

На правах рукописи



ФИСЕНКО ЕЛЕНА ВЯЧЕСЛАВОВНА

**РАЗРАБОТКА МЕТОДИКИ МУЛЬТИИНДЕКСНОЙ
ОБРАБОТКИ СПЕКТРАЛЬНЫХ ИЗОБРАЖЕНИЙ
ПОДСТИЛАЮЩЕЙ ПОВЕРХНОСТИ ПО КОМПЛЕКСНЫМ
ДАНЫМ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ**

Специальность 25.00.34 – Аэрокосмические исследования Земли,
фотограмметрия

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва – 2020

Работа выполнена в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Московский государственный университет геодезии и картографии» (МИИГАиК) на кафедре «Космического мониторинга и экологии».

Научный руководитель: **Зверев Анатолий Тихонович**, доктор геолого-минералогических наук, профессор, МИИГАиК, кафедра «Космического мониторинга и экологии»

Официальные оппоненты: **Михайленко Илья Михайлович**, доктор технических наук, доцент, Федеральное государственное бюджетное научное учреждение «Агрофизический научно-исследовательский институт», лаборатория информационно-измерительных систем, заведующий лабораторией, главный научный сотрудник

Долгополов Даниил Валентинович, кандидат технических наук, Акционерное общество «СпейсИнфоГеоматикс», ведущий научный сотрудник

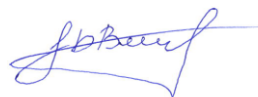
Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное учреждение науки Геофизический центр Российской академии наук (ГЦ РАН)

Защита диссертации состоится «9» апреля 2020 г. в 10 час. 00 мин. на заседании диссертационного совета Д 212.143.04 при Московском государственном университете геодезии и картографии (МИИГАиК) по адресу: 105064, Москва, Гороховский пер., 4, зал заседаний Учёного совета.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Московского государственного университета геодезии и картографии» (МИИГАиК) и на сайте МИИГАиК:<http://www.miiгаik.ru/upload/iblock/5c4/5c43f80934d95db48716a12afd6b5653.pdf>.

Автореферат разослан «__» _____ 2020 г.

Учёный секретарь
диссертационного совета



Беленко Виктор Владимирович

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Развитие экономики Российской Федерации в условиях глобальных климатических изменений вызывает необходимость совершенствования методов мониторинга природной среды и техногенных объектов. Одним из наиболее оперативных, информативных и многофункциональных способов является многоспектральная дистанционная съемка поверхности Земли из космоса с помощью искусственных спутников Земли (далее - ИСЗ).

Для анализа большого количества дистанционных материалов требуются современные подходы и методы их обработки. Одним из таких подходов является изучение спектральных характеристик почвенно-растительного покрова, полученных по космическим снимкам, с целью проведения автоматизированной классификации.

Представленная в диссертационном исследовании разработанная методика, позволяет классифицировать растительность на основе изучения спектральных особенностей земных покровов с использованием космических данных, наземных данных спектрометрии и подспутниковых данных с беспилотного летательного аппарата (далее - БПЛА).

Своевременное выявление растительности в угнетенном состоянии позволяет оценить возможные риски и помогает в принятии правильных решений в управлении сельским хозяйством, например, в предотвращении гибели посевных культур, пересыхании земель, лесов, ведущих к засухам и опустыниванию территорий, для предотвращения возникновения чрезвычайных ситуаций и экологических проблем.

Использование специальных индексов одновременной (мультииндексной) обработки для каждой точки замеров и дальнейшего применения разработанной методики способствует развитию теории и технологии дешифрирования изображений, а также получения количественных характеристик динамики природных процессов с целью их прогноза.

Объектом диссертационного исследования является методика мультииндексной обработки спектральных изображений подстилающей поверхности по комплексным данным дистанционного зондирования (ИСЗ, БПЛА, полевые).

Предмет исследования - спектральные изображения подстилающей поверхности, полученные по данным комплексного дистанционного зондирования, формализованные спектральные свойства, характеристики и образы изучаемых объектов: почв, посевов сельскохозяйственных культур, лесной растительности.

Целью диссертационной работы является разработка методики мультииндексной обработки спектральных изображений подстилающей поверхности по комплексным данным дистанционного зондирования (ИСЗ, БПЛА, полевые).

Для достижения поставленной цели необходимо было решить следующие научные задачи:

1. Провести анализ современного состояния существующих методов дешифрования подстилающей поверхности (почвенно-растительного покрова) по космическим многоспектральным снимкам для выявления основных проблем автоматизации распознавания и классификации почвенно-растительного покрова.

2. Провести экспериментальные исследования с целью получения тестовых спектральных изображений подстилающей поверхности по комплексным данным дистанционного зондирования (ИСЗ, БПЛА, полевые) для проведения автоматизированной классификации.

3. Разработать методику мультииндексной обработки спектральных изображений подстилающей поверхности по комплексным данным дистанционного зондирования для классификации объектов по видовому составу и степени их биологического состояния.

4. Исследовать влияние атмосферы на спектральные отражательные свойства подстилающей поверхности по комплексным данным ДЗЗ.

Методология и методы. Использовались следующие методы: общенаучный экспериментальный метод, математической статистики и вычислительной математики, теории обработки цифровых изображений. Также использовались методы эмпирического исследования, основывающиеся:

- на дистанционном измерении спектральных отражательных свойств изучаемых объектов как с поверхности Земли, так и из Космоса с летательного аппарата (искусственного спутника Земли);
- на получении фотографических образов изучаемых объектов из атмосферы - с воздушного беспилотного летательного аппарата (БПЛА); сравнении свойств изучаемых и эталонных объектов.

