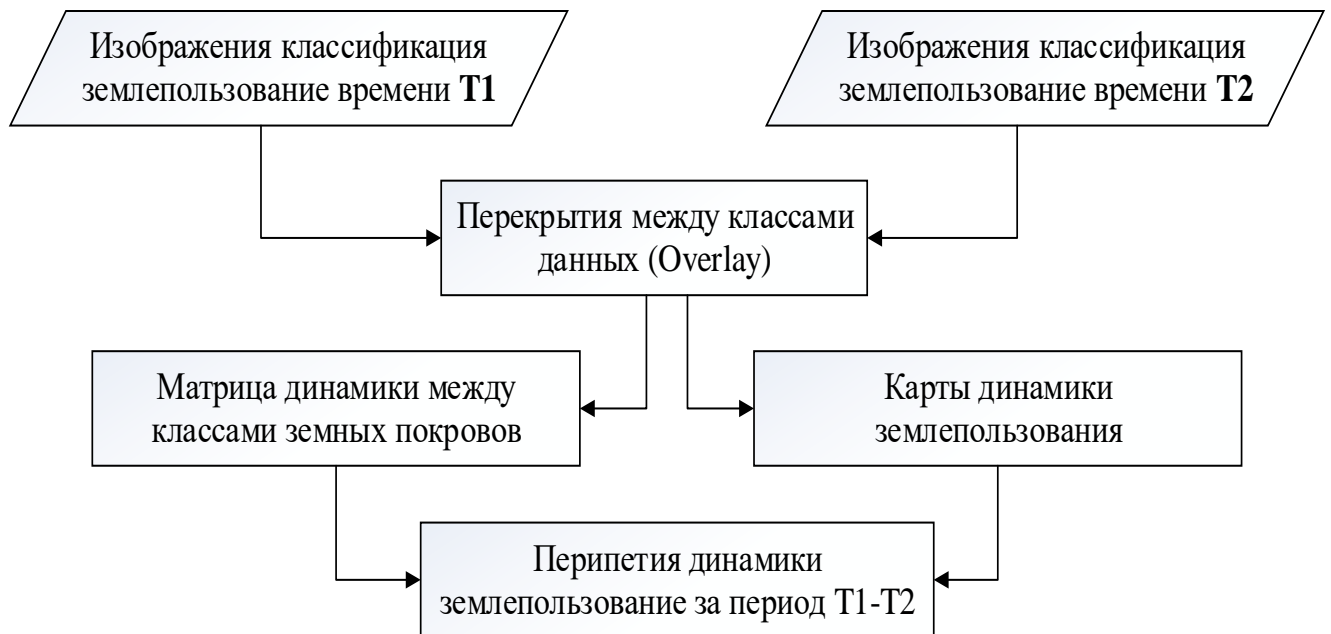


Рисунок 3.19 – Схема оценка динамики после классификации в ArcMap

1. Анализ и оценка результатов динамики в землепользовании на этапе исследований.

Таблица 3.12 – Матрица динамики между классами земных покровов и водонепроницаемыми поверхностями за период 2003-2007 годы

| 2007 г. | 2003 г. | | | | | Итого 2003 г. (га) |
|-----------------------------------|----------------|----------------|-----------------|----------------|----------------|-----------------------|
| | П (га) | В (га) | Р (га) | О (га) | С (га) | |
| Поверхностные водные объекты (П) | 3274,47 | 29,67 | 36,89 | 552,92 | 5,82 | 3899,77 |
| Водонепроницаемые поверхности (В) | 15,57 | 6088,53 | 7,08 | 10,41 | 3,51 | 6125,10 |
| Растительный покров (Р) | 159,58 | 183,08 | 10103,49 | 142,82 | 69,70 | 10658,67 |
| Открытые грунты (О) | 72,61 | 127,96 | 5,56 | 3050,72 | 55,50 | 3312,35 |
| Смешанная растительность (С) | 6,83 | 1997,64 | 4,36 | 5,56 | 2746,08 | 4760,47 |
| Итого 2007 г. | 3529,06 | 8426,88 | 10157,38 | 3762,43 | 2880,61 | 28756,36 |

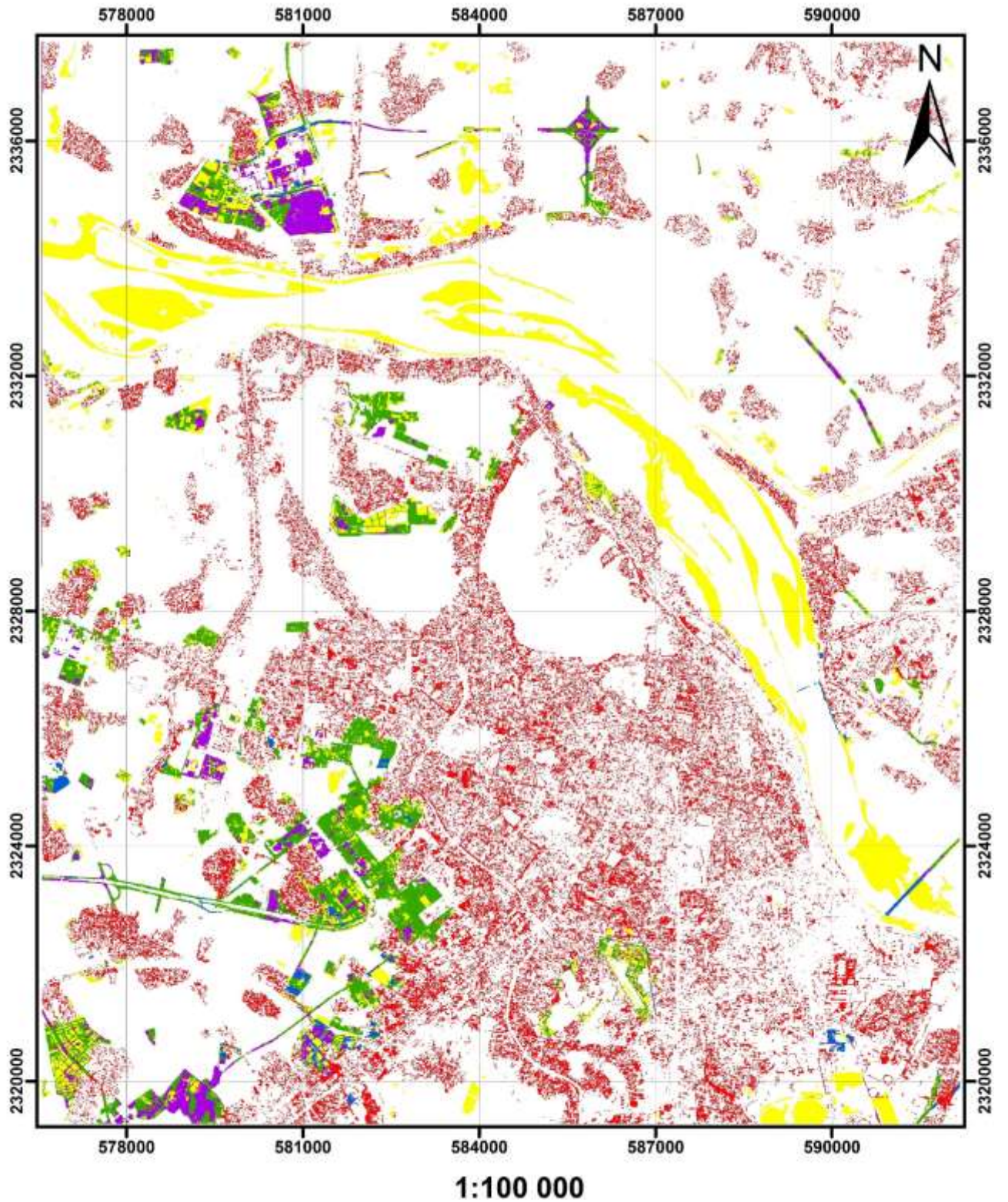
Таблица 3.13 – Матрица динамики между классами земных покровов и водонепроницаемыми поверхностями за период 2007-2011 годы

