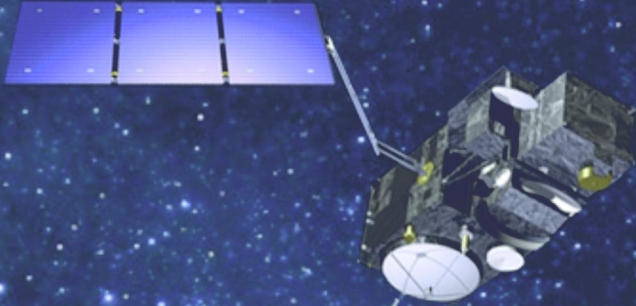
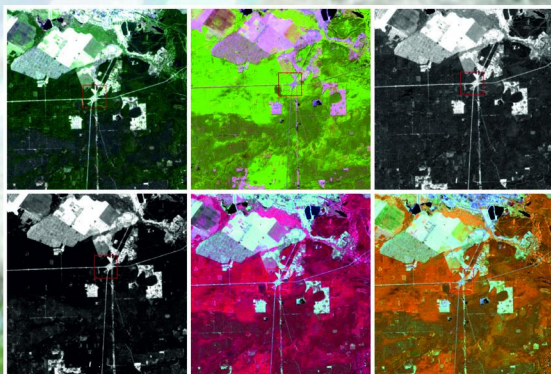
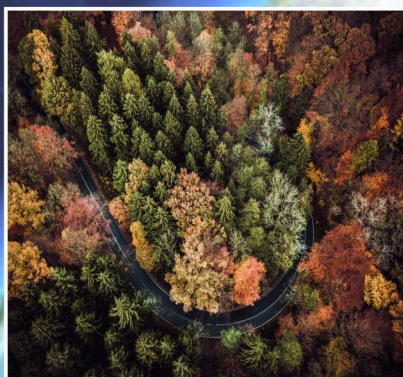
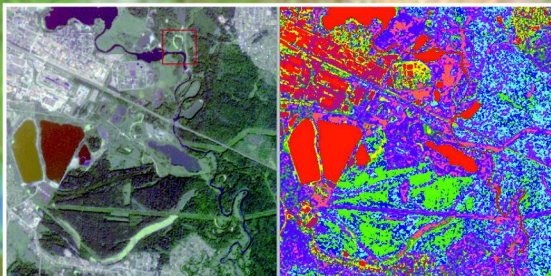


A satellite with solar panels is shown in space, emitting a beam of light towards the Earth's surface.

Дистанционные методы в лесном хозяйстве



Учебное
пособие



МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования

«ПОВОЛЖСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Центр устойчивого управления и дистанционного
мониторинга лесов

Э. А. КУРБАНОВ

О. Н. ВОРОБЬЕВ

ДИСТАНЦИОННЫЕ МЕТОДЫ В ЛЕСНОМ ХОЗЯЙСТВЕ

УЧЕБНОЕ ПОСОБИЕ

*Учебное пособие содержит сведения, необходимые
для формирования профессиональных компетенций
при подготовке магистров по направлению 35.04.01 «Лесное
дело», и рекомендуется Научно-методическим советом
по лесному хозяйству для использования в учебном процессе*

Йошкар-Ола
2020

УДК 630*2:528.71:502.3(075.8)

ББК 43.4я73

К 93

Рецензенты

доктор технических наук, проф. **С. А. Барталев** (г. Москва)

кандидат сельскохозяйственных наук, доц.

А. К. Габделхаков (г. Уфа)

кандидат технических наук, доц.

Е. М. Митрофанов (г. Москва)

К93 Курбанов, Э. А.

Дистанционные методы в лесном хозяйстве: учебное пособие /
Э. А. Курбанов, О. Н. Воробьев. – Йошкар-Ола: Поволжский государственный технологический университет, 2020. – 266 с.

ISBN 978-5-8158-2149-1

Даны теоретические основы дешифрирования, обработки и оценки лесного покрова по спутниковым изображениям. Представлены современные системы дистанционного зондирования Земли в России и за рубежом. Рассмотрены основные способы получения спутниковых данных Landsat и Sentinel, их тематической обработки и последующего анализа на примере лесов Среднего Поволжья. Показаны программные средства, используемые при работе с данными дистанционного зондирования в странах Евросоюза. Приведены примеры практического использования спутниковых данных разного пространственного разрешения для устойчивого управления лесами.

Для студентов бакалавриата и магистратуры лесохозяйственного и экологического профиля.

УДК 630*2:528.71:502.3(075.8)

ББК 43.4я73

ISBN 978-5-8158-2149-1

© Курбанов Э.А., Воробьев О.Н., 2020

© Поволжский государственный
технологический университет, 2020

© Центр устойчивого управления
и дистанционного мониторинга лесов, 2020

Ministry of Science and Higher Education of Russian Federation
VOLGA STATE UNIVERSITY OF TECHNOLOGY
Center for Sustainable Forest Management and Remote Sensing

E.A. KURBANOV O.N. VOROBEV

REMOTE SENSING IN FORESTRY

TEXTBOOK

The textbook contains data necessary for building of professional competencies for the training of masters in the field of 35.04.01 "Forestry" and is recommended by the Scientific and Methodological Council in Forestry for use in the educational process

Yoshkar-Ola
2020

UDC 630*2:528.71:502.3(075.8)

BBC 43.4я73

Reviewers

doctor of technical sciences, prof. **S. A. Bartalev** (Moscow)

candidate of agricultural sciences, associate prof.

A. K. Gabdelkhakov (Ufa)

candidate of technical sciences, associate professor

E. M. Mitrofanov (Moscow)

Remote sensing in forestry: textbook / E.A. Kurbanov, O.N. Vorobiev. –
Yoshkar-Ola: Volga State University of Technology, 2020. – 266 p.

ISBN 978-5-8158-2149-1

The textbook discloses the foundations of interpretation, processing and evaluation of forest cover from satellite images. The main focus is on the modern remote sensing systems in Russia and abroad. The major methods for obtaining satellite data from Landsat and Sentinel, their thematic processing and subsequent analysis by the example of forest in the Middle Volga Region are considered. There is a comparative analysis of software tools used for processing the remote sensing data in EU countries. The contributions contain numerous examples of practical application of satellite data with different spatial resolutions in sustainable forest management.

The textbook is a useful resource for undergraduate and graduate students majoring in forestry, agriculture and environment.

UDC 630*2:528.71:502.3(075.8)

BBC 43.4я73

ISBN 978-5-8158-2149-1

© Kurbanov E.A., Vorobiev O.N., 2020

© Volga State University of Technology, 2020

© Center for Sustainable Forest Management
and Remote Sensing, 2020

ACKNOWLEDGEMENT

The Jean Monnet center of Excellence «European Expertise and Technology for Environmental Protection and Sustainable Forestry» at Volga State University of Technology has been funded with support from the EU ERASMUS+ program.

The European Commission support for the production of this publication does not constitute an endorsement of the contents which reflects the views only of the authors, and the Commission cannot be held responsible for any use which may be made of the information contained therein.

Co-funded by the
Erasmus+ Programme
of the European Union



Центр совершенства им. Жана Монне «Европейская экспертиза и технологии в области защиты окружающей среды и устойчивого лесоводства» (SUFEX) при Поволжском государственном технологическом университете получил финансовую поддержку программы Erasmus+ Европейского Союза.

Содержание учебного пособия отражает точку зрения только его авторов. Исполнительное агентство по вопросам образования, аудиовизуальной деятельности и культуры и Европейская Комиссия не несут ответственности за любое использование информации, содержащейся в данной публикации.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Список сокращений и условных обозначений	10
Введение	15
Introduction	18
1. Дистанционное зондирование Земли	21
1.1. Применение данных ДЗЗ для оценки лесов и природопользования	21
1.2. Сервисы данных ДЗЗ	26
1.3. Способы получения данных ДЗЗ.....	36
<i>Контрольные вопросы по разделу 1</i>	<i>39</i>
2. Цифровые данные дистанционного зондирования Земли	40
2.1. Цифровые изображения ДЗЗ	40
2.2. Разрешения изображений ДЗЗ	48
2.3. Форматы данных ДЗЗ	60
2.4. Программы по обработке ДЗЗ	68
<i>Контрольные вопросы по разделу 2</i>	<i>74</i>
3. Предварительная обработка изображений ДЗЗ.....	76
3.1. Радиометрическая коррекция.....	78
3.2. Атмосферная коррекция	89
3.3. Геометрическая коррекция	93
3.3.1. Интерполяция значений яркости при повторной дискретизации	95
3.3.2. Опорные точки	100
3.3.3. Геометрическая коррекция изображений в ENVI	103

3.4. Объединение растровых данных	111
3.4.1. Pan-sharpening изображений ДЗЗ	112
3.4.2. Процедура Pan-sharpening в ENVI	114
<i>Контрольные вопросы по разделу 3</i>	<i>118</i>
4. Дешифрирование растительности	119
4.1. Спектральные свойства растительности	119
4.2. Вегетационные индексы	122
4.3. Определение NDVI в пакете ENVI	130
4.4. Преобразование Tasseled Cap	140
4.4.1. Пример преобразования Tasseled Cap в ENVI	142
4.5. Нормализованный индекс гарей	144
4.5.1. Пример расчета NBR и dNBR в ENVI	154
<i>Контрольные вопросы по разделу 4</i>	<i>164</i>
5. Классификация изображений	165
5.1. Принцип классификации изображения	165
5.2. Типы классификации ДЗЗ.....	169
5.3. Управляемая классификация	173
5.3.1. Основные характеристики обучающей выборки	173
5.3.2. Преимущества и недостатки	176

5.3.3. Методы управляемой классификации	177
5.3.4. Формирование обучающей выборки в ENVI	182
5.3.5. Оценка разделимости классов обучающей выборки	188
5.3.6. Пример оценки разделимости классов в ENVI	190
5.3.7. Примеры управляемой классификации в ENVI	196
5.4. Неуправляемая классификация	204
5.4.1. Порядок проведения неуправляемой классификации	204
5.4.2. Примеры неуправляемой классификации в ENVI	209
5.5. Пост-классификационная обработка изображений	218
5.5.1. Генерализация тематических изображений в ENVI.....	218
5.5.2. Пример Majority Analysis в ENVI	220
5.5. Оценка точности классификации изображений ...	224
5.5.1. Пример оценки точности классификации классов наземного покрова.....	232
5.4.2. Пример оценки точности в ENVI 5	234
5.6. Преобразование данных классификации в векторный формат	238

5.6.1. Векторизация данных классификации в ENVI.	238
5.6.2. Экспорт файла с расширением «EVF» в формат шейп в пакете ENVI	242
<i>Контрольные вопросы по разделу 5</i>	244
Словарь терминов	246
Список литературы	251

Список сокращений и условных обозначений

ГИС	Географическая информационная система
ДЗЗ	Дистанционное зондирование Земли
ПЗС	Прибор с зарядовой связью (от <i>англ.</i> Charged Couple Device)
BIP	Канал с чередованием пикселей (от <i>англ.</i> Band Interleaved by Pixel)
BIL	Каналы, последовательно перемежающиеся по строкам (от <i>англ.</i> Band Interleaved by Line)
BSQ	Формат последовательных каналов (от <i>англ.</i> Band Sequential)
CAP	Формат изображений ДЗЗ, называемый именем центра компании (от <i>франц.</i> Centre d'Archivage et de Pretraitement)
CBI	Композитный индекс гарей (CBI – <i>англ.</i> Composite Burn Index)
CE	Ошибка допуска (<i>англ.</i> Commission error)
Geo-TIFF	Формат хранения данных (<i>англ.</i> Tagged Image File Format)
HDF	Иерархический формат данных (<i>англ.</i> Hierarchical Data Format)
CEOS	Комитет по спутниковым наблюдениям за Землей (<i>англ.</i> Committee on Earth Observation Satellites)

CORINE	Программа Европейской комиссии по координации информации об окружающей среде (от <i>англ.</i> Coordination of Information on the Environment)
DEM	Цифровая модель рельефа (<i>англ.</i> Digital Elevation Model)
DN	Цифровые значения пикселей (от <i>англ.</i> Digital numbers)
ENVI	Среда для обработки изображений (от <i>англ.</i> Environment for Visualizing Images)
ESA	Европейское космическое агентство (от <i>англ.</i> European Space Agency)
ESRE	Европейская ассоциация компаний дистанционного зондирования (от <i>англ.</i> Association of European Space Research Establishments)
EVI	Усовершенствованный вегетационный индекс (от <i>англ.</i> Enhanced Vegetation Index)
FWHM	Полная ширина на уровне половинной амплитуды (от <i>англ.</i> Full width at half maximum)
FAO	Продовольственная и сельскохозяйственная организация ООН (от <i>англ.</i> Food and Agricultural Organization of United Nations)
FLAASH	Модуль в программе ENVI, обеспечивающий атмосферную коррекцию изображений (от <i>англ.</i> Fast Line of sight Atmospheric Analysis of Spectral Hypercubes)
GCP	Точки наземного контроля (от <i>англ.</i> Ground Control Points)

GPS	Глобальная система позиционирования (от <i>англ.</i> Global Positioning System)
HRL	Слои высокого разрешения (от <i>англ.</i> High Resolution Layers)
IFOV	Мгновенное поле зрения (от <i>англ.</i> instantaneous field of view)
ISODATA	Итеративный самоорганизующийся метод анализа данных (от <i>англ.</i> Iterative Self-Organizing Data Analyses Techniques)
JM	Алгоритм «Джефрис-Матусита» (от <i>англ.</i> Jeffries-Matusita)
$\hat{k}$	Коэффициент Каппа
MODIS	Спектрорадиометр среднего разрешения (от <i>англ.</i> Moderate resolution imaging spectroradiometer)
MSS	Мультиспектральный сканер (от <i>англ.</i> MultiSpectral Scanner, Landsat)
ROI	Область интереса (от <i>англ.</i> Region of Interest)
SNR	Соотношением сигнал/шум (от <i>англ.</i> Signal to Noise Ratio)
NASA	Национальное управление по аэронавтике и исследованию космического пространства США (от <i>англ.</i> National Aeronautics and Space Administration)
NBR	Нормализованный индекс гарей (от <i>англ.</i> Normalized Burn Ratio)

NDMI	Нормализованный разностный индекс влагосодержания (от <i>англ.</i> Normalized Difference Moisture Index)
NDVI	Нормализованный относительный индекс растительности (от <i>англ.</i> Normalized Difference Vegetation Index)
NIR	Ближний инфракрасный (от <i>англ.</i> Near-infrared)
OE	Ошибка пропуска (от <i>англ.</i> Omission error)
P	Общая точность классификации
PA	Точность производителя (от <i>англ.</i> Producer's accuracy)
PAN	Панхроматический (от <i>англ.</i> Panchromatic)
RGB	Мультиспектральный композит в последовательном сочетании каналов: Red, Green, and Blue (красный, зеленый, синий)
SAVI	Почвенный вегетационный индекс (от <i>англ.</i> Soil Adjusted Vegetation Index)
SWI	Индекс влажности почвы (от <i>англ.</i> Soil Water Index)
TC	Преобразование Tasseled-Cap (<i>англ.</i> «Колпачок с кисточкой») – это преобразование исходных каналов мультиспектрального изображения в новый набор каналов с определенными интерпретациями

USGS	Геологическая служба США (от <i>англ.</i> United States Geological Survey)
UTM	Международная система координат (от <i>англ.</i> Universal Transverse Mercator)
VI	Вегетационный индекс (от <i>англ.</i> Vegetation Index)

Введение

Применение данных дистанционного зондирования Земли (ДЗЗ) для решения текущих и долгосрочных задач при мониторинге природопользования, охране окружающей среды и наблюдениях за природными явлениями актуально в условиях непрерывного развития и совершенствования спутниковых технологий. На сегодняшний день трудно переоценить вклад, который вносят данные ДЗЗ при решении актуальных задач, стоящих перед лесным хозяйством и в области природопользования. Их востребованность в различных отраслях хозяйственной деятельности объясняется объективностью, масштабом охвата территорий, доступностью и возможностью обработки в современных программных продуктах.

Данные ДЗЗ являются важным источником информации при мониторинге пожароопасной обстановки, лесных пожаров, обнаружения незаконных вырубок леса, оценке стихийных бедствий, динамике и состоянии сельхозугодий и т.п. Спутниковые данные также широко используются в деятельности крупных организаций и предприятий и становятся все более доступными для гражданского общества. Большая роль отводится дистанционным наблюдениям Земли также в достижении целей устойчивого развития, сформулированных в документе «Повестка дня на период до 2030 года» в рамках программы ООН.

Большие успехи в использовании спутниковых данных наблюдаются во многих отраслях народного хозяйства в странах Европейского Союза. В частности, Ассоциация европейских учреждений космических исследований (ESRE) вносит существенный вклад в реализацию «Космической стратегии для Европы», которая была одобрена Европейским Союзом в 2017 году. В документе подчеркивается, что европейские институциональные факторы по-прежнему остаются ключевыми исполнителями и заказчиками инноваций в космическом секторе.

В качестве мотивирующих факторов таких инноваций выступают три предпосылки: цели национальной безопасности и наука, расширение использования спутниковых приложений до уровня обычного требования пользователя. Особо подчеркивается, что космические технологии и космические данные/ услуги стали интегрированной и незаменимой частью современной экономики ЕС и глобального общества.

В учебном пособии рассматриваются теоретические вопросы дистанционного зондирования и практические примеры работы с изображениями спутниковой системы Landsat (TM, ETM и OLI) и спектрорадиометра MODIS американского управления NASA в области лесного хозяйства, окружающей среды и природопользования. Важным этапом развития использования спутниковых данных стала Европейская программа Copernicus (ESA – European Space Agency), данные которой широко используются специалистами во все мире. В учебном пособии рассматривается несколько примеров оценки лесного покрова на основе спутникового изображения Sentinel-2, запущенного в рамках этой программы.

В работе в значительной степени использованы и обобщены современные методики и разработки исследователей стран Европейского Союза в области предварительной подготовки спутниковых данных, их коррекции, а также дешифрирования объектов наземного покрова. Подробно рассматриваются спектральные методы улучшения спутниковых изображений, проведения процедуры паншарпенинга, преобразования Tasseled Cap и изменения их размеров. Практические примеры использования изображений ДЗЗ по различным оценкам состояния лесного покрова основаны на многолетних исследованиях центра Устойчивого управления и дистанционного мониторинга лесов ФГБОУ ВО «ПГТУ» в регионе Среднего Поволжья Российской Федерации.

Большой раздел учебного пособия посвящен классификации изображений различными методами (алгоритмами), оценке разделимости тематических классов, постклассификационной обработке изображений ДЗЗ и оценке точности картографирования. В каждом разделе пособия приводится детальное описание необходимых действий по выполнению соответствующих команд в программе ENVI 5 для решения задач по работе со спутниковыми данными.

В последние годы при оценке динамики и состояния лесного покрова широкое применение находят вегетационные индексы, которые также подробно рассмотрены в учебном пособии. Для изучения степени повреждения древостоев лесными пожарами и сукцессии растительного покрова на нарушенных территориях приводится подробное описание использования нормализованного коэффициента гарей. С этой целью были использованы разновременные спутниковые снимки системы Landsat. Примеры обработки спутниковых изображений приведены в комплексном пакете ENVI 5.

В работе также представлены примеры оценки точности тематического картографирования на основе экспериментальных данных и материалов, которые можно получить из открытых источников.

Учебное пособие рекомендуется в первую очередь студентам высших учебных заведений, обучающимся по направлениям подготовки магистратуры (35.04.01 «Лесное дело», 05.04.06 «Экология и природопользование») и бакалавриата (05.03.06 «Природопользование», 35.03.01 «Лесное дело», 35.03.10 «Ландшафтная архитектура», 05.03.06 «Экология и природопользование»), а также аспирантам, исследователям и специалистам, работающим в области лесного хозяйства и природопользования.

INTRODUCTION

The use of Remote Sensing is very important to solve current and long-term problems in monitoring of environmental management, environmental protection and observations of forest cover in the context of continuous development and improvement of satellite technologies. Today it is difficult to overestimate the contribution that Remote Sensing data make in solving the problems facing forestry and in the field of nature management. Their relevance in various fields of economic activity is explained by objectivity of the satellite images, the extent of coverage of territories, accessibility and the possibility of processing in modern software products.

Remote sensing data are important source of information when monitoring a fire risk situation, forest burnt areas, detecting illegal logging, assessing natural disasters, the dynamics and condition of agricultural crops, etc. Satellite data are also widely used in the activities of large organizations and enterprises, and are becoming increasingly accessible to civil society. Great successes in the use of satellite data are observed in many sectors of the national economy in the countries of the European Union. The Earth's remote monitoring also plays a major role in achieving the Sustainable Development Goals set in the UN 2030 Agenda program.

Great successes in the use of the Remote Sensing data are observed in many sectors of the national economies and research activities in the partner countries of the European Union. In particular, the Association of European Space Research Institutions (ESRE) makes a significant contribution to the implementation of the "Space Strategy for Europe", which was approved by the European Union in 2017. The paper emphasizes that European institutional factors continue to be key performers and customers of innovation in the space sector.

Three conditions are the motivating factors for such innovations: national security goals and science, extension of the use of satellite

applications to the level of the user's requirements, and the aspiration for space exploration by man. It is emphasized that space technology and space data / services have become an integrated and indispensable part of the modern EU economy and global society.

The training manual (textbook) addresses theoretical issues of remote sensing and practical examples of working with images of the Landsat satellite system (TM, ETM and OLI) and the NASA MODIS spectroradiometer in the field of forestry, the environment and nature management. An important part in development of the use of satellite images was the European Copernicus program (ESA), the data of which is widely used by specialists all over the world. The textbook (tutorials) covers practical examples of forest cover assessments based on imagery of Sentinel-2 satellite launched as part of this program.

The work has largely based and summarises the methods and experience of researchers from European Union countries in the field of satellite data preparation, their correction, as well as interpretation of ground cover objects. Spectral methods for improving satellite images, carrying out the pan-sharpening procedure and changing their sizes are examined in detail. Spectral methods for improving satellite images, performing the pan-sharpening procedure, transformation of the Tasseled Cap and images resizing are considered in detail. Practical examples of the use of remote sensing images for various assessments of the state of forest cover are based on many years of research by the Center for Sustainable Forest Management and Remote Sensing of the Volga State University of Technology in the region of Middle Volga of the Russian Federation.

A large section of the training manual is devoted to the Remote Sensing image classification by various methods (algorithms), the assessment of the separability of thematic classes, the post-classification processing of remote sensing images, and the assessment of mapping accuracy. Each section of the manual provides a

detailed description of the necessary actions to carry out the appropriate commands in the ENVI 5 software to solve different tasks with satellite data.

In recent years, when assessing the dynamics and condition of forest cover, vegetation indices are widely used, which are also discussed in detail in the textbook. A detailed description of the use of the normalized burn ratio index is provided to study the burn severity and succession of vegetation cover on forest areas disturbed by forest fires. For this purpose, multitemporal Landsat satellite images were used. Examples of satellite image processing are provided in the comprehensive ENVI 5 package.

The textbook also provides examples of assessing the accuracy of thematic mapping based on experimental data and materials that can be obtained from online open sources.

The textbook is recommended for students of higher educational institutions, students majoring in Master's programs (35.04.01 "Forestry", 05.04.06 "Ecology and nature management") and undergraduate (05.03.06 "Nature Management", 03.03.01 "Forestry", 03.03.10 "Landscape Architecture", 05.03.06 "Ecology and Nature Management"), as well as young scientists and specialists working in the field of forestry and nature management.

1|| ДИСТАНЦИОННОЕ ЗОНДИРОВАНИЕ ЗЕМЛИ

1.1. Применение данных ДЗЗ для оценки лесов и природопользования

Космические изображения земной поверхности обычно получают с помощью оптической или радиолокационной аппаратуры, установленной на искусственных спутниках Земли. В последние годы дистанционное зондирование Земли (ДЗЗ) находит широкое применение практически во всех сферах жизни человека: сельском и лесном хозяйстве, картографии, строительстве, археологии, метеорологии и климатологии, геологии, океанографии, мониторинге водных ресурсов и т.п. Технологии ДЗ интегрированы с геоинформационными системами (ГИС), что повышает возможности обработки данных и эффективность их использования. ДЗЗ и ГИС также позволяют пользователям собирать и интерпретировать наземные данные на больших, часто труднодоступных территориях.

Спутниковые данные становятся важным элементом в решении вопросов по оценке и мониторингу лесного покрова, экологических проектов и в различных областях природопользования. В Германии с помощью данных ДЗЗ оценивается влияние экстремальных температур на растительный покров (Baumbach et al., 2017).

Картографирование фитомассы растительности проведено на основе 26 национальных лесных инвентаризаций и данных по запасам древостоев, полученных по ДЗЗ (ENVISAT ASAR images) в рамках проекта FAO (Food and Agricultural Organization) и Европейской комиссии (EU Commission) по мониторингу лесных земель в странах ЕС (Avitabile, Camia, 2018). Результаты исследований с 1990 по 2015 гг. также представлены в рамках программы «Глобальной оценки лесных ресурсов», осуществляемой коллективом ученых по данным ДЗЗ (Keenan et al., 2015).

Активно используются ДЗЗ польскими специалистами департамента лесной инвентаризации института управления лесными ресурсами. В частности коллективом авторов применен регрессионный анализ для оценки индексных показателей растительности по спутниковым данным Sentinel-2 (Европейского космического агентства) при мониторинге сосновых насаждений в западной части Польши (Hawtyło et al., 2018).

Спутниковые изображения повсеместно используются для составления карт наземного покрова, природопользовании и экологии (Рахматуллин и др., 2018). Они предоставляют возможность для проведения мониторинга природных ландшафтов, лесного покрова, сельскохозяйственных угодий и других объектов (Воробьев и др., 2012; Räsänen et al., 2019). Данные ДЗЗ применяются при оценке чрезвычайных ситуаций и их последствий и могут быть использованы в качестве важного материала для общей системы оценки, планирования и координации природоохранных мероприятий (Воробьев и др., 2014; Loboda et al., 2017; Заичко, Хайлов, 2019).

При изучении показателей биоразнообразия экосистем используются данные, получаемые из различных источников наземных наблюдