

На правах рукописи



Стыценко Екатерина Александровна

**РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ АВТОМАТИЗИРОВАННОГО
ДЕШИФРИРОВАНИЯ РАСТИТЕЛЬНОГО ПОКРОВА С КОМПЛЕКСНЫМ
ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ РАЗНОСЕЗОННЫХ ЗОНАЛЬНЫХ
КОСМИЧЕСКИХ ИЗОБРАЖЕНИЙ**

Специальность 25.00.34 – Аэрокосмические исследования Земли, фотограмметрия

Автореферат

диссертации на соискание учёной степени кандидата технических наук

Москва – 2018

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность исследований. Решение многих задач рационального природопользования опирается на сведения о состоянии и использовании объектов растительного покрова земной поверхности. Исследование растительности требует самой актуальной и объективной информации, одним из основных источников получения которой в настоящее время являются системы дистанционного зондирования поверхности Земли из космоса. Дистанционные изображения отличаются высокой детальностью, способностью одновременного охвата обширных территорий, возможностью регулярных повторяющихся наблюдений и изучения труднодоступных территорий.

Развитие компьютерных технологий открыло перед применением материалов дистанционного зондирования широкие перспективы. Возможности автоматизированной обработки материалов съёмки позволяют существенно увеличить производительность работ, а разработка специализированных профессиональных программных пакетов обработки данных открывает доступ к созданию различных тематических продуктов широкому кругу пользователей.

Методы дистанционного зондирования основаны на регистрации отражённого или собственного приходящего от поверхности Земли электромагнитного излучения в широком спектральном диапазоне. Возможность распознавания различных объектов и изучение их свойств дистанционными методами обусловлены специфичностью поглощения, рассеивания, отражения и излучения электромагнитной энергии в различных зонах спектра для каждого вида земной поверхности, индивидуальные спектральные характеристики позволяют автоматически отделять одни объекты земной поверхности от других.

Но спектральная яркость различных объектов растительного покрова нередко имеет близкие значения, что не всегда позволяет достоверно распознать все классы растительности, требуемые для решения поставленных задач. Необходимость поиска методов, повышающих достоверность автоматизированного дешифрирования объектов растительного покрова, определяет актуальность данного исследования.

Степень разработанности проблемы. В настоящее время при создании тематических карт растительности автоматизированными методами путём классификации объектов спутниковых изображений специалистами предпринимаются попытки поиска различных методик классификации, повышающих её достоверность. Наиболее распространённым подходом является применение альтернативных параметров, таких как линейные комбинации зональных значений коэффициентов спектральных яркостей, различные спектральные вегетационные индексы, являющиеся функциями коэффициента спектральной яркости в нескольких спектральных каналах, спектральные признаки, рассчитанные на основе значений коэффициентов спектральных яркостей, использование преобразования в главные компоненты (Терехин Э.А., Курбанов Э.А., Борисова М.В., Жирин В.М. и другие авторы).

Некоторыми учёными-исследователями, такими как Кринов Е.Л., Малинников В.А. и другими авторами, доказана зависимость коэффициентов спектральной яркости объектов растительности от их состояния, в первую очередь от фазы вегетации. Следовательно, учёт сезонных вариаций спектрально-отражательных характеристик должен повысить распознаваемость разных типов растительности.

Для учёта динамики коэффициента спектральной яркости требуется получение космических изображений с достаточной частотой. Существенным преимуществом использования данных низкого пространственного разрешения является их регулярная периодичность, что повышает вероятность получения дистанционной информации, свободной от облаков в требуемые периоды времени. В нашей стране наиболее широко ведутся работы по созданию карт растительного покрова глобального масштаба по данным MODIS (пространственное разрешение 250, 500, 1000 м в разных спектральных каналах) с учётом сезонных вариаций спектрально-отражательных характеристик в Институте космических исследований РАН под руководством Барталёва С.А. Создание карт растительности основано на наличии огромного накопленного многолетнего архива данных, опирается на сложный специально разработанный

программный комплекс предварительной и тематической обработки большого объёма данных.

Для картографирования растительности территорий локального масштаба требуются дистанционные данные более высокого пространственного разрешения, которые не доступны с такой регулярностью. Так, периодичность съёмки спутника Landsat 8 (пространственное разрешение 30 м) – 1 раз в 16 суток, и на большей части изображений присутствует облачность. Тем не менее, российскими исследователям (Ершов Д.В., Гаврилюк В.А.) созданы карты растительности регионального масштаба (Московская область, Центральный Федеральный округ) с использованием непрерывного временного ряда данных Landsat, построенного по многолетним данным на основе пространственно-временного моделирования динамики спектральных яркостей основных типов наземных экосистем в течение вегетационного сезона, что также требует значительных временных и трудовых ресурсов.

Для решения многих локальных задач, связанных с организацией рационального природопользования, требуется создание достоверных карт растительности с применением методов, не требующих столь сложной обработки большого количества данных. Для создания карт растительности на небольшие территории, например, на территории муниципальных образований, важно обеспечить минимизацию вычислительных затрат при сохранении высокого уровня достоверности распознавания различных классов растительности.

Таким образом, для создания достоверных карт растительности локального уровня требуется разработка методики автоматизированного дешифрирования объектов растительного покрова, основанной на обосновании при помощи количественных характеристик целесообразности использования разносезонных данных, на определении оптимального количества и момента получения зональных космических изображений.

Анализ зарубежного опыта (Kalensky, Lo, PaxLenney and Woodcock, Oetter, Guershchman и другие) показал, что совместная обработка нескольких изображений, полученных преимущественно в сезоны, характеризующие

динамику фенологического развития растительности (лето, поздняя весна и ранняя осень), на различные территории земного шара (США, Канада, Аргентина, Египет и другие) приводит к увеличению точности детектирования различных типов земного покрова, что подтверждено количественными оценками.

Для территории, расположенной в средней полосе России, автором совместно с Марчуковым В.С. в 2009 году проведено исследование, показывающее, что совместная обработка трёх весенне-летних изображений, полученных с космического спутника Landsat 5 TM, повышает достоверность автоматизированного распознавания разных типов растительности.

Количественное доказательство целесообразности использования космических изображений, полученных также и в другие промежутки года (зима, ранняя весна, поздняя осень) не проведено в достаточной мере. Анализ мировых, в том числе российских, исследований показал недостаточную обоснованность выбора оптимального количества зональных космических изображений, обеспечивающих необходимую достоверность дешифрирования растительности.

Целью исследования является разработка методики автоматизированного дешифрирования растительного покрова земной поверхности с учётом сезонной динамики спектрально-отражательных характеристик объектов земного покрова.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие **задачи:**

- провести количественную оценку достоверности результатов совместного автоматизированного дешифрирования нескольких разносезонных космических изображений;

- определить оправданность использования нескольких разносезонных изображений в совместной автоматизированной обработке путём сравнения количественных показателей достоверности результатов классификации одиночных изображений и изображений, содержащих разносезонную спектральную информацию;

- выявить зависимость между количеством изображений, участвующих в совместной обработке, и достоверностью автоматизированной классификации;

- определить оптимальное количество и даты получения космических изображений, обеспечивающие достаточную достоверность детектирования классов растительности;

- разработать методику автоматизированного дешифрирования космических изображений, основанную на использовании зонально-временных признаков объектов растительного покрова с применением совместной обработки нескольких разносезонных космических изображений;

- создать карту растительности локального уровня, содержащую разнообразные классы растительности, с использованием предложенной методики.

Объектом исследования являются различные типы растительного покрова земной поверхности.

Предметом исследования являются методы автоматизированного тематического дешифрирования многозональных изображений земной поверхности с учётом сезонных вариаций спектрально-отражательных характеристик объектов растительного покрова.

Научная новизна результатов исследования заключается в том, что:

- впервые разработана методика автоматизированного дешифрирования растительного покрова с использованием разносезонных зональных космических изображений, основанная на учёте сезонной динамики спектрально-отражательных характеристик растительного покрова и на определении оптимального количества и дат получения космических изображений;

- проведена количественная оценка достоверности результатов классификации путём расчёта и сравнения обобщающих статистических параметров, рассчитанных по матрицам ошибок классификации, представляющих собой распределение пикселей контрольных объектов, зафиксированных при классификации верно или неверно как тот или иной класс;

- теоретически обоснована и экспериментально подтверждена возможность повышения достоверности карт растительности локального уровня с использованием разносезонных зональных космических изображений.

Теоретическая значимость работы состоит в разработке методов, повышающих достоверность результатов автоматизированной обработки космической информации при использовании совместной обработки нескольких разносезонных изображений одного года с достаточно высокой достоверностью распознавания объектов растительного покрова.

Практическая значимость работы состоит в возможности применения предложенной методики для создания достоверных карт растительности локального уровня широким кругом пользователей без дополнительной разработки сложных вычислительных комплексов как в производственных предприятиях, так и в рамках учебного процесса вузов картографо-геодезического профиля. В работе установлено, что разработанная методика позволяет выделять классы растительного покрова: типов сельскохозяйственных угодий (пашни, залежи, кормовые угодья), групп древесных пород (хвойный, лиственный, смешанный лес), территорий, подверженных процессам зарастания древесно-кустарниковой растительностью в различной степени, вырубок лесных насаждений, в т.ч. появившихся в год проведения исследования.

Методология и методы исследования. Для проведения исследования использованы разносезонные космические изображения Landsat 8 OLI (пространственное разрешение 30 м в спектральных каналах) 2014 года, снимки высокого пространственного разрешения, полученные из открытых геопорталов. Для решения поставленных задач в диссертационном исследовании использовались методы цифровой обработки изображений, пространственного анализа данных, распознавания образов путём проведения контролируемой и неконтролируемой классификации в программном комплексе ERDAS Imagine, методы математической статистики.

Основные научные результаты диссертации, выносимые на защиту:

- методика автоматизированного дешифрирования растительного покрова с использованием разносезонных зональных космических изображений;

- математический алгоритм количественной оценки характеристик преимущества совместной автоматизированной обработки нескольких разносезонных космических изображений относительно одиночных;

- математический алгоритм для обоснования выбора оптимального количества и дат получения космических изображений для обеспечения достаточной достоверности дешифрирования растительности;

- авторский оригинал карты растительности исследуемой территории с выделенными классами различных типов растительного покрова.

Соответствие паспорту научной диссертации. Диссертация соответствует паспорту научной специальности 25.00.34. – «Аэрокосмические исследования Земли, фотограмметрия», по пункту 4: «Теория и технология дешифрирования изображений с целью исследования природных ресурсов и картографирования объектов исследования».

Степень достоверности и апробация результатов исследования. Достоверность научных и практических результатов проведённых исследований определяется их согласованностью с результатами, полученными по другим методикам, корректным выбором адекватной статистической оценки, необходимым объёмом экспериментальных исследований, научно-методическим обоснованием признаков и объёмов обучающей и опорной выборок, использованием строгих методов анализа и обработки экспериментальных данных.

Основные положения диссертационной работы докладывались и обсуждались на Международной научно-практической конференции, посвящённой 95-летию факультета землеустройства и кадастров ВГАУ «Актуальные проблемы природообустройства, кадастра и землепользования» – Воронеж, 2016 г., 72-й научно-технической конференции студентов, аспирантов и молодых учёных МИИГАиК – Москва, 2017 г., XIV Конференции молодых учёных «Фундаментальные и прикладные космические исследования» – Москва, 2017 г.

Публикации. По материалам диссертации опубликовано 5 научных работ, в том числе 3 научные работы в рецензируемых журналах, рекомендованных ВАК России.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, трёх разделов, заключения, списка сокращений, списка литературы и шести приложений. Объем диссертации составляет 213 страниц, из них 49 страниц – приложения, диссертация включает 45 рисунков и 10 таблиц. Список литературы содержит 136 источников.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обоснована актуальность темы и определены направления исследования. Сформулирована цель диссертации, её научная новизна, практическая ценность, а также положения, выносимые на защиту.

В **разделе 1 «Изучение растительного покрова земной поверхности с использованием данных дистанционного зондирования»** рассмотрены физические основы особенностей использования данных дистанционного зондирования при изучении растительного покрова земной поверхности и основные современные системы получения космических изображений. Подробно приведена характеристика и история функционирования космических спутников серии Landsat, данные с последнего аппарата которой использованы при проведении диссертационного исследования.

В разделе кратко освещены общие принципы автоматизированной обработки изображений. Показано, что автоматизированное распознавание объектов земной поверхности основано на различиях спектрально-отражательных характеристик различных типов земных покровов.

Проанализированы современные методы, направленные на повышение достоверности классификации объектов растительного покрова, большинство из которых основываются на применении спектральных вегетационных индексов, различных спектральных преобразованиях, например, преобразование в главные компоненты.

Рассмотрены физические основы дешифрирования растительного покрова с учётом сезонной динамики спектрально-отражательных характеристик. Процессы накопления и разрушения хлорофилла и изменение содержания воды в них, связанные с фенологическими циклами, обуславливают вариации спектрально-отражательных характеристик растительности. Так как зависимость коэффициентов спектральной яркости от длины волны меняется не только для различных объектов, но и для одних и тех же объектов в зависимости от их состояния, в первую очередь, от фазы вегетации, то одним из способов повышения достоверности автоматизированной обработки изображений является использование временных признаков объектов земной поверхности, учёт сезонной динамики яркостных характеристик объектов растительного покрова.

Проанализированы современные исследования, в которых повышение достоверности дешифрирования объектов растительного покрова основывается на использовании разновременных изображений. Показано, что экспериментальных доказательств преимущества использования космических изображений, полученных во все сезоны года, не достаточно. Также выявлена недостаточная обоснованность выбора оптимального количества зональных космических изображений, обеспечивающих высокую достоверность дешифрирования растительности, что определяет необходимость проведения такого исследования.

В разделе 2 «Совместная автоматизированная обработка разносезонных космических изображений» описан процесс проведения эксперимента, направленного на выявление зависимости между количеством совместно обрабатываемых разносезонных изображений и достоверностью классификации и определение оптимального количества и дат получения изображений.

Территорией исследования является Кольчугинский район Владимирской области, для которого характерно примерно равное распределение площадей сельскохозяйственных угодий и лесных земель, развиты процессы зарастания сельскохозяйственных угодий древесно-кустарниковой растительностью. Площадь исследуемой территории составила 982 кв.км.

Для выполнения поставленных задач необходимо подобрать максимальное количество безоблачных изображений на одну территорию, полученных во все сезоны одного года. Временной период, которым ограничен выбор космических изображений, выбран равным одному году с целью избежать влияния флуктуаций (разногодичной изменчивости фитоценозов) и многолетней динамики (антропогенной и природной) состояния растительных покровов. Были выбраны шесть многозональных изображений на территорию Кольчугинского района Владимирской области 2014 года, полученных в даты, характеризующие максимально разнообразные состояния растительности:

1) 24 января (зима): нелесные территории (объекты гидрографии, сельскохозяйственные угодья, вырубленные участки леса) покрыты снегом;

2) 29 марта (ранняя весна): снежный покров уже отсутствует, так как в середине-конце марта 2014 года стояла аномально тёплая погода, и воздух прогревался $+10-15^{\circ}\text{C}$, рост травяной растительности и листвы у лиственной древесной растительности ещё не начался;

3) 9 мая (ранняя весна): начало роста естественной травяной растительности и листьев у лиственной древесной растительности;

4) 12 июля (середина лета): период активной вегетации растительности;

5) 20 августа (конец лета): период активной вегетации растительности;

6) 21 сентября (осень): начало увядания растительности.

Из-за наличия облачности не удалось подобрать изображение, полученное в период пожелтения листвы древесной растительности.

Для проведения исследования были использованы 6 каналов изображений Landsat 8: Blue (0.452-0.512 мкм), Green (0.533-0.590 мкм), Red (0.636-0.673 мкм), NIR (0.851-0.879 мкм), SWIR-1 (1.566-1.651 мкм), SWIR-2 (2.107-2.294 мкм), имеющие пространственное разрешение 30 м. Каналы Coastal - Aerosol (0.435-0.451 мкм), панхроматический (0.503-0.67 мкм), Cirrus (1.363-1.384 мкм), два тепловых канала (10.60-11.19 мкм и 11.50-12.51 мкм) не использовались для дешифрирования растительности, так как их применение направлено на изучение, в первую очередь, других объектов (изучение мелководья, облаков, выявление

пожаров, мелких частиц пыли и дыма в воздухе, бытового скопления тепла, анализ влажности почв).

На этапе предварительной обработки были созданы маски населённых пунктов, карьеров, линейных объектов (дороги, каналы, узкие лесные просеки), облаков путём векторизации снимков высокого разрешения (Яндекс.Карты, Google.Карты) в программном продукте MapInfo.Professional.

Для создания карты растительности было выделено три группы объектов земного покрова: древесная растительность, сельскохозяйственные угодья, другие типы земного покрова. К группе объектов «древесная растительность» отнесено 7 классов растительности: хвойный, смешанный и лиственный лес, молодой лес 1 и 2 – поросль леса с сомкнутостью крон примерно 10-30% и 30-80% соответственно, вырубки леса и появившиеся в год исследования вырубки леса. К группе объектов «сельскохозяйственные угодья» отнесено 3 класса растительности: пашня, залежь и кормовые угодья (сенокос и пастбище). К группе объектов «другие типы земного покрова» отнесены 3 класса: урбанизированные территории, объекты гидрографии и снежный покров. В Таблице 1 приведён перечень выделенных при автоматизированном дешифрировании классов с указанием их цветового обозначения на карте растительности.

Были созданы «синтезированные разносезонные изображения» – комбинации разного количества (от двух до шести) одиночных многозональных космических изображений, полученных со спутника Landsat 8 в разные сезоны 2014 г. Синтезированные разносезонные изображения создавались при помощи функции Layer Stack в программном продукте ERDAS Imagine путём объединения нескольких слоёв одиночных многозональных изображений в единое многослойное изображение. Перечень и характеристика синтезированных разносезонных изображений, составленных из многозональных изображений Landsat 8, представлен в Таблице 2. Большинство синтезированных разносезонных изображений включают в себя два наиболее информативными для анализа состояния растительного покрова летних изображения.

Таблица 1 – Классы объектов земной поверхности, выделенные на картах растительности

№	Группа объектов земного покрова	Название класса	Характеристика класса	Условное обозначение
1	Древесная растительность	Хвойный лес	Темнохвойные и светлохвойные древесные вечнозелёные насаждения, в пологе которых не менее 80% площади занимают кроны ели, сосны и другие виды хвойных деревьев	
2		Смешанный лес	Смешанные насаждения, в которых площади крон хвойных и лиственных пород деревьев представлены примерно в равных пропорциях (40-60%)	
3		Лиственный лес	Лиственные насаждения, в пологе которых не менее 80% занимают кроны берёзы и осины и других широколиственных пород	
4		«Молодой лес 1» - поросль леса (сомкнутость крон ~ 10-30%)	Поросль леса – участки молодого леса на бывших вырубках и сельскохозяйственных угодьях, не имеющие сплошного полога, для которой характерна сомкнутость крон примерно 10-30%	
5		«Молодой лес 2»- поросль леса (сомкнутость крон ~ 30-80%)	Поросль леса – участки молодого леса на бывших вырубках и сельскохозяйственных угодьях, не имеющие сплошного полога, для которой характерна сомкнутость крон примерно 30-80%	
6		Вырубки леса	Вырубленные участки леса	
7		Появившиеся вырубки - лесные участки, вырубленные в год исследования	Вырубки леса, появившиеся в 2014 году, лесные участки, вырубленные с июля по август-сентябрь	
8	Сельскохозяйственные угодья	Пашня	Сельскохозяйственное угодье, систематически обрабатываемое и используемое под посевы сельскохозяйственных культур, включая посевы многолетних трав, а также чистые пары. Посевы – обработанные и засеянные культурами пахотные земли, пары – пахотные земли, выведенные из использования на один вегетационный сезон для восстановления плодородия земель	
9		Залежь	Сельскохозяйственные угодья, ранее использовавшиеся как пашня, но не используемые больше года, начиная с осени, под посев сельскохозяйственных культур и под пар	
10		Кормовые угодья	Сенокосы и пастбища. Сенокос – сельскохозяйственное угодье, систематически используемое под сенокосение. Пастбище – сельскохозяйственное угодье, систематически используемое для выпаса животных	
11	Другие типы земного покрова	Урбанизированные территории	Населённые пункты, дороги, каналы, карьеры, узкие просеки	
12		Объекты гидрографии	Водные объекты: речные и озёрные внутренние водоёмы	
13		Снежный покров	Покрытые снегом объекты классов пашни, залежи, кормовых угодий, объектов гидрографии и вырубок по классифицированному зимнему изображению	

Методы контролируемой классификации требуют наличия готовых обучающих данных – сигнатур классов. Сигнатура класса – вся совокупность типичных для данного класса n -мерных векторов (в данном исследовании – 6-мерных векторов спектральных яркостей по количеству спектральных каналов). Сигнатуры создавались по оконтуренным на изображении эталонным участкам. Для каждого класса были выбраны несколько эталонных участков, которые в дальнейшем объединены в единый: 4 эталонных участка хвойного леса, 12 участков – смешанного леса, 8 – лиственного леса, 19 – молодого леса 1, 7 – молодого леса 2, 11 – вырубки, 2 – появившейся вырубки, 24 – пашни, 16 – залежи, 9 – кормовых угодий, 7 – гидрографии.

При формировании обучающих данных для создания достоверных репрезентативных выборок по выделяемым классам были использованы возможности RGB-синтезирования различных зональных изображений, сравнения состояния объектов в разное время года по разносезонным изображениям, проведён вспомогательный анализ изображений высокого разрешения.

При создании обучающих выборок была выполнена оценка их качества путём анализа эллипсоидов рассеяния классов в пространстве признаков и путём анализа статистической делимости классов методом трансформированной дивергенции. Анализ оценки качества обучающих выборок показал, что в разных сезонах разные классы объектов растительного покрова лучше разделяются (например, пашня, залежь и кормовые угодья имеют лучшую делимость в июле, залежи и вырубки – в марте). Следовательно, можно предположить, что автоматизированная совместная обработка нескольких разносезонных изображений даст конечный более достоверный вариант.

После создания и оценки обучающих выборок пиксели всех шести многозональных изображений и 13 синтезированных разносезонных изображений – различных их комбинаций – были классифицированы по выбранным классам, основанным на этих выборках, методом максимального правдоподобия.

В разделе 3 «Анализ результатов совместной автоматизированной обработки разносезонных изображений» приведён анализ результатов

совместной автоматизированной обработки разносезонных изображений и описана методика автоматизированного дешифрирование растительного покрова с использованием разносезонных изображений.

Оценка достоверности результатов классификации, предполагающая оценку точности совпадения полученных классов и классов местности, основана на методе построения матриц ошибок классификации. Для оценки результатов классификации была сформирована опорная выборка – созданы контрольные участки каждого класса объектов, представляющие собой пиксели, у которых известна принадлежность к определённому классу. Эти контрольные участки были выбраны из пикселей, не принадлежащих опорной выборке, без использования результатов классификации, опираясь на изображения сверхвысокого разрешения. Для каждого одиночного изображения и всех синтезированных разносезонных изображений были построены матрицы ошибок классификации, размерность которых определяется числом классов. Для каждого класса объектов было рассчитано число пикселей, определившихся как тот или иной класс.

В качестве обобщённых показателей достоверности по каждой матрице классификации были рассчитаны параметры:

1) Точность правильной классификации в классе – доля правильно классифицированных пикселей для каждого класса: ;

2) Доля пикселей, ошибочно отнесённых к классу: ;

3) Общая точность правильной классификации – доля верно классифицированных пикселей от общего количества пикселей в опорной выборке (Таблица 2): ;

4) Индекс к каппа Коэна, вносящий поправку на случайность (Таблица 2):

$$k = \frac{\sum_i N - q}{S_{\Sigma} - q},$$

где q – число случайных результатов, вычисляемое через число случайных результатов в столбцах n и истинных в строках $S_{кл}$: $q = \sum \frac{n \times S_{кл}}{S_{\Sigma}}$, N – количество пикселей, определившихся верно для данного класса (пиксели, расположенные по

диагонали матрицы), n – число пикселей во всех контрольных участках, определившихся неверно как данный класс (сумма пикселей по столбцам за исключением главной диагонали), S_{Σ} – сумма всех пикселей, $S_{кл}$ – сумма всех контрольных пикселей данного класса, $\sum_i N$ – число случаев правильного получения результата (сумма значений, стоящих на диагонали матрицы).

По результатам оценки достоверности классификации был проведён анализ статистических данных (P_1 и P_2) для каждого класса выделенных объектов, который показал, что точность правильной классификации пикселя для большинства классов выше для синтезированных разносезонных изображений, чем для одиночных многозональных. Значение доли ошибочно классифицированных пикселей по разносезонным изображениям также существенно ниже, чем по одиночным.

Таблица 2 – Характеристика многозональных и синтезированных разносезонных изображений, общая вероятность правильной классификации и значения индекса к каппа Коэна

Состав изображения	Условное обозначение изображения	Количество многозональных изображений в синтезированном	Количество каналов в изображении	$P_{общ}, \%$	Индекс к каппа Коэна, %
Январь	01	1	6	-	-
Март	03	1	6	64,16	57,22
Май	05	1	6	66,20	59,68
Июль	07	1	6	72,27	67,05
Август	08	1	6	72,10	66,73
Сентябрь	09	1	6	72,91	67,67
Июль+август	07+08	2	12	83,07	79,45
Май+сентябрь	05+09	2	12	82,84	79,09
Май+июль+август	05+07+08	3	18	88,41	85,81
Июль+август+сентябрь	07+08+09	3	18	87,88	85,16
Май+июль+сентябрь	05+07+09	3	18	89,19	86,76
Март+июль+август	03+07+08	3	18	83,56	80,10
Январь+июль+август	01+07+08	3	18	88,16	85,47
Январь+май+сентябрь	01+05+09	3	18	87,29	84,37
Май+июль+август+сентябрь	05+07+08+09	4	24	91,23	89,21
Январь+март+июль+август	01+03+07+08	4	24	90,11	87,83
Март+май+июль+август+сентябрь	03+05+07+08+09	5	30	92,15	90,33
Январь+май+июль+август+сентябрь	01+05+07+08+09	5	30	92,96	91,30
Январь+март+май+июль+август+сентябрь	01+03+05+07+08+09	6	36	93,39	91,84

Индекс к каппа Коэна для одиночных изображений составляет от 56% до 68%, а для синтезированных разносезонных изображений индекс к каппа Коэна выше и составляет от 79% до 92%. Индекс к каппа Коэна тем выше, и, следовательно, достоверность классификации изображений выше, чем из

большого количества многозональных изображений состоит синтезированное разносезонное изображение. Самая высокая достоверность классификации достигается при совместной обработке всех 6-ти изображений ($\kappa=91,8\%$). На Рисунке 1 представлена диаграмма величин индекса к каппа Коэна для результатов классификации синтезированных разносезонных и многозональных одиночных изображений.

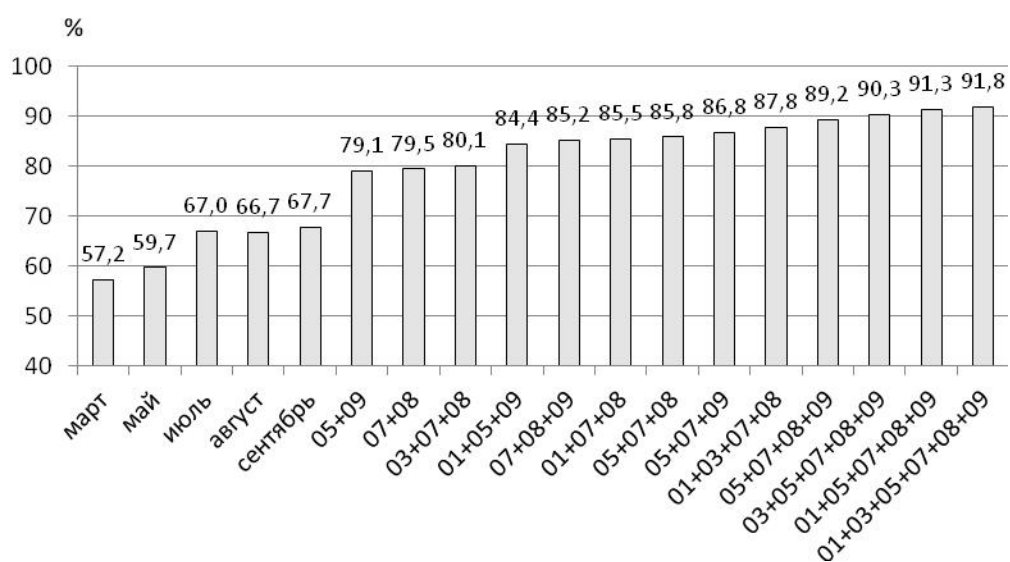
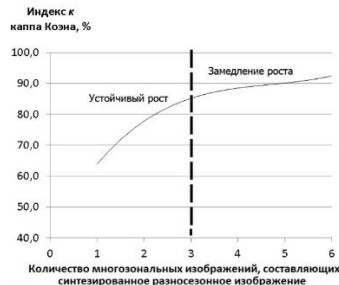
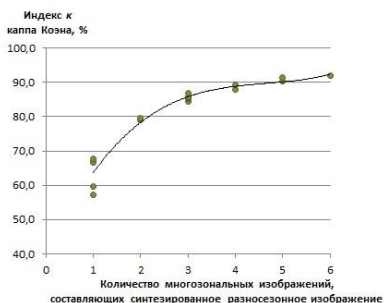


Рисунок 1 – Диаграмма величин индекса к каппа Коэна для результатов классификации синтезированных разносезонных и одиночных многозональных изображений

На основе зависимости значений индекса к каппа Коэна от количества изображений, из которых составлены синтезированные разносезонные изображения, был проведён корреляционно-регрессионный анализ связи между количеством совместно обрабатываемых изображений и достоверностью классификации. Анализ коэффициента детерминации R^2 пяти регрессионных моделей (линейной, экспоненциальной, логарифмической, степенной и полиномиальной (полином 3 степени) показал, что максимальное значение коэффициента детерминации $R^2 = 0,9377$ соответствует полиномиальной регрессионной модели, что по шкале Чеддока соответствует высокому качеству модели.

На Рисунке 2(а) представлена полиномиальная регрессионная модель зависимости индекса к каппа Коэна от количества изображений, из которых составлено синтезированное разносезонное изображение.

Кривую зависимости достоверности классификации от количества совместно обрабатываемых разносезонных многозональных изображений условно можно разделить на два характерных участка: участок устойчивого роста и участок замедления роста – насыщения. Экспертно можно установить, что участок, соответствующий замедлению прироста значений индекса к каппа Коэна, начинается примерно при количестве совместно обрабатываемых изображений от 3-4 (Рисунок 2(б)).



а) Зависимость индекса к каппа Коэна от количества изображений, из которых составлено синтезированное разносезонное изображение

б) Участки устойчивого роста и замедления роста на графике зависимости индекса к каппа Коэна от количества совместно обрабатываемых разносезонных изображений

*Рисунок 2. Полиномиальная регрессионная модель (полином 3 степени)
 $y = 0,3991x^3 - 5,6341x^2 + 27,994x + 41,085, R^2 = 0,9377$*

Исходя из этого, рекомендуется при создании карты растительности исследуемой территории использовать при автоматизированной обработке не менее 4-х изображений, полученных в течение одного года.

В целом, достоверность классификации синтезированных разносезонных изображений в меньшей степени зависит от стадий вегетации растительности, в которые получены изображения, чем от количества одиночных изображений, из которых составлено синтезированное разносезонное. В то же время, предпочтительно подбирать космические изображения таким образом, чтобы одно-два изображения были получены в период фазы активной вегетации

растений (июнь-август), одно изображение – зимой, так как, наличие именно зимнего изображения в комбинации позволяет снизить количество ошибочно классифицируемых пикселей классов древесной растительности. Остальные изображения могут быть получены в разные фенологические периоды: ранней весной, поздней весной (в начале вегетации) или в конце вегетации (начало-середина осени).

На основании экспериментально подтверждённого преимущества совместной обработки нескольких разносезонных многозональных космических изображений, выявления минимального количества изображений, обеспечивающих достаточно высокий уровень достоверности классификации, разработана методика автоматизированного дешифрирования растительного покрова земной поверхности, состоящая из следующих этапов:

Этап 1. Подбор данных дистанционного зондирования – нескольких, не менее 4-х, безоблачных космических изображений, полученных в разные фенологические периоды в течение одного года. Для дешифрирования растительности рекомендуется подобрать многозональные космические изображения, полученные:

- летом (в период активной вегетации растений) – 1-2 изображения;
- зимой – 1 изображение;
- весной (в начале вегетации) и/или осенью (в конце вегетации) – 1-2 изображения.

Этап 2. Создание синтезированного разносезонного изображения – комбинации всех подобранных многозональных изображений.

Этап 3. Формирование обучающей выборки и проведение контролируемой классификации синтезированного разносезонного изображения.

Этап 4. Получение карты растительного покрова земной поверхности исследуемой территории.

Схема создания карты растительности локального уровня с применением методики совместной автоматизированной обработки разносезонных изображений приведена на Рисунке 3.



Рисунок 3 – Схема создания карты растительного покрова с использованием методики автоматизированного дешифрирования разносезонных зональных космических изображений

Карта растительности Кольчугинского района Владимирской области, составленная с использованием методики автоматизированного дешифрирования разносезонных зональных изображений Landsat 8, представлена на Рисунке 4.

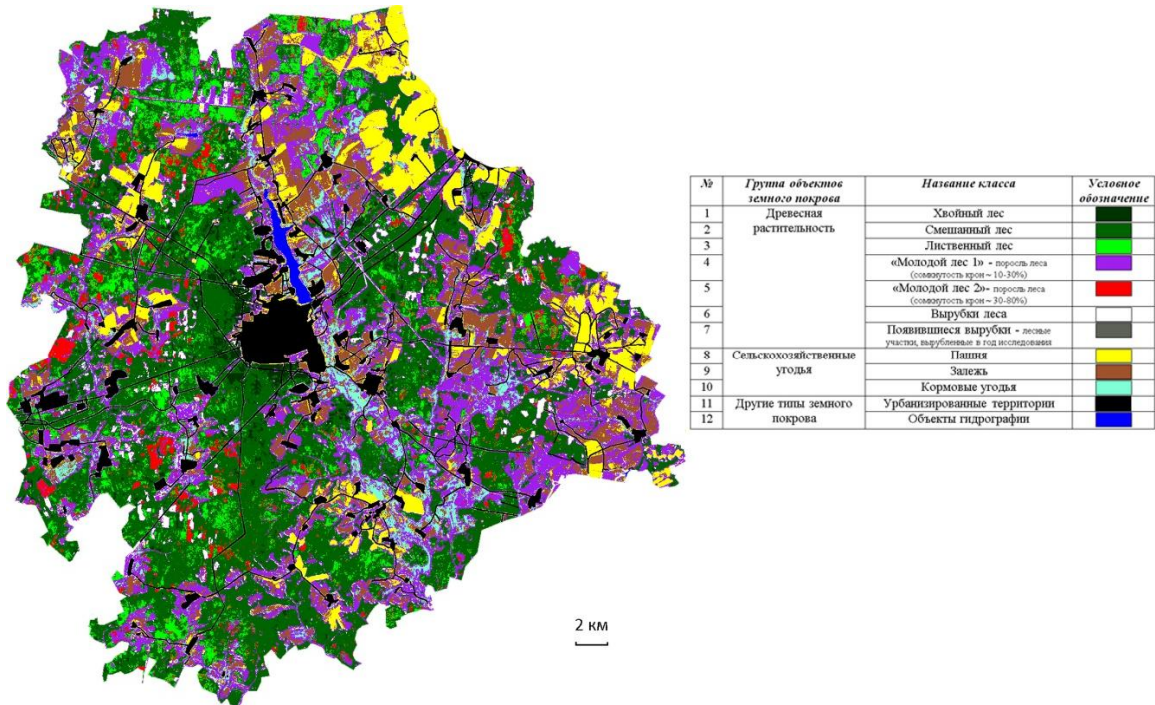


Рисунок 4 – Карта растительного покрова Кольчугинского района Владимирской области – результат классификации синтезированного разносезонного изображения, составленного из зональных изображений, полученных с космического спутника Landsat 8 (каналы Blue, Green, Red, NIR, SWIR-1, SWIR-2) 24.01.14, 29.03.14, 09.05.14, 12.07.14, 20.08.14, 21.09.14

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате диссертационного исследования решена научная задача разработки методики автоматизированного дешифрирования растительного покрова с использованием разносезонных зональных космических изображений, основанной на обосновании при помощи количественных характеристик преимущества совместного использования разносезонных данных.

Итогом диссертационной работы являются следующие выводы:

1. Проанализированы современные исследования в области автоматизированной обработки дистанционной информации с целью спутникового картографирования растительного покрова.

2. Проведён анализ путей повышения достоверности автоматизированной обработки космических изображений при создании карт растительности.

3. Проведена количественная оценка достоверности классификации синтезированных разносезонных и одиночных многозональных изображений, полученных с космического спутника Landsat 8, выполнено сравнение статистических параметров, характеризующих достоверность классификации изображений без использования временных признаков и с применением предлагаемой методики.

4. Экспериментально доказана эффективность использования в совместной обработке изображений, полученных во все сезоны, и установлена зависимость между количеством изображений, участвующих в совместной обработке, и достоверностью классификации.

5. Выявлены минимальное количество и даты получения изображений, рекомендуемые для создания синтезированного разносезонного изображения, позволяющие обеспечить достаточно высокую достоверность классификации. Показано, что точность верного определения пикселей разных классов растительного покрова в большей степени зависит от количества совместно обрабатываемых изображений, нежели от даты их получения. Для дешифрирования растительности рекомендуется подобрать не менее 4-х многозональных космических изображений, полученных:

- летом (в период активной вегетации растений) – 1-2 изображения;
- зимой – 1 изображение;
- весной (в начале вегетации) и/или осенью (в конце вегетации) – 1-2 изображения.

6. Разработана методика совместной автоматизированной обработки разносезонных многозональных космических изображений, позволяющая существенно повысить достоверность распознавания объектов растительного покрова земной поверхности.

В качестве практического применения **рекомендуется** использовать методику совместной обработки многозональных космических изображений для создания карт растительности локального уровня, например, для территорий муниципальных образований. Использование данной методики, не требующей разработки и реализации сложных вычислительных алгоритмов, рекомендуется для решения широкого круга задач муниципального уровня. Получаемые карты растительности могут быть использованы при ведении работ по государственному мониторингу земель, для оценки степени зарастания сельскохозяйственных угодий, контроля за вырубками лесных насаждений, в качестве базовой карты для организации кадастровых работ, при проведении землеустроительных работ, при организации работ территориального планирования. Также предложенная методика может применяться для создания достоверных карт растительности в рамках учебного процесса вузов картографо-геодезического профиля.

Перспективы дальнейшей разработки темы исследования состоят в совершенствовании методики автоматизированного дешифрирования растительного покрова земной поверхности, направленном на:

- исследование эффективности учёта сезонной динамики спектрально-отражательных характеристик растительного покрова при проведении автоматизированной классификации другими методами;
- возможность создания карты растительности для территории, расположенной на нескольких смежных космических изображениях.

СПИСОК ПУБЛИКАЦИЙ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в журналах, рекомендованных ВАК:

1. Марчуков В.С., Стыценко Е.А. Дешифрирование растительного покрова с использованием спектрально-временных признаков // Исследование Земли из космоса. 2012, № 1, с. 77–88.

2. Стыценко Е.А. Картографирование территории муниципального образования с использованием методики автоматизированного дешифрирования разносезонных зональных космических изображений // Известия высших учебных заведений. Геодезия и аэрофотосъемка. 2017, Том 61, № 3.

3. Стыценко Е.А. Возможности распознавания сельскохозяйственных угодий с использованием методики совместной автоматизированной обработки разносезонных многозональных космических изображений // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2017. Т. 14. № 5. С. 258–269.

Научные статьи:

4. Стыценко Е.А. Опыт дешифрирования растительного покрова земной поверхности с использованием разносезонных зональных космических изображений // Актуальные проблемы природообустройства, кадастра и землепользования: материалы международной научно-практической конференции, посвящённой 95-летию факультету землеустройства и кадастров ВГАУ. – Часть I. – Воронеж: ФГБОУ ВО Воронежский ГАУ, 2016. – 284 с.

5. Стыценко Е.А., Зверев А.Т. Автоматизированное дешифрирование растительного покрова земной поверхности по зонально-временным космическим изображениям // Современные проблемы отвода, использования и учёта земель : коллективная монография / под общей ред. А.П. Сизова, О.В. Миклашевской. – Москва : РУСАЙНС, 2017. – 170 с.