| 2011 г. | 2007 г. | | | | | Итого 2007 г. (га) |
|-----------------------------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|-----------------------|
| | П (га) | В (га) | Р (га) | О (га) | С (га) | |
| Поверхностные водные объекты (П) | 3270,46 | 37,80 | 20,63 | 191,17 | 9,00 | 3529,06 |
| Водонепроницаемые поверхности (В) | 0,72 | 8420,47 | 1,57 | 2,71 | 1,41 | 8426,88 |
| Растительный покров (Р) | 21,69 | 607,07 | 9261,91 | 32,42 | 234,29 | 10157,38 |
| Открытые грунты (О) | 173,00 | 232,51 | 7,02 | 3271,62 | 78,28 | 3762,43 |
| Смешанная растительность (С) | 0,08 | 1227,36 | 10,02 | 1,80 | 1641,35 | 2880,61 |
| Итого 2011 г. | 3465,95 | 10525,21 | 9301,15 | 3499,72 | 1964,33 | 28756,36 |

2. Изменения землепользования за период 2003-2011 годы

На данной карте также показаны дополнительные классы, такие как поверхностные водные объекты - водонепроницаемые поверхности, растительный покров - водонепроницаемые поверхности, открытые грунты - водонепроницаемые поверхности и смешанная растительность - водонепроницаемые поверхности. Каждый класс земных покровов представлен определенным цветом для различения данного класса среди других классов (рисунок 3.20).

Относительное изменение площади земных покровов представлено в виде матрицы динамики площадей различных классов покрытий земной поверхности и водонепроницаемых поверхностей за период 2003 - 2011 годы (таблица 3.14). Так, например, изменение площади водонепроницаемых поверхностей (между 2003 и 2011 годами) составляет 3142,2 га за счет замещения класса смешанной растительности на водонепроницаемые поверхности. Это изменение отражено на рисунке 3.21. Кроме того, часть площади растительного покрова и открытых грунтов, была замещена на площади водонепроницаемых поверхностей 882,5 га и 340,2 га соответственно.



— нет изменений;
 — другие изменения – водонепроницаемые поверхности;
 —
 поверхностные водные объекты – водонепроницаемые поверхности;
 — растительный
 покров – водонепроницаемые поверхности;
 — открытые грунты – водонепроницаемые
 поверхности;
 — смешанная растительность – водонепроницаемые
 поверхности;

Рисунок 3.20 – Динамика земных покровов и водонепроницаемых поверхностей за период 2003-2011 гг.

Таблица 3.14 – Матрица динамики между классами земных покровов водонепроницаемыми поверхностями за период 2003-2011 годы (га)

| 2011 г. | 2003 г. | | | | | Итого 2003г. |
|-----------------------------------|----------------|----------------|----------------|----------------|----------------|--------------|
| | (П) | (В) | (Р) | (О) | (С) | |
| Поверхностные водные объекты (П) | 3180,82 | 74,59 | 49,39 | 583,02 | 11,95 | 3899,77 |
| Водонепроницаемые поверхности (В) | 15,96 | 6085,76 | 10,53 | 10,53 | 2,32 | 6125,10 |
| Растительный покров (Р) | 171,07 | 882,47 | 9221,28 | 92,36 | 291,49 | 10658,67 |
| Открытые грунты (О) | 91,07 | 340,19 | 7,97 | 2807,94 | 65,18 | 3312,35 |
| Смешанная растительность (С) | 7,03 | 3142,20 | 11,98 | 5,87 | 1593,39 | 4760,47 |
| Итого 2011 г. | 3465,95 | 10525,21 | 9301,15 | 3499,72 | 1964,33 | 28756,36 |

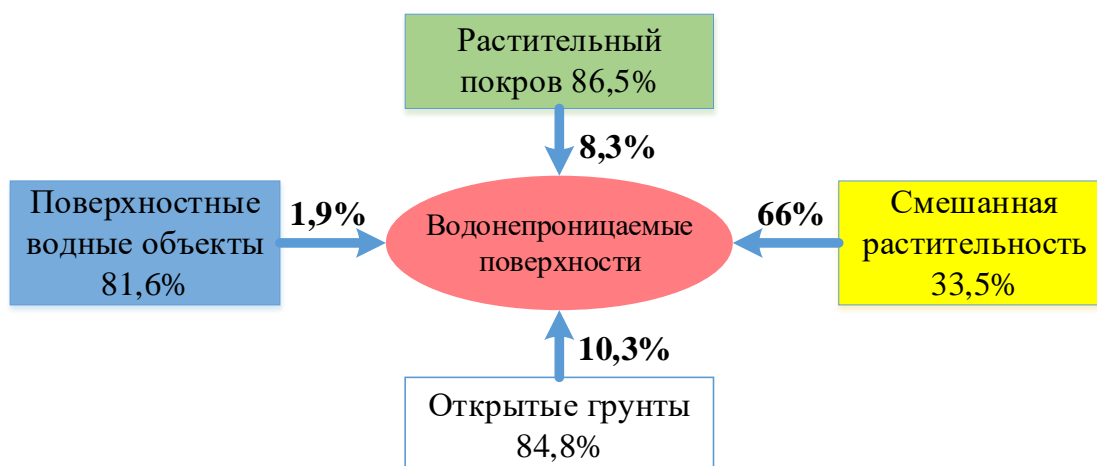


Рисунок 3.21 – Процентное соотношение площадей различных классов земных покровов, перешедших в водонепроницаемые поверхности за период 2003-2011 гг.

Из рисунка 3.21 видно, что за период с 2003 по 2011 годы произошли большие изменения среди классов и других земных покровов, но нами рассматривалось только увеличение площади водонепроницаемых поверхностей, вызванное изменением площади поверхности водных объектов, растительного покрова и открытых грунтов. Процентное соотношение земных покровов (смешанной растительности, поверхностных водных объектов, растительного покрова и открытых грунтов), показано на рисунке 3.21. Переход от растительности к непроницаемым поверхностям является доминирующим переходом для процесса урбанизации в мегаполисе Ханой, что объясняется политикой планирования землепользования,

предусматривающей доминирующие преобразование сельскохозяйственных земель в другие классы землепользования.

3.4. Прогнозирование тенденции замещения различных видов землепользования в мегаполисе Ханой на 2019 и 2027 годы

В данной работе было проведено исследование по прогнозированию структуры землепользования в мегаполисе Ханой на 2019 и 2027 годы с использованием модели Маркова. Модель представляет собой пространственный переход, основанный на том, что области перехода и их вероятности генерируются из карт временного ряда землепользования, с последующим прогнозированием конверсии видов землепользования на определенное время в будущем. По нашему мнению, проведение такого исследования важно для понимания текущего сценария и планирования будущего развития структуры землепользования мегаполиса.

В этом исследовании модель Маркова была выполнена с использованием программного обеспечения IDRISI Selva[®], версия 17.0 [119]. Программное обеспечение IDRISI, разработанное Clark Labs в США является одной из лучших платформ для проведения Марковского моделирования.

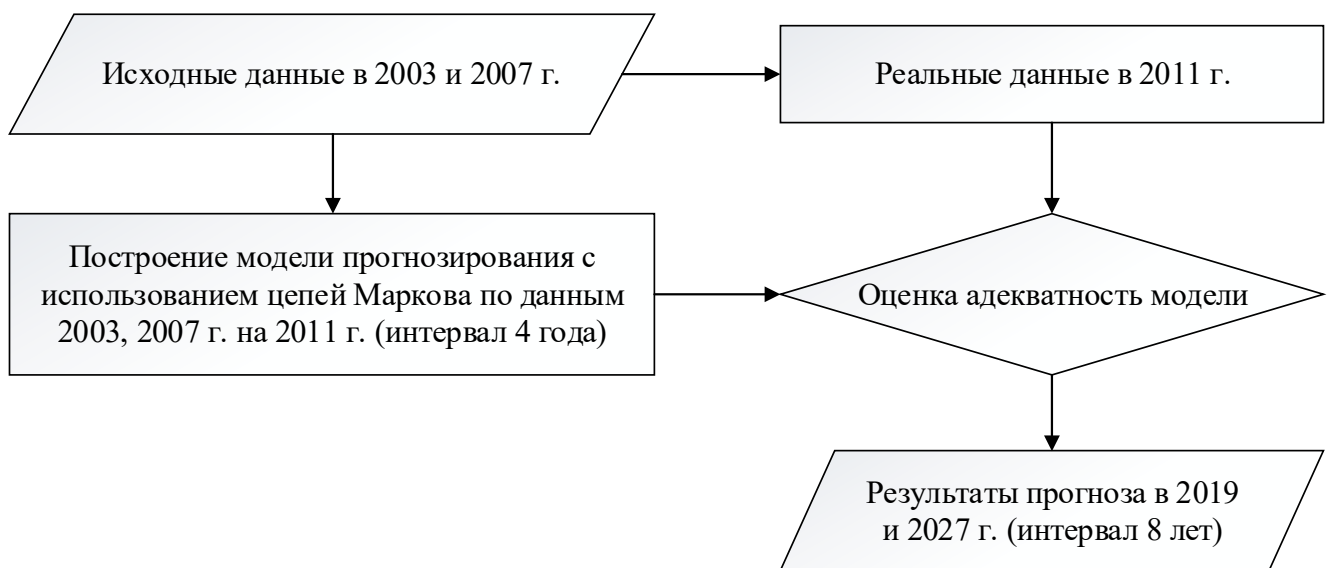


Рисунок 3.22 – Блок-схема использование цепей Маркова для прогнозирования конверсии видов землепользования

Для подтверждения модели, площади моделируемых типов землепользования необходимо сравнить с их фактической площадью. Таким образом, моделируемые типы землепользования 2011 года, полученные из карты землепользования в 2003 и 2007 год с временным шагом 4 года сравнивали с землепользованием в 2011 году классифицирован от SPOT-5 изображения, полученного в 2011 году. Для доказательства пригодности модели используется тест хи-квадрат χ^2 , выраженный формулой (3.10) (см. таблицу 3.15).

Таблица 3.15 – Валидация прогноза изменений в землепользовании на основе модели Маркова

| Класс объектов | Тест хи-квадрата | | | | |
|-------------------------------|---------------------------|--------------------------|-------|--------------------|-----------------------|
| | Моделируемое значение (O) | Фактическое значение (E) | (O-E) | (O-E) ² | (O-E) ² /E |
| Поверхностные водные объекты | 32,23 | 34,65 | -2,42 | 5,87 | 0,17 |
| Водонепроницаемые поверхности | 99,32 | 105,25 | -5,93 | 35,18 | 0,33 |
| Растительный покров | 96,82 | 93,01 | 3,81 | 14,56 | 0,15 |
| Открытые грунты | 41,16 | 34,99 | 6,17 | 38,08 | 1,09 |
| Смешанная растительность | 18,01 | 19,64 | -1,63 | 2,66 | 0,13 |
| Итого | 287,56 | 287,56 | 0 | 96,37 | 1,88 |

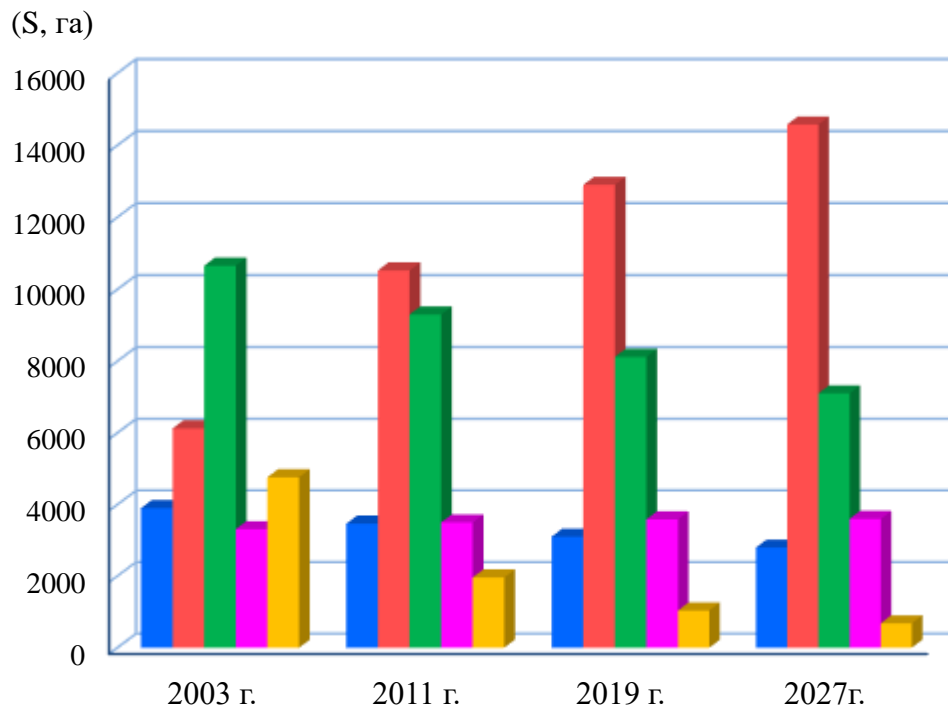
При числе степеней свободы = 5 $\chi^2_{0,05}(5) = 11,07$

$$\chi^2 = \sum \frac{(O-E)^2}{E} = 1,88 \quad (3.10)$$

Данные, приведенные в таблице 3.15, показывают, что между смоделированным и фактическим значением нет существенной разницы (1,88 намного меньше 11,07). Поэтому модель Маркова может быть использована в прогнозе землепользования в мегаполисе Ханой. Затем, данные за 2003 и 2011 гг. используются для создания прогностической модели Маркова на 2019 и 2027 гг., результаты показаны на таблице 3.17, 3.18 и рисунке 3.24, 3.25. Валидация прогноза изменений землепользования в Ханое на указанные периоды представлена в таблице 3.16 и рисунке 3.23.

Таблица 3.16 – Изменение тенденции типов землепользования, моделируемых марковской моделью

| Класс объектов | Площадь (га) | | | |
|-------------------------------|--------------|----------|-----------------|-----------------|
| | 2003 г. | 2011 г. | 2019 г. | 2027 г. |
| Поверхностные водные объекты | 3899,77 | 3465,95 | 3102,92 | 2795,15 |
| Водонепроницаемые поверхности | 6125,10 | 10525,21 | 12902,69 | 14576,65 |
| Растительный покров | 10658,67 | 9301,15 | 8124,79 | 7103,02 |
| Открытые грунты | 3312,35 | 3499,72 | 3586,95 | 3600,14 |
| Смешанная растительность | 4760,47 | 1964,33 | 1038,98 | 681,34 |
| Итого | 28756,36 | 28756,36 | 28756,36 | 28756,36 |



■ — растительный покров; ■ — смешанная растительность; ■ — открытые грунты;
 ■ — поверхностные водные объекты; ■ — водонепроницаемые поверхности

Рисунок 3.23 – Прогнозные результаты изменения типов землепользования на период 2003-2027 гг.

Основываясь на картах землепользования в 2003 и 2011 гг., модель цепи Маркова с временным шагом 8 лет использовалась для прогнозирования типов землепользования в 2019 и 2027 гг. Согласно таблице 3.16, увеличенная площадь непроницаемых поверхностей в 2019 и 2027 гг. составили около 8,27% и 14,09% от общей

площади исследования соответственно из-за конверсии растительности (4,09% и 7,64% от общей площади исследования соответственно) и поверхностные водные объекты (1,26% и 2,33% от общей площади исследования соответственно) и смешанная растительность (3,22% и 4,46% от общей площади исследования, соответственно). Кроме того, незначительное увеличение площади открытые грунты может быть связано с потерей растительности и поверхностных водных объектов, которые вызываются изменением цели землепользования. Эти преобразования между типами землепользования могут быть ценной информацией для городского планирования в районе Ханоя.

Таблица 3.17 – Матрица вероятности первичного перехода типов землепользования в городе Ханой в период 2003-2011 гг. и прогноз 2019 г.

| 2011 г. | 2019 г. | | | | |
|-----------------------------------|---------|--------|--------|--------|--------|
| | (П) | (В) | (Р) | (О) | (С) |
| Поверхностные водные объекты (П) | 0,8158 | 0,0191 | 0,0127 | 0,1493 | 0,0031 |
| Водонепроницаемые поверхности (В) | 0,0026 | 0,9936 | 0,0017 | 0,0019 | 0,0001 |
| Растительный покров (Р) | 0,0160 | 0,0792 | 0,8652 | 0,0086 | 0,0310 |
| Открытые грунты (О) | 0,0275 | 0,1027 | 0,0025 | 0,8476 | 0,0197 |
| Смешанная растительность (С) | 0,0015 | 0,6601 | 0,0025 | 0,0012 | 0,3347 |

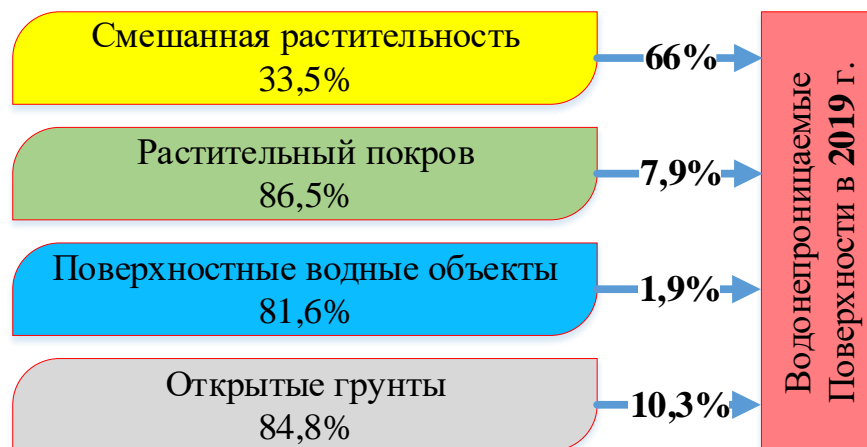


Рисунок 3.24 – Прогнозные результаты конверсии видов землепользования на водонепроницаемые поверхности период 2011- 2019 гг.

Таблица 3.18 – Матрица вероятности первичного перехода типов землепользования в городе Ханой в период 2003-2011 гг. и прогноз 2027 г.

| 2011 г. | 2027 г. | | | | |
|-----------------------------------|---------|--------|--------|--------|--------|
| | (П) | (В) | (Р) | (О) | (С) |
| Поверхностные водные объекты (П) | 0,6699 | 0,0530 | 0,0218 | 0,2484 | 0,0069 |
| Водонепроницаемые поверхности (В) | 0,0048 | 0,9877 | 0,0032 | 0,0040 | 0,0003 |
| Растительный покров (Р) | 0,0274 | 0,1688 | 0,7490 | 0,0174 | 0,0374 |
| Открытые грунты (О) | 0,0461 | 0,2028 | 0,0049 | 0,7228 | 0,0234 |
| Смешанная растительность (С) | 0,0035 | 0,8771 | 0,0042 | 0,0030 | 0,1122 |



Рисунок 3.25 – Прогнозные результаты конверсии видов землепользования на водонепроницаемые поверхности период 2011- 2027 гг.

Проведенные нами исследования по моделированию процесса замещения/конверсии видов землепользования показали, что цепи Маркова представляют собой достаточно мощный математический инструмент для описания процесса конверсии видов землепользования с учётом его динамики. Можно описывать не только вероятностное распределение площадей, занятых под различные виды землепользования, но и вероятности конверсии различных видов землепользования. Это, в свою очередь, позволит проводить исследования временной изменчивости структуры землепользования на математических моделях не только в заданных условиях, когда точно определены виды и динамика скорости

конверсии землепользования, но и в «приближённых к реальным» условиях, когда точное изменение скорости конверсии не определено, а лишь задано с определённой вероятностью. Кроме того, цепи Маркова хорошо поддаются автоматизации и позволяют в автоматическом режиме рассчитать не только вероятность той или иной динамики процесса конверсии, но и вероятность появления тех или иных переходных режимов конверсии видов землепользования.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе представлены результаты исследований, выполненных автором самостоятельно. Полученные результаты можно рассматривать как решение научной задачи посвященной разработке методики обнаружения и прогнозирования замещения видов землепользования на водонепроницаемые поверхности по материалам разновременных многозональных космических съемок. Автором диссертации с использованием геоинформационных технологий и автоматизированных методов цифровой обработки изображений выполнены экспериментальные исследования по практической апробации, разработанной автором методики обнаружения и прогнозирования замещения видов землепользования на водонепроницаемые поверхности. В качестве тестовой территории был выбран мегаполис г. Ханой.

В результате проведенных автором научных исследований получены следующие новые научные результаты:

- Автоматизированная методика обнаружения и прогнозирования замещения видов землепользования на водонепроницаемые поверхности по материалам многозональных космических съёмок;
- Картосхемы индексов SI, SAVI, NDWI, и индекса водонепроницаемых поверхностей (ISI) на территорию города Ханой, вычисленные с помощью MOOK на 2003, 2007 и 2011 гг.;
- Прогнозные оценки замещения видов землепользования на водонепроницаемы поверхности на 2019 и 2027 гг. в городе Ханой (Вьетнам).

Результаты выполненных автором теоретических и экспериментальных исследований могут быть использованы научными организациями, ведущими исследования в области рационального природопользования, а также органами государственной власти различных уровней, связанных с управлением в области контроля и прогноза изменения структуры землепользования на территории мегаполиса, с целью предотвращения влияния негативных процессов на окружающую среду. Методические разработки, выполненные автором в ходе диссертационных исследований, целесообразно использовать при подготовке и переподготовке специалистов в области тематической обработки космических изображений.

Разработанная методика, базирующаяся на материалах космических съемок, позволяет снизить временные, трудовые и финансовые затраты и сократить сроки получения актуальной информации об изменении структуры землепользования.

Таким образом, выполненные автором научные исследования позволили достигнуть основной цели диссертационной работы, а именно, разработать современную методику автоматизированного обнаружения и прогнозирования замещения видов землепользования на водонепроницаемые поверхности по материалам многозональной космической съемки.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Малинников В.А., Беленко В.В., Туна Ч.Ч., Чунг Ч.С.* Картографирование изменений поверхностных водных объектов города Ханой (Вьетнам) по материалам космических съемок // Известия высших учебных заведений Геодезия и аэрофотосъемка, 2015. – №4. – С. 89-94.

2. *Малинников В.А., Беленко В.В., Зеленков В.В.* Экспериментальные исследования тематического дешифрирования космических изображений для целей инженерно-экологических изысканий застраиваемых территорий // Естественные и технические науки, 2013. – №5. – С. 182-187.

3. *Кругляк А.М., Леонтьев В.А., Сизов А.П., Антипов А.В., Скорохватов С.Н., Кузина Е.П., Зверев А.Т., Малинников В.А., Марчуков В.С., Миртова И.А.* Возможности применения космических методов в целях осуществления мониторинга земель крупнейших городов (на примере г. Москвы) // Известия высших учебных заведений. Геодезия и аэрофотосъемка, 2015. – №2. – С. 89-108.

4. *Маликова О.В., Братков В.В.* Возможности картографирования ландшафтов особо охраняемых природных территорий черноморского побережья кавказа на основе разновременных спутниковых изображений // в сборнике: Геоинформационное картографирование в регионах России Материалы VII всероссийской научно-практической конференции. Воронежский государственный университет; Воронежское отделение Русского географического общества, 2015. – С. 105-109.

5. *Зверев А.Т., Аджян А.А.* Теоретические основы использования космических снимков для характеристики инженерно-геологических условий территории // Известия высших учебных заведений. Геодезия и аэрофотосъемка, 2009. – № 4. – С. 60-62.

6. *Антипов А.В., Зверев А.Т., Кругляк А.М., Кузина Е.П., Леонтьев В.А., Малинников В.А., Марчуков В.С., Миртова И.А., Сизов А.П., Скорохватов С.Н., Сладкопечев С.А.* Методические указания по ведению топографического мониторинга территории города Москвы по материалам космической съемки для решения задач

мониторинга фактического использования земель // Депонированная рукопись, 23.11.2004. – № 1838-B2004

7. *Зверев А.Т.* Разработка теории экосистемного подхода для решения фундаментальных проблем экологического картографирования при комплексной оценке экологических обстановок // Известия высших учебных заведений. Геодезия и аэрофотосъемка, 2007. – № 3. – С. 124-126.

8. *Зверев А.Т., Малинников В.А., Донов В.В.* Методика многоуровневого линейментного анализа аэрокосмических изображений и использование ее для оценки оползневой опасности // Приложение к журналу Известия вузов. Геодезия и аэрофотосъемка. Сборник статей по итогам научно-технической конференции, 2009. – № 2-1. – С. 21-23.

9. *Журкин И.Г., Чабан Л.Н.* Выбор и расчет показателей при геоинформационном моделировании природно-ресурсного потенциала интенсивно развивающихся территорий // Известия высших учебных заведений. Геодезия и аэрофотосъемка, 2011. – № 3. – С. 102-107.

10. *Журкин И.Г., Чабан Л.Н., Грузинов В.С.* Интегральная оценка и картографирование экологического состояния урбанизированных территорий // Славянский форум, 2014. – № 1 (5). – С. 81-87.

11. *Чабан Л.Н., Малинников В.А., Учаев Д.В., Учаев Д.В.* Методы отбора информативных каналов при тематической обработке гиперспектральных изображений // Известия высших учебных заведений. Геодезия и аэрофотосъемка, 2014. – № 4. – С. 63-74

12. *Бобров Е.А.* Социально-экологические проблемы крупных городов и пути их решения // Научные ведомости Серия Естественные науки, 2011. – № 15 (110).

13. *Тиганова И. А.* Водонепроницаемые покрытия // Эволюция инженерного благоустройства города Архитектон: известия вузов. Сентябрь 2015. – № 51.

14. *Нгуен Ван Нам.* Исследование эффективности метода объектно-ориентированной классификации типов земных покровов на многозональных космических изображениях // Известия вузов «Геодезия и аэрофотосъёмка», 2017. – №1. – С. 94-99.

15. *Малинников В.А., Нгуен Ван Нам.* Использование цепей Маркова и данных ДЗЗ для прогнозирования конверсии видов землепользования в крупных городских агломерациях // Известия вузов «Геодезия и аэрофотосъёмка», 2017. – №5. – С. 99-105.

16. *Малинников В.А., Нгуен Ван Нам.* Методика обнаружения замещения видов землепользования на водонепроницаемые поверхности по многозональным космическим изображениям SPOT: Апробация на территории г. Ханой (Вьетнам) // Известия вузов «Геодезия и аэрофотосъёмка», 2017. – №3. – С. 87-94.

17. Лидер в сфере спутникового мониторинга / Режим доступа: <http://www.scanex.ru.p.pstl.live/data/satellites/spot-5/>

18. [электронный ресурс] / Режим доступа: http://mapexpert.com.ua/index_ru.php?id=5&table=КА

19. Кафедра Прикладной и компьютерной оптики [электронный ресурс] / Режим доступа: http://aco.ifmo.ru/el_books/image_processing/1_01.html

20. *Малинников В.А., Стеценко А.Ф., Алтынов А.Е., Попов С.М.* Мониторинг природной среды аэрокосмическими средствами, Москва. 2009.

21. *Кринов Е.Л.* Спектральная отражательная способность природных образований // Изд. АН СССР - Ленинград, 1947.

22. *Романов А.А., Рубанов К.А.* Сравнение методов объектно-ориентированной и нейросетевой классификации данных дистанционного зондирования Земли на основе материалов Landsat 5 и Orbview-3 // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса, 2012. – Т.9. – №4. – С. 29-36.

23. *Дейвис Ш.М., Ландгребе Д.А., Филлипс Т.Л. и др.* Дистанционное зондирование: количественный подход // Под ред Ф.Свейна и Ш. Дейвис. Пер. с англ.- М.: Недра, 1983. – 415 с.

24. *Лабутина И.А.* Дешифрирование аэрокосмических снимков // учеб. пособие – Москва: Аспект Пресс, 2004. – 184 с.

25. *Чан Чонг Туан.* Разработка методики обнаружения и картографирования изменений поверхностных водных объектов по материалам космических съёмок // Диссертация на соискание учёной степени кандидата технических наук, 2016.

26. *Кронберг, П.* Дистанционное изучение Земли // Москва, Мир, 1988.
27. *Lu D., Weng Q. and Li G.* Residential population estimation using a remote sensing derived impervious surface approach // *International Journal of Remote Sensing*, 2006. – Vol 27 (16). – pp. 35-53.
28. *Kressler F., Kim Y., Steinnocher K.* Object-oriented land cover classification of panchromatic KOMPSAT-1 and SPOT-5 data // *Proceedings of IGARSS 2003 IEEE*, July 2003.
29. *Ashbindu Singh.* Review Article Digital change detection techniques using remotely-sensed data // *International Journal of Remote Sensing*, 1989. Vol 10 (6). – pp. 989-1003.
30. *Malila.* Change vector analysis: An approach for detecting forest changes with Landsat, symposium on machine processing of remotely sensed data and soil // *Information systems and remote sensing and soil Survey*. 1980.
31. *Lambin E.F.* Change-Vector Analysis in Multitemporal Space: A Tool to Detect and Categorize Land-Cover Change Processes Using High Temporal-Resolution Satellite Data, MODIS Publications // *Remote Sensing of Environment*, 1994. – Vol 48. – pp. 231-243.
32. *Lu D., Weng Q.* A survey of image classification methods and techniques for improving classification performance // *International Journal of Remote Sensing*, 2007. – Vol 28 (5). – pp. 823–870.
33. *Singh A.* Tropical forest monitoring using digital Landsat data in northeastern India // Ph.D. dissertation, University of Reading, Reading, U.K. 1984.
34. *Stow D.A., Tinney L.R. and Estes J.E.* Deriving land use/land cover change statistics from Landsat: A study of prime agricultural land // *Proceedings of the 14th International Symposium on Remote Sensing of Environment held in Ann Arbor in 1980*, 1980. – pp. 1227-1237.
35. *Coppin P., Jonckheere I., Nackaerts K., Muys B., Lambin E.* Digital change detection methods in ecosystem monitoring: A review // *International Journal of Remote Sensing*, 2004. – Vol 25 (9). – pp. 1565-1596.

36. *Brandt Tso, Paul Mather*. Classification methods for remotely sensed data // Taylor & Francis Group, LLC. 2009.

37. *Marangoz A.M., Oruc M., Buyuksalih G*. Object-oriented image analysis and semantic network for extracting the roads and buildings from ikonos pan-sharpened images // ISPRS Proceedings of the XXth congress of international society for photogrammetry and remote sensing, Istanbul, Turkey, 2004. – pp. 12-23.

38. *Ursula C Benz, Peter Hofmann, et al*. Multi-resolution, object-oriented fuzzy analysis of remote sensing data for GIS-ready information // ISPRS Journal of photogrammetry & remote sensing, 2004. – Vol 58. – pp. 239- 258.

39. *Ghassemian H., Landgrebe D.A*. Object-oriented feature extraction method for image data compaction // Control systems magazine, IEEE, 1988. – Vol. 8 (3). – pp. 42-48.

40. *Geneletti D. and Gorte B.G.H*. A method for object-oriented land cover classification combining Landsat TM data and aerial photographs // International journal of remote sensing, 2003. – Vol. 24, No 6. – pp. 1273-1286.

41. *Liu Yongxue, Li Manchun, Mao Liang, Xu Feifei, Huang Shuo*. Review of Remotely Sensed Imagery Classification Patterns Based on Object-oriented Image Analysis // Chinese Geographical Science, 2006. – Vol. 16 (3). – pp. 282-288.

42. *Gao Yan*. Pixel based and object-oriented image analysis for coal fire research // MSc thesis, International Institute for Geo-Information Science and Earth Observation (ITC), Enschede, The Netherlands. 2003.

43. *Sun Xiaoxia, Zhang Jixian, Liu Zhengjun*. A comparison of Object-oriented and pixel-based classification approaches using Quickbird imagery // Chinese Academy of Surveying and Mapping, 2005.

44. *Bauer T., Steinnocher K*. Per-parcel land use classification in urban areas applying a rule-based technique // In: GeoBIT/GIS, 2001. Vol. 6. – pp. 24-27.

45. *Martin Herold, Joseph Scepan*. Object-oriented mapping and analysis of urban land use/cover using IKONOS data // Proceedings of 22nd EARSEL Symposium “Geoinformation for European-wide Integration, Prague, Czech Republic. 2002.

46. *Oruc M., Marangoz A. M. and Buyuksalih G*. Comparison of pixel-based and

object-oriented classification approaches using Landsat-7 ETM spectral bands // Thesis. Konguldak Karaelmas University. 2011. Web. Jan 2013.

47. Trung tam Quoc te nghien cuu bien doi toan cau (ICARGC), su dung phan mem eCognition cho phan loai dinh huong doi tuong Dai hoc quoc gia Ha noi. 2010.

48. *Gao Yan, Maathuis, Zhang Xiangmin, Vandijk*. Comparison of pixel-based and object-oriented image classification approaches - A case study in a coal fire area, Wuda, Inner Mongolia, China // *International Journal of Remote Sensing*, 2006. – Vol. 27 (18). – pp. 4039-4055.

49. *Aplin P. and Atkinson M*. Sub-pixel land cover mapping for per-field classification // *International Journal of Remote Sensing*, 2001. – Vol. 22. – pp. 2853-2858.

50. *Dean A.M. and Smith G.M*. An Evaluation of Per-Parcel Land Cover Mapping Using Maximum Likelihood Class Probabilities // *International Journal of Remote Sensing*, 2003. – Vol. 24 (14). – pp. 2905-2920.

51. *Lloyd C.D., Berberoglu S., Curran P.J. & Atkinson P.M*. A comparison of texture measures for the per-field classification of Mediterranean land cover // *International Journal of Remote Sensing*, 2004. – Vol. 25. – pp. 3943-3965.

52. *Harris, Ventura*. The integration of geographic data with remotely sensed imagery to improve classification in an urban area // *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 1995. – Vol. 61. – pp. 993-998.

53. *Jansen, Molenaar*. Terrain objects, their dynamics and their monitoring by integration of GIS and remote sensing // *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1995. – Vol. 33. – pp. 749-758.

54. *Bektas Balcik, F*. Mapping and Monitoring Wetland Environment by Analysis of Different Satellite Images and Field Spectroscopy // *Istanbul Technical University, PhD thesis*, 2010. – 87 p.

55. *Zha Y., Gao J. and Ni S*. Use of Normalized Difference Built-Up Index in Automatically Mapping Urban Areas from TM Imagery // *International Journal of Remote Sensing*, 2003. – Vol. 24. – pp. 583-594.

56. *Huete A., Justice C. and Liu H*. Development of Vegetation and Soil Indexes for MODIS-EOS // *Remote Sensing of Environment*, 1994. – Vol. 49 (3). – pp. 224-234.

57. *Jensen J.R.* Introductory digital image processing. Prentice Hall, Upper Saddle River, NJ. 2005. – 526 p.

58. *Pairman D., McNeill S & Belliss S.* Impervious Surface Mapping for the Auckland Region. Prepared by Landcare Research for Auckland Regional Council // Auckland Regional Council Technical Report, 2010.

59. *Thomas Lillesand, Ralph W. Kiefer, Jonathan Chipman.* Remote sensing and image interpretation, 7th Edition, 2015. – 579 p.

60. *Cihlar, Jansen.* Fromland cover to land-use: a methodology for efficient land-use mapping over large areas // *The Professional Geographer*, 2001. Vol. 53 (2). – pp. 275-289.

61. *United Nations.* Kyoto protocol to the United Nations framework convention of climate change, 1998.

62. *Sala O.E., Chapin F.S., Armesto J.J, Berlow E, Bloomfield J.* Biodiversity global biodiversity scenarios for the year 2100 // *Science*, 2000. – Vol. 287 (5459). – pp. 1770-1774.

63. *Vitousek P.M., Mooney H.A., Lubchenco J., Melillo J.M.* Human domination of earth's ecosystems // *Science*, 1997. – Vol. 277 (5325). – pp. 494-499.

64. *Jing Chen, Bo-Ming Sun, Dan Chen, Xin Wu, Gang Wang.* Land Use Changes and Their Effects on the Value of Ecosystem Services in the Small Sanjiang Plain in China // *Scientific World Journal*, 2014. <http://dx.doi.org/10.1155/2014/752846>

65. *Lambin E. F., Geist H. J., and Ellis E.* Causes of land-use and land-cover change // Washington DC: Encyclopedia of Earth, Environmental Information Coalition, National Council for Science and the Environment. 2007.

66. *Bilsborrow, Okoth-Ogendo.* Population driven changes in land use in developing countries // *Ambio*. 1992. – Vol. 21. – pp. 37-45.

67. *Navin Ramankutty, Jonathan A. Foley, Nicholas J. Olejniczak.* People on the Land: Changes in Global Population and Croplands during the 20th Century // *Ambio*, 2002. – Vol. 31 (3). – pp. 251-257.

68. *Tine Ningal, Hartemink A.E., Bregt A.K.* Land use change and population growth in the Morobe Province of Papua New Guinea between 1975 and 2000 // *Journal*

of Environmental Management, 2008. – Vol. 87. – pp. 117-124.

69. *Turner, Clark, Kates, Richards, Mathews, Meyer.* The Earth as Transformed by Human Action: global change and regional changes in the biosphere over the past 300 years // Cambridge University Press, with Clark University, 1990.

70. *Burchell R.W., Listokin D., & Galley C.C.* Smart growth: More than a ghost of urban policy past, less than a bold new horizon // Housing Policy Debate, 2000. – Vol. 11(4). – pp. 821-879.

71. *Carruthers J.I.* The impacts of state growth management programmes: A comparative analysis // Urban Studies, 2002. – Vol. 39(11). – pp. 1959-1982

72. *Gu Z., Sun Q. & Wennersten R.* Impact of urban residences on energy consumption and carbon emissions: An investigation in Nanjing, China // Sustainable Cities and Society, 2013. – Vol. 7. – pp. 52-61.

73. *Litman T.* Analysis of public policies that unintentionally encourage and subsidize urban sprawl // The new climate economy, 2015.

74. *McGee T.G.* The Urban Future of Viet Nam Reconsidered // Hanoi, 2000. – pp.1-18.

75. *Nguyen Thi Thieng, Pham Thuy Huong, Patrick Gubry, Franck Castiglioni, Jean-Micheal Cusset.* Do thi Viet Nam trong thoi ky qua do // The gioi, 2006.

76. *Pham Sy Liem.* Nang cao hieu qua quan li phat trien do thi theo qui hoach // Hoi thao quan li xay dung do thi theo qui hoach, Hanoi, 2013.

77. *D'Oleire-Oltmanns S., Coenradie B., Kleinschmit B.* An object-based classification approach for mapping migrant housing in the mega-urban area of the Pearl River Delta (China) // Remote Sensing, 2011. – Vol. 3 (8). – pp. 1710-1723.

78. *Durieux L., Lagabrielle E., Nelson A.* A method for monitoring building construction in urban sprawl areas using object-based analysis of SPOT 5 images and existing GIS data // ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing. 2008. – Vol. 63. – pp. 399-408.

79. *Tormos T., Durrieu S., Kosuth P., Dupuy S., Villeneuve B., Wasson J.G.* Object based image analysis for operational fine-scale regional mapping of land cover within river corridors from multispectral imagery and thematic data // International Journal of

Remote Sensing, 2012. – Vol. 33 (14). – pp. 4603-4633.

80. *Russell G. Congalton*. A Review of Assessing the Accuracy of Classifications of Remotely Sensed Data // Remote Sensing and Environment, 1991. – Vol. 37. – pp. 35-46.

81. *Russell G. Congalton, Kass Green*. Assessing the Accuracy of Remotely Sensed Data: Principles and Practices // Taylor & Francis Group, 2008.

82. *Root R.R, Miller L.D*. Identification of urban watershed units using remote multispectral sensing // Completion report, 1972. – 46 p.

83. *Geohegan J., Wainger L.A. and Bockstael N.E*. Spatial landscape indices in a hedonic framework: an ecological economics analysis using GIS // Ecological Economics, 1997. – Vol. 23 (3). – pp. 251-264.

84. *Opeyemi Z.A*. Change detection in land use and land cover using remote sensing data and GIS: A case study of Ilorin its environs in Kwara state // [MSc dissertation]. University of Ibadan, Nigeria. Professional Paper 442C, Washington, 2006.

85. *Yin D., Chen X., Yan L., Huang Z*. The research and realization of the land-use change forecasting model in development zones based on RS and GIS // Geoscience and Remote Sensing Symposium, IGARSS, IEEE International, 2007. – pp. 3429-3432.

86. *Sylla L., Xiong D., Zhang H.Y., Bangoura S.T*. A GIS technology and method to assess environmental problems from land use/cover changes: Conakry, Coyah and Dubreka region case study // Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Science, 2012. – Vol. 15. – pp. 31-38.

87. *Baker W.L*. A review of models of landscape change // Landscape Ecology, 1989. – Vol. 2. – pp. 111-133.

88. *E. Terrence Slonecker, David B. Jennings and Donald Garofalo*. Remote sensing of impervious surface: a review // Remote Sensing Review, 2001. – Vol 20 (3). – pp. 227-255.

89. *Theobald D.M., Hobbs N.T*. Forecasting rural land-use change: A comparison of regression and spatial transition-based models // Geographical and Environmental Modelling, 1998. – Vol. 2. – pp. 65-82.

90. *Landis J.D*. The California urban future model: A new-generation of metropolitan simulation models // Environment and Planning B, 1994. Vol. 21. – pp. 399-420.

91. *Turner M.G.* Spatial simulation of landscape changes in Georgia: a comparison of three transition models // *Landscape Ecology*, 1987. – Vol. 1. – pp. 29-36.

92. *Wear D.N., Turner M.G., Naiman R.J.* Land cover along an urban-rural gradient: implications for water quality // *Ecological Applications*, 1998. – Vol. 8. – pp. 619-630.

93. *Clarke K.C., Hoppen S., Gaydos L.* A self-modifying cellular automaton model of historical urbanization in the San Francisco Bay area // *Environment and Planning B*, 1997. – Vol. 24. – pp. 247-261.

94. *Clarke K.C., Gaydos L.J.* Loose-coupling a cellular automaton model and GIS: Long-term urban growth prediction for San Francisco and Washington/Baltimore // *International Journal of Geographic Information Science*, 1998. – Vol. 12. – pp. 699-714.

95. *Weng Q.* Land use change analysis in the Zhujiang delta of China using satellite remote sensing, GIS and stochastic modeling // *Journal of Environmental Management*, 2002. – Vol. 64. – pp. 273-284.

96. *Dongjie G., Weijun G., Kazuyuki W., Hidetoshi F.* Land use change of Kitakyushu based on landscape ecology and Markov model // *Journal of Geographical Sciences*, 2008. – Vol. 18. – pp. 455-468.

97. *Huang W., Liu H., Luan Q., Bai M., Mu X.* Monitoring urban expansion in Beijing, China by multi temporal TM and spot images // *IEEE Proceedings, IGARSS*, 2008. – Vol. 4. – pp. 695-698.

98. *Dadhich P.N., Hanaoka S.* Remote sensing, GIS and Markov's method for land use change detection and prediction of Jaipur district // *Journal of Geomatics*, 2010. – Vol. 4. – pp. 9-15.

99. *Zhang R., Tang C., Ma S., Yuan H., Gao L., Fan W.* Using Markov chains to analyze changes in wetland trends in arid Yinchuan plain, China // *Math Comput Model*, 2011. Vol. 54. – pp. 924-930.

100. *Logsdon M.G., Bell J.E., Westerlund V.F.* Probability mapping of land use change: a GIS interface for visualizing transition probability // *Computers, Environment and Urban Systems*, 1996. Vol. 20. – pp. 389-398.

101. *Muller R.M., Middleton J.* A Markov model of land-use change dynamics in

the Niagara region, Ontario, Canada // *Landscape Ecology*, 1994. Vol. 9. – pp. 151-157.

102. *Jianping L.I., Bai Z., Feng G.* RS-and-GIS-supported forecast of grassland degradation in southwest Songnen plain by Markov model // *Geo-spatial Information Science*, 2005. Vol. 8. – pp. 104-109.

103. *Lambin E.F.* Modeling and monitoring landcover change processes in tropical regions // *Progress in Physical Geography*, 1997. Vol. 21(3). – pp. 375-393.

104. *Estes J.E. and Loveland T.R.* Characteristics, sources, and management of remotely-sensed data // *Geographical Information Systems: Principles, Techniques, Applications, and Management*, 1999. – pp. 667–675

105. *Vu Anh Tuan.* Nghien cuu anh huong cua bien dong lop phu thuc vat toi qua trinh xoi mon song Tra Khuc bang phuong phap vien tham // *Dai hoc khoa hoc tu nhien Hanoi*, 2003.

106. *Jensen J.R.* Introduction to Digital Image Processing: A remote sensing perspective, 2nd edition, Piscataway, NJ: Prentice Hall. 1996.

107. *Song, Woodcock, Seto, Lenney, Macomber.* Classification and change detection using Landsat TM data: when and how to correct atmospheric effect // *Remote Sensing of Environment*, 2001. – Vol. 75. – pp. 230-244.

108. *Meyer, Itten, Kellenberger, Sandmeier, Sandmeier.* Radiometric corrections of topographically induced effects on Landsat TM data in alpine environment // *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 1993. – Vol. 48. – pp. 17-28.

109. Городские сведения города Ханой [электронный ресурс] - Режим доступа: <http://www.vietnamplus.vn/tai-nguyen-nuoc-o-viet-nam-doi-dao-nhung-van-hieu/249370.vnp>

110. *Althausen J.D.* What remote sensing system should be used to collect the data // *Manual of Geospatial Science and Technology*, Taylor and Francis, New York, 2002. – pp. 276-297.

111. *Samereh Falahatkar, Ali Reza Soffianian, Sayed Jamaledin Khajeddin, Hamid Reza Ziaee, Mozghan Ahmadi Nadoushan.* Integration of Remote Sensing data and GIS for prediction of land cover map // *International Journal of Geomatics and Geosciences*, 2011. – Vol. 1 (4). – pp. 847-864.

112. *Wilson J.R., Blackman C. and Spann G.W.* Land use change detection using Landsat data // Proceedings of the 5th Annual Remote Sensing 4 Earth Resources Conference held in Tullahoma, Tennessee, 1976. – pp. 79-91.

113. *Jensen J.R., Cowen D.C.* Remote sensing of urban suburban infrastructure and socioeconomic attributes // Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 1998. – Vol. 65. – pp. 611-622.

114. *Lefsky M.A., Cohen W.B.* Selection of remotely sensed data // Remote Sensing of Forest Environments: Concepts and case studies, 2003. – pp. 13-46.

115. *Trimble: eCognition Developer 8.7: User Guide.* Trimble Germany GmbH, Trappentreustr.1, D-80339 München, Germany. 2011.

116. *Hanqiu X.* Modification of normalized difference water index (NDWI) to enhance open water feature in remotely sensed imagery // International Journal of Remote Sensing, 2006. – Vol. 27. – pp. 3025-3033.

117. *Murteira B.* Probabilidades e estatística. McGraw-Hill de Portugal, Vol. 2, 1990.

118. *Cabral P., Zamyatin A.* Markov processes in modeling land use and land cover changes in Sintra-Cascais, Portugal. DYNA, 2009. Vol. 76. – P. 191-198.

119. *J. Ronald Eastman.* IDRISI Selva Manual Version 17 // Clark University, 2012.

120. *Chen W.T., Zhang Z., Wang Y.X., Wen X.P.* Atmospheric Correction of SPOT5 land surface imagery // In: 2nd International Congress on Image and Signal Processing. IEEE, Tianjin, 2009.

121. *Gregg H., Angeles L.* Globalization, industrialization and urbanization in pre-World War II Southeast Asia // Explorations in Economic History, 2011. Vol. 48. – P. 20-36.

122. *Vu M.H., Kawashima H.* Effects of urban expansion on suburban farmers' livelihood in Vietnam: A comparative analysis of Ho Chi Minh City and Hanoi // Habitat International, 2017. Vol. 65. – P. 49-58

123. *Office, H.S.* Hanoi Statistical Yearbook. Statistics Publishing House (2003, 2008 and 2015).

124. *Park S., Jeon S., Kim S., Choi C.* Prediction and comparison of urban growth by land suitability index mapping using GIS and RS in South Korea // *Landscape and Urban Planning*, 2011. Vol. 99. – P. 104-114.

125. Mapgroup [электронный ресурс] / Режим доступа: <http://mapgroup.com.ua/kosmicheskie-apparaty/33-vietnam/116-vnredsatsat-1>

126. Innoter [электронный ресурс] / Режим доступа: <https://innoter.com/satellites/1087>

127. Innoter [электронный ресурс] / Режим доступа: <https://innoter.com/satellites/935>

128. *Murray Wu.* Estimating impervious surface distribution by spectral mixture analysis // *Remote Sensing of Environment*, 2003. – 493 p.

129. *Louisa J.M. Jansena, Antonio Di Gregorio.* Land-use data collection using the "land cover classification system": Results from a case study in Kenya // *Land Use Policy*, 2003. Vol. 20. – pp. 131-148.

130. *James R. Anderson, Ernest E. Hardy, John T. Roach, Richaar E. Witmer.* A land use and land cover classification system for use with remote sensor data // United States government printing office, Washington. 1976.

131. Landsat Science - Landsat 8 Overview [электронный ресурс] / Режим доступа: <https://landsat.gsfc.nasa.gov/landsat-8/landsat-8-overview/>

132. *Pham, Cu Van, Thi Hang Thuy Nguyen, and Dong Phan Nguyen.* Comparison of Pixel Based and Object Oriented Classifications in Land Cover Mapping in the Red River Delta – Example of Duy Tien District, Ha Nam Province, Vietnam // In 7th FIG Regional Conference, 2009. –pp. 1-9.

133. Земельное кодекс социалистической республики Вьетнам от 45/2013/QH13 [электронный ресурс] – Режим доступа: <http://vbpl.vn/TW/Pages/vbpq-toanvan.aspx?ItemID=32833&Keyword=lu%E1%BA%ADt%20%C4%91%E1%BA%A5t%20%C4%91ai%202013>

134. *Brabec E., Schulte S. and Richards P.L.* Impervious surfaces and water quality: a review of current literature and its implications for watershed planning // *Journal of Planning Literature*, 2002. – pp. 499-514.