При обработке экспериментальных данных применялись методы теоретического познания основывающиеся:

- на формализации и обработке количественных характеристик спектральных свойств изучаемых объектов методами статистического анализа и машинной графики;
- на выявлении, разделении и классификации изучаемых объектов методами обработки изображений и распознавания образов программными продуктами геоинформационного моделирования и обработки спектрально-зональных спутниковых снимков ERDAS IMAGINE 9.1 и ENVI 4.8.

При решении поставленных задач использовались данные о спектральных характеристиках природных образований, полученных известными авторами.

Научная новизна работы заключается:

1. В разработанной впервые методике мультииндексной обработки спектральных изображений подстилающей поверхности по комплексным данным дистанционного зондирования (ИСЗ, БПЛА, полевые), с помощью которой можно оценить динамику развития неблагоприятного биотического воздействия на почвенно-растительный покров.

2. В получении нового вегетационного индекса развития растительности, позволяющего однозначно разделить растительность по степени биологического состояния.

3. В усовершенствовании технологии получения данных о подстилающей поверхности по комплексным данным дистанционного зондирования, направленной на изучение спектральных характеристик подстилающей поверхности для целей проведения автоматизированного дешифрирования.

4. В усовершенствовании алгоритмического обеспечения мультииндексной обработки спектральных изображений, позволяющего дополнить алгоритмическую составляющую в программном комплексе ENVI.

Теоретическая и практическая значимость.

Теоретическая значимость диссертационного исследования заключается в усовершенствовании теории и технологии дешифрирования космических изображений и получении уточнённых спектральных характеристик растительного покрова для целей мониторинга с использованием аэрокосмической информации.

Практическая значимость диссертационного исследования определяется применением разработанной методики и полученных результатов исследования в организациях, занимающихся космическим мониторингом подстилающей поверхности, в центрах оперативного мониторинга, занимающихся вопросами прогнозирования урожайности, оценкой неблагоприятных воздействий по сельскохозяйственной части, в научных центрах точного земледелия, в инновационных комплексах аграрного профиля, в центрах управления кризисными и антикризисными ситуациями территориальных органов, в подразделениях МЧС России.

Результаты диссертационного исследования используются в Национальном центре управления в кризисных ситуациях МЧС России (ФКУ НЦУКС МЧС России) и в Федеральном государственном бюджетном учреждении науки Научный геоинформационный центр Российской академии наук (НГИЦ РАН), а также могут использоваться в научных и образовательных

учреждениях, для решения задач в области мониторинга и охраны окружающей среды.

Личный вклад.

Автор принимал участие в научных проектах МИИГАиК по государственному заданию Министерства образования и науки Российской Федерации по теме «Разработка теоретических и технологических решений космического геоэкологического мониторинга территорий Российской Федерации» №5.498.2011; участвовал в научных грантах МИИГАиК и НГИЦ РАН при финансовой поддержке Российского Фонда Фундаментальных Исследований по №11-05-12034, № 11-04-00356, № 13-05-00534, № 13-05-00534А. ИКИ РАН: Гос. Регистрация № 01.20.0.2.00164. В научных работах ГУ «НИЦ «Планета»: Шифр: КА «МЕТЕОР-М» №3». В проектах по международному сотрудничеству «SPA.2010.3.2-01 сотрудничества ЕС и России в GMES» в области 9.3.2 «Международное сотрудничество». Этап WP2: Сбор полевых и спутниковых данных MOCCASIN contributes to area 9.3.2 «International cooperation» under the specific topic «SPA.2010.3.2-01 EU-Russia cooperation in GMES». MOCCASIN is a collaborative project funded by the European Union under the 7th Framework Programme (project number 262755).

Автором лично были получены все научные результаты, подготовлены основные публикации по выполненной работе.

Научные результаты, выносимые на защиту:

1. Методика мультииндексной обработки спектральных изображений подстилающей поверхности по комплексным данным дистанционного зондирования, позволяющая классифицировать объекты по видовому составу и степени их биологического состояния.
2. Технология получения данных о подстилающей поверхности по комплексным данным дистанционного зондирования, направленная на изучение спектральных характеристик подстилающей поверхности для целей проведения автоматизированной классификации.

3. Алгоритмическое обеспечение мультииндексной обработки спектральных изображений, позволяющее дополнить алгоритмическую составляющую в программном комплексе ENVI.

4. Результаты исследования влияния атмосферы на спектральные отражательные свойства подстилающей поверхности по комплексным данным ДЗЗ.

Достоверность результатов подтверждается:

- Проведенной оценкой точности полученных результатов.
- Сравнением полученных характеристик спектральных свойств природных объектов с данными других авторов.
- Экспериментальными работами на тестовых участках.

Апробация.

Основные положения диссертационной работы доложены на 67, 68, 69, 70 научно-технических конференциях студентов, аспирантов и молодых ученых МИИГАиК, на 7-й Всероссийской открытой ежегодной конференции «Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса» ИКИ РАН, Международной научно-практической конференции молодых ученых МГУП «Природообустройство и геопространственные технологии в сельском хозяйстве». Получен Диплом 1 степени Союза машиностроителей России «За вклад в развитие производства продукции специального назначения и гражданской продукции» имени В.А.Ревунова в номинации «Лучший молодой технолог» в 2018 году.

Соответствие диссертации Паспорту научной специальности.

Диссертация соответствует следующим пунктам паспорта научной специальности 25.00.34 - «Аэрокосмические исследования Земли, фотограмметрия» (технические науки):

П.4 «Теория и технология дешифрирования изображений с целью исследования природных ресурсов и картографирования объектов исследований».

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **Введении** описана основная цель исследования, задачи, актуальность, научная новизна, теоретическая и научная значимость проведенного исследования.

1. Современное состояние вопроса по методам дешифрирования данных дистанционного зондирования почвенно-растительного покрова.

Первая глава диссертации посвящена проведению анализа современного состояния существующих методов дешифрирования подстилающей поверхности, а именно почвенно-растительного покрова, по космическим снимкам и выявлению основных проблем автоматизации распознавания и классификации почвенно-растительного покрова. Подробно изучены ряд работ по разделению и классификации природных объектов, например, такие как:

1. Проведение классификации по разделению природных объектов для выделения мангровых лесов на территории о.Пхукет Таиланд, проводившееся по снимку, полученному со спутника THEOS путем вычисления 5 вегетационных индексов NDVI, SR, SAVI, PVI, TVI. Точность отделения мангрового леса от других объектов составила 95% (Jiraporn Kongwongjun, 2012).
2. «Метод декомпозиции моделей». Разновидность методов проведения классификации с помощью спектрального анализа смешивания пикселей. Применялся этот метод к данным сканера Landsat. Почти 94% информации из шестимерных данных сохраняются в трех компонентах. Этот метод полезен для классификации и мониторинга изменений в растительном покрове (Muramatsu K. F., 2000).
3. В работе по картированию видов деревьев (10 видов деревьев) в европейских бореальных лесах (Австрия) для классификации видов деревьев использовались 2 подхода: объектно-ориентированный и на основе пикселей. Для каждого из 10 видов деревьев определялись средние значения коэффициента отражения во всех 8 каналах WorldView-2. Общая точность объектно-ориентированной классификации 10 видов деревьев (по 8 каналам WorldView-2) составила 82,4%: 81,2% из хвойных и 83,8% из широколиственных деревьев были

классифицированы правильно. Разделение на хвойные и лиственные деревья, была достигнута с общей точностью 99,2%. Для 4 стандартных каналов вместо 8 дифференциации видов 10 деревьев, точность классификации уменьшается на 4,9 процентных пункта (Markus Immitzer, Clement Atzberger and Tatjana Koukal, 2012).

4. Метод контролируемой классификации с обучением по тестовым наземным участкам (мобильное наземное лазерное сканирование и гиперспектральные спутниковые данные) применялся для обработки лесного массива в Финляндии. Подмножество 133 деревьев и 10 видов деревьев был использовано в классификации деревьев. Наилучшие результаты классификации для конденсированных данных были 95,8% для разделения хвойных и лиственных классов. Лучший общий результат классификация видов деревьев составил 83,5% (Eetu Puttonen, 2011).

В результате анализа современного состояния существующих методов дешифрования подстилающей поверхности по космическим изображениям был сделан вывод о том, что значительный прогресс произошел за рубежом в последнее десятилетие. При изучении литературы в части, касающейся исследования спектральных характеристик растений, можно сделать вывод о том, что спектры определяются главным образом оптическими характеристиками листвы и зависят от поглощения и пропускания падающего излучения. Изменения содержания хлорофилла и других пигментов, а также влаги в листве, приводят к различию спектральных характеристик на разных стадиях вегетации. В ближней инфракрасной области коэффициент отражения растительности зависит от строения листьев и, поэтому, коэффициент отражения хвойных пород близок к коэффициенту отражения грунтов, а коэффициент отражения для лиственных пород значительно выше, поэтому в ближнем инфракрасном спектральном канале лиственные насаждения выглядят светлее хвойных. Наиболее информативные зоны спектра 480-550-670-890 нм для целей классификации на космическом снимке.

В этой связи сделан вывод о необходимости проведения одновременного или параллельного учета многообразия различных признаков и процессов

в почвенно-растительном покрове при изучении спектральных свойств подстилающей поверхности. С учетом условий произрастания и особенностей развития растений выбрана процедура попиксельной трансформации изображения, путем вычисления вегетационных индексов.

2. Получение тестовых спектральных изображений подстилающей поверхности по комплексным данным дистанционного зондирования (ИСЗ, БПЛА, полевые).

Вторая глава диссертации посвящена получению формализованных свойств, характеристик и спектральных образов тестовых (эталонных) объектов подстилающей поверхности Земли. При проведении полевых наземных измерений были выбраны тестовые участки в виде полей с посевами озимой пшеницы в районе городов Одоев и Плавск (Тульская область).

Автором для оценки состояния пшеницы по четырем стадиям роста растений в контрольных точках тестовых участков проводились наземные измерения в количестве 378246 точек новейшим переносным прибором, разработанным для спектрального дистанционного зондирования HandHeld 2 Portable Spectroradiometer (производитель ASD Inc., США). Координатная привязка к конкретной точке замера осуществлялась цифровой фотокамерой Nikon с устройством GPS для привязки координат. Камеральная обработка наземных снимков, полученных в полевых условиях, проводилась с помощью специализированного программного продукта, CAN-EYE V6.1 (разработчик French National Institute of Agricultural Research (INRA, Франция) интегрированного с Matlab (R2009a). Полученные данные переносились в EXCEL для дальнейшего анализа спектральных кривых.

При участии автора осуществлялась съемка с БПЛА «Птеро-Е» и был выбран тестовый полигон (лесной массив, п.Курилово, Новая Москва). Высота съемки достигала 300 метров. Затем проводилась фотограмметрическая обработка данных Agisoft PhotoScan (С-Петербург), полученных в ходе эксперимента (обработано более 1450 пар). Создана высокоточная текстурированная 3D- модель (рисунок 1) и были отобраны тестовые эталоны

лесной растительности (ель, ель-засохшая, береза, береза-засохшая, дуб, дуб-засохший, осина, осина-засохшая, клен канадский, клен-засохший, почва).



Рисунок 1 - Текстурированная 3D- модель съемки с БПЛА

Далее на ту же территорию, что и произведена съемка с БПЛА, были подобраны космические снимки высокого разрешения с (КА) Worldview-2 и GeoEye-1. К снимкам применялся уровень обработки - OrthoReady Standard (Геометрически и радиометрически откалиброваны). Космические снимки приведены к картографической проекции (система координат WGS 84, проекция UTM), разрядность 16-бит. Проведена атмосферная коррекция. После чего были построены спектральные кривые.

В результате проведения исследований была усовершенствована технология (рисунок 2) получения данных о подстилающей поверхности, направленная на изучение спектральных характеристик подстилающей поверхности для целей проведения автоматизированной классификации.

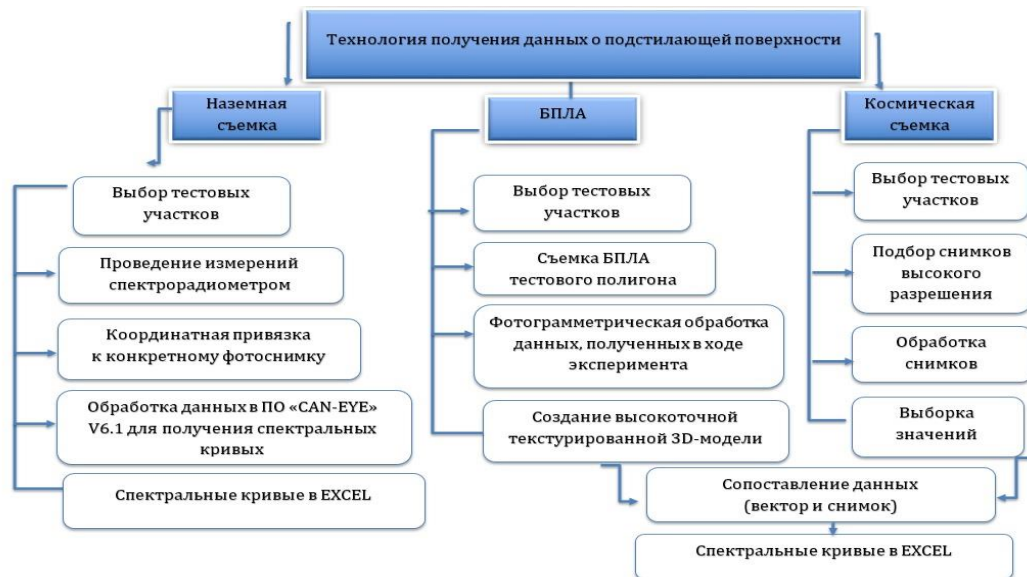


Рисунок 2 - Технология получения спектральных изображений о подстилающей поверхности по комплексным данным дистанционного зондирования (ИСЗ, БПЛА, полевые).

3. Разработка методики мультииндексной обработки спектральных изображений подстилающей поверхности по комплексным данным дистанционного зондирования для классификации объектов по видовому составу и степени их биологического состояния.

Третья глава диссертации содержит информацию по разработке методики мультииндексной обработки формализованных свойств, характеристик и образов (коэффициента спектральной яркости) тестовых объектов изображений подстилающей поверхности по данным комплексного дистанционного зондирования (ИСЗ, БПЛА, полевые). При разработке новой методики было выдвинуто предположение - *если посеги расположены на однородных почвах, то они создают одинаковый вклад в отражательную способность различных участков поверхности*. При угнетении растительности ее отражательная способность снижается и в определенных зонах спектра приближается к отражательной способности почвы.

Автором при вычислении значений индексов TGI, TRI, TRNI мультииндексной TI-классификации было замечено, что нет способа оценить полученные значения индексов и невозможно классифицировать растения

по степени их биологического состояния. Тогда было реализовано построение треугольного индекса TRI на плоскости в координатах: спектральное отражение/длина волны (нм).

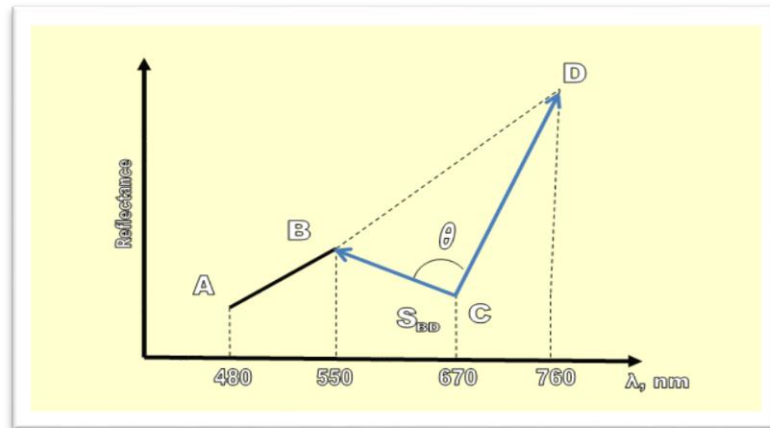


Рисунок 3 - Расчетная схема к вычислению относительного вегетационного индекса развития растительности (LPI) на плоскости: отражение/длина волны (нм)

Как показано на рисунке 3, треугольный индекс TRI (Triangular Red Index), характеризующий степень развития растительности, определяется как площадь треугольника BCD в каналах спутника MODIS. Площадь треугольника BCD по координатам его вершин B (550; R550), C (670; R670), D (760; R760) составляет:

$$\begin{aligned} \text{TRI} &= 0,5 * [(550-760)*(R670- R760)-(670-760)*(R550- R760)] = \\ &= 0,5 * [(550-760)*(RED - NIR) - (670-760)*(GREEN - NIR)] \quad [1] \end{aligned}$$

Для перехода к относительным величинам рассмотрим площадь трапеции 550- B-D-760, лежащей между линией BD и осью абсцисс – λ

$$\text{SBD} = 0,5 * (760 - 550) * (R760 + R550) = 0,5 * (760 - 550) * (NIR + GREEN) \quad [2]$$

Выведен **новый индекс** - относительный вегетационный индекс развития растительности *LPI (Life of Plants Relative Vegetation Index)*, который определяется, как доля индекса TRI в площади фигуры (550-B-D-760) на интервале RED–NIR, т.е. $\text{LPI} = \text{TRI} / \text{SBD}$. После необходимых подстановок

получаем формулу расчета LPI для спутника MODIS:

$$LPI = \frac{R(nir) - R(red)}{R(nir) + R(green)} - \frac{3}{7} * \frac{R(nir) - R(green)}{R(nir) + R(green)} \quad [3]$$

где $R(green)$, $R(red)$, $R(nir)$ значения спектральной яркости в соответствующих каналах сканера спутника. Для других значений каналов другого сканера другого спутника имеем:

$$LPI(\lambda g, \lambda r, \lambda n) = \frac{R(nir) - R(red)}{R(nir) + R(green)} - K * \frac{R(nir) - R(green)}{R(nir) + R(green)} \quad [4]$$

где $\lambda g, \lambda r, \lambda n$ полосы спектра VNIR сенсора спутника, $K = \frac{\lambda n - \lambda r}{\lambda n - \lambda g}$.

Данный индекс можно также назвать индексом состояния и развития растений, т.к. он позволяет сравнивать уровни развития одноптипных растений, произрастающих на полях с различными почвами, или уровни развития одноптипных растений, произрастающих на поле с однородной почвой, т.е. его можно рассматривать как частный случай TI-относительной классификации, рассмотренной в статьях автора.

Для спектров посевов озимой пшеницы значения LPI составили при следующих параметрах $\{\lambda g = 545\text{нм}; \lambda r = 660\text{нм}; \lambda n = 830\text{нм}\}$, $k = 0,5965$:

для растительности здоровой, нормально вегетирующей:

$$LPI(\text{здор.}) = \frac{0,449 - 0,053}{0,449 + 0,075} - \frac{0,5965 * (0,449 - 0,075)}{(0,449 + 0,075)} = 0,329; \quad [5]$$

для растительности, испытывающей угнетение:

$$LPI(\text{угнет.}) = \frac{0,471 - 0,111}{0,471 + 0,114} - \frac{0,5965 * (0,471 - 0,114)}{(0,471 + 0,114)} = 0,268; \quad [6]$$

для растительности, испытывающей стресс:

$$LPI(\text{стресс}) = \frac{0,523 - 0,181}{0,523 + 0,154} - \frac{0,5965 * (0,523 - 0,154)}{(0,523 + 0,154)} = 0,180; \quad [7]$$

для растительной аномалии (вымерзшие посевы):

$$LPI(\text{аном.}) = \frac{0,253 - 0,140}{0,253 + 0,094} - \frac{0,5965 * (0,253 - 0,094)}{(0,253 + 0,094)} = 0,052 ; [8]$$

для почв:

$$LPI(\text{почв}) = \frac{0,288 - 0,182}{0,288 + 0,125} - \frac{0,5965 * (0,288 - 0,125)}{(0,288 + 0,125)} = 0,022 [9]$$

После подстановки получен следующий результат классификации (рисунок 4).

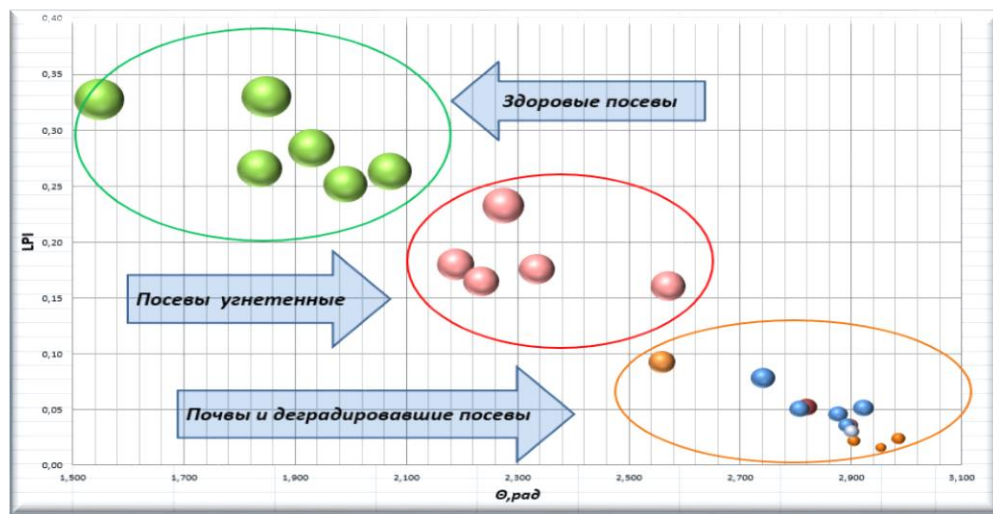


Рисунок 4 - Разделение по спектрам отражения посевов озимой пшеницы с использованием индексной обработки: зеленый цвет – здоровые посевы, красный цвет - угнетенные растения, оранжевый и синий цвета – посевы, стремящиеся к почве и почва.

Данный подход подтвердил принципиальную возможность разделения объектов на плоскости по показателям состояния почвенно-растительного покрова в определенные области.

На тестовых участках лесной растительности, полученных по данным с БПЛА и космическим снимкам, проведена классификация спектральных изображений с обучением на основе определения классов (сигнатур). Для увеличения числа дополнительных отличительных признаков эталонов проведена

мультииндексная, т.е. одновременная обработка несколькими, специально подобранными индексами (рисунок 5).



Рисунок 5 – Методика мультииндексной обработки спектральных изображений подстилающей поверхности по комплексным данным дистанционного зондирования (ИСЗ, БПЛА, полевые).

После применения методики получены результаты по каждой проведенной классификации и получен итоговый результат классификации с обучением на основе мультииндексной классификация эталонных объектов, пример которого представлен на рисунке 6.

Также, в третьей главе приведено алгоритмическое обеспечение мультииндексной обработки спектральных изображений, дополняющее алгоритмическую составляющую в программном комплексе ENVI (Таблица 1).

Таблица 1 - Алгоритмическое обеспечение мультииндексной обработки спектральных изображений

<i>Наименование индекса</i>	<i>Расчетная формула</i>	<i>Расчетная формула</i>
<i>LPI</i>	<i>индекса LPI</i>	<i>индекса LPI в ENVI</i>

LPI (Laif of Plantz Relative Vegetation Index)	$LPI = \frac{R(nir) - R(red)}{R(nir) + R(green)} - K *$ $\frac{R(nir) - R(green)}{R(nir) + R(green)}$ $K = \frac{(\lambda_n - \lambda_r)}{\lambda_n - \lambda_g}$	(float(b4) – float(b1))/(float(b4) + float(b2))-0,59[(float(b4) – float(b2))/(float(b4) + float(b4)]
Наименование индекса NDI- классификации	Расчетная формула индекса NDI-классификации	Расчетная формула индекса NDI- классификации в ENVI
NGBDI (Normalized Green-Blue Difference Index)	NGBDI = (Rgreen – Rblue)/(Rgreen + Rblue)	(float(b2) – float(b3))/(float(b2) + float(b3))
NGRDI (Normalized Green-Red Difference Index)	NGRDI = (Rgreen – Rred)/(Rgreen + Rred)	(float(b2) – float(b1))/(float(b2) + float(b1))
NDVI (Normalized Difference Vegetation Index)	NDVI = (Rnir – Rred)/(Rred + Rnir)	(float(b4) – float(b1))/(float(b1) + float(b4))
NNBDI (Normalized NIR- Blue Difference Index)	NNBDI = (Rnir – Rblue)/(Rnir + Rblue)	(float(b4) – float(b3))/(float(b4) + float(b3))
Наименование индекса разностной NDI-классификации	Расчетная формула индекса разностной NDI-классификации	Расчетная формула индекса разностной NDI-классификации в ENVI
NGBDI – NGRDI	[(Rgreen – Rblue)/(Rgreen + Rblue)] – [(Rgreen – Rred)/(Rgreen + Rred)]	((float(b2) – float(b3))/(float(b2) + float(b3))) – ((float(b2) – float(b1))/(float(b2) + float(b1)))

NNBDI – NDVI	$[(R_{nir} - R_{blue}) / (R_{nir} + R_{blue})] - [(R_{nir} - R_{red}) / (R_{red} + R_{nir})]$	$((float(b4) - float(b3)) / (float(b4) + float(b3))) - ((float(b4) - float(b1)) / (float(b1) + float(b4)))$
Наименование индекса ТИ-классификации	Расчетная формула индекса ТИ-классификации	Расчетная формула индекса ТИ- классификации в ENVI
TGI (Triangular Greenness Index)	$TGI = -0,5[(660 - 480)(R_{red} - R_{green}) - (660 - 545)(R_{red} - R_{blue})]$	$-0,5[(180)(float(b1) - float(b2)) - (115)(float(b1) - float(b3))]$
TRI (Triangular Red Index)	$TRI = -0,5[(545 - 830)(R_{green} - R_{red}) - (545 - 660)(R_{green} - R_{nir})]$	$-0,5[(-285)(float(b2) - float(b1))) - ((-115)(float(b2) - float(b4)))]$
TRNI (Triangular Red Nir Index)	$TRNI = 0,5[(830 - 660)(R_{nir} - R_{red})]$	$0,5[(170)(float(b4) - float(b1))]$
Наименование индекса ТИ-относительной классификации	Расчетная формула индекса ТИ- относительной классификации	Расчетная формула индекса ТИ-относительной классификации в ENVI
Index1 (Triangular Relative Vegetation Index 1 – TRVI1)	$TRVI1 = TGI / (S_0 + S_1)$ $S_0 = 0,5(545 + 480)(R_{green} - R_{blue})$ $S_1 = 0,5(545 + 660)(R_{red} - R_{green})$,	$(-0,5((180)(float(b1) - float(b2))) - (115)(float(b1) - float(b3)))) / ((512,5(float(b2) - float(b3))) + (602,5(float(b1) - float(b2))))$
Index2 (Triangular Relative Vegetation Index 2 – TRVI2)	$TRVI2 = TRI / S_2$ $S_2 = 0,5(545 + 830)(R_{nir} - R_{green})$	$(-0,5((-285)(float(b2) - float(b1))) - (-115)(float(b2) - float(b4)))$

		$\text{float}(b4)))/((687,5(\text{float}(b4) - \text{float}(b2)))$
Index3 (Triangular Relative Vegetation Index 3 – TRVI3)	$\text{TRVI3} = \text{TRNI}/S_3$ $S_3 = 0,5(830 + 660)(R_{\text{nir}} - R_{\text{red}})$	$(0,5((170)(\text{float}(b4) - \text{float}(b1))))/(745(\text{float}(b4) - \text{float}(b1)))$
<p>Где $\lambda_g = 545\text{нм}$; $\lambda_r = 660\text{нм}$; $\lambda_n = 830\text{нм}$ – полосы спектра сенсора спутника.</p> <p>$R(\text{red})=b1$, $R(\text{green})=b2$, $R(\text{blue})=b3$, $R(\text{nir})=b4$ - значения спектральной яркости в соответствующих каналах сканера спутника.</p>		

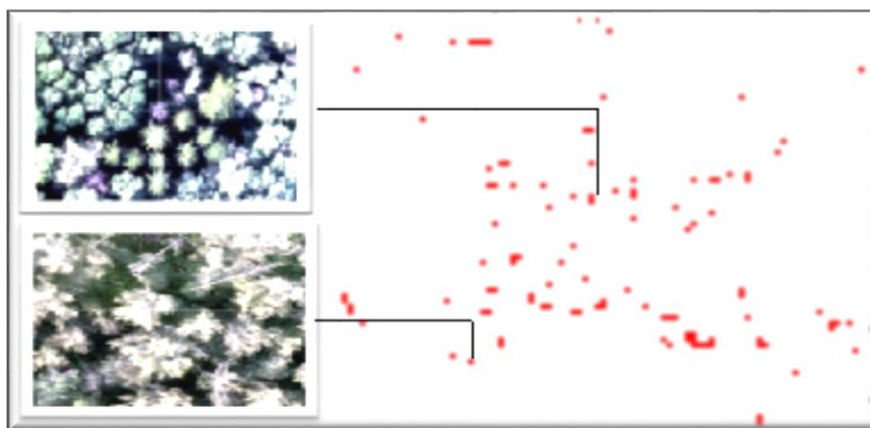


Рисунок 6 – Пример результата классификации с обучением на основе мультииндексной классификация эталонных объектов по степени деградации

4. Получение результатов исследования влияния атмосферы на спектральные отражательные свойства подстилающей поверхности по комплексным данным ДЗЗ.

В четвертой главе приведены результаты исследования влияния атмосферы на спектральные отражательные свойства подстилающей поверхности, которые были получены по комплексным данным ДЗЗ.

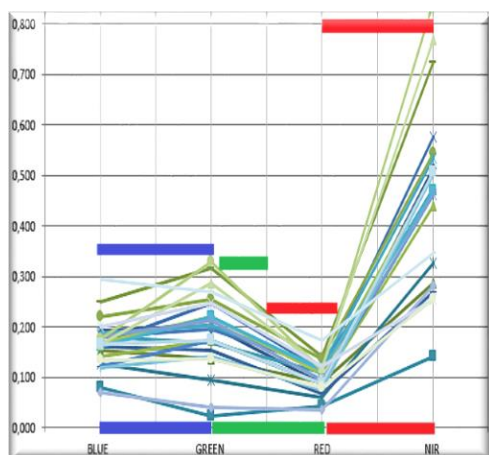


Рисунок 7 - Данные, полученные
с ИСЗ

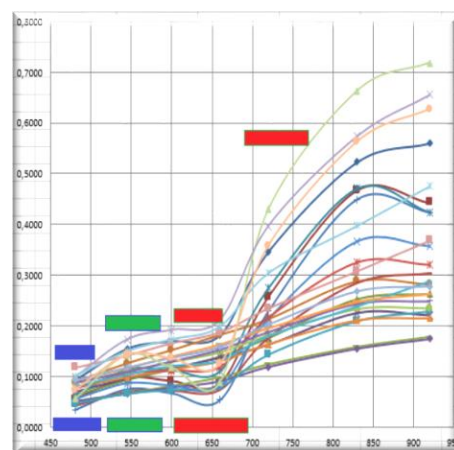


Рисунок 8 - Наземные данные,
полученные спектрометрией

Проведено сравнение спектральной отражательной способности озимой пшеницы, полученной по наземным данным, и спектральной отражательной способности лесной растительности, полученной по данным многозональной космической съемки. На приведенных выше рисунках 7 и 8 видно, что спектральные коэффициенты изучаемых объектов, полученные по космическим данным, в некоторых диапазонах отличны от спектральных коэффициентов изучаемых объектов, полученных по наземным данным. Различие значений регистрации спектральной яркости обусловлено влиянием атмосферы на оптические характеристики изучаемых объектов, что подтверждает известные факты о влиянии атмосферы при получении спектральных характеристик по космическим снимкам. Визуально существенных различий по видовому составу среди спектральной кривой растительности не выявлено. В целом они имеют схожий вид и четкого визуального различия видового состава деревьев, например, березы и ели, нет. Спектры растительности похожи в исследуемых диапазонах 450-900 (нм). Следует отметить, что для определения видового состава деревьев по спектральным кривым целесообразно использовать летнюю съемку; лучше выделяются лиственные деревья, такие как дуб, береза, находящиеся в массиве.

Также в четвертой главе, рассчитаны линейное отклонение вершин лесной растительности для разных методов классификации, рассчитана средняя

квадратическая ошибка положения вершин классифицированных изображений и оценена точность методики.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате решения поставленных научных задач был проведен анализ современного состояния существующих методов дешифрования подстилающей поверхности (почвенно-растительного покрова) по космическим многоспектральным снимкам и выявлены основные проблемы автоматизации распознавания и классификации почвенно-растительного покрова. Была разработана новая методика мультииндексной обработки спектральных изображений подстилающей поверхности по комплексным данным дистанционного зондирования, позволяющая оценивать динамику развития неблагоприятного стрессового воздействия на растительный покров. В основе методики был использован новый вегетационный индекс развития растительности LPI, который позволил разделить растительность по биофизическим факторам, используя критерии сравнения значений. Для проведения методики в автоматизированном режиме было разработано алгоритмическое обеспечение мультииндексной обработки спектральных изображений, позволяющее усовершенствовать программный модуль в комплексе ENVI. При проведении исследований по получению экспериментальных данных о подстилающей поверхности была усовершенствована технология, позволяющая изучать спектральные характеристики для целей проведения автоматизированного дешифрирования. Полученные результаты исследования влияния атмосферы на спектральные отражательные свойства подстилающей поверхности Земли подтвердили известные теоретические и практические положения о влиянии атмосферы на прохождение электромагнитных волн.

Подсчитана средняя точность итогового результата классификации - 87%. Высокий результат точности позволил сделать вывод о перспективе использования данной методики. По некоторым классификациям результат

точности достигал 95%. Проведены полевые обследования, подтверждающие результаты полученных классификаций мультииндексной обработки.

СПИСОК ОСНОВНЫХ ПУБЛИКАЦИЙ АВТОРА ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Статьи в рецензируемых журналах, рекомендованных ВАК:

1. А.Т. Зверев, Е.В. Фисенко. Современные методы определения засушливых земель по космическим снимкам// Известия вузов «Геодезия и аэрофотосъемка», МИИГАиК.2012.№3.С.53-64.
2. И.Ю. Савин, А.Т. Зверев, Е.В. Фисенко. Разработка метода оценки и прогноза повреждения сельскохозяйственных посевов по космическим снимкам// Известия вузов «Геодезия и аэрофотосъемка», МИИГАиК.2013.№2.С.81-85.
3. А.Т. Зверев, Е.В. Фисенко, И.Н. Горохова. Изучение почвенно-растительного покрова городских экосистем по материалам беспилотного летательного аппарата и космическим снимкам высокого разрешения//Известия вузов «Геодезия и аэрофотосъемка», МИИГАиК.2014.№3.С.52-56.
4. А.Т. Зверев, Е.В. Фисенко. Специфика получения данных с беспилотного летательного аппарата// Известия вузов «Геодезия и аэрофотосъемка», МИИГАиК.2014. №5.С.27-30.
5. Е.В. Фисенко. Совершенствование методов автоматизации дешифрирования почвенно-растительного покрова на основе расширения признакового пространства с использованием мультииндексной обработки эталонных спектральных признаков объектов для данных синхронного наземного и космического дистанционного зондирования// Известия вузов «Геодезия и аэрофотосъемка», МИИГАиК.2015. №6.С.81-86.
6. Е.В. Фисенко. Результаты анализа методики мультииндексной обработки спектральных изображений подстилающей поверхности по комплексным данным дистанционного зондирования// Известия вузов «Геодезия и аэрофотосъемка», МИИГАиК.2019. №3.С.324-332.

Статьи в других научных изданиях.

7. И.Ю. Савин, А.Т. Зверев, Е.В. Фисенко. Космический мониторинг состояния агрофитоценозов// Приложение к журналу Известия вузов «Геодезия и аэрофотосъемка». Сборник статей по итогам научно-технической конференции, МИИГАиК.2012. №5.С.119-121.
8. И.Ю. Савин, Е.В. Фисенко. Данные спутника Terra/MODIS как основа для мониторинга состояния озимой пшеницы на отдельных полях//Наука, инновации и международное сотрудничество молодых ученых аграриев.2012.С.337-346.
9. А.Т. Зверев, Е.В. Фисенко. Теоретическая база и технологические решения космического мониторинга природных и техногенных чрезвычайных ситуаций// Известия вузов «Геодезия и аэрофотосъемка», МИИГАиК. 2013.№6.С.50-53.
10. И.Ю. Савин, А.Т. Зверев, Е.В. Фисенко. Космический мониторинг агрофитоценозов//Современные наукоемкие технологии.2013.№8-1.С.14-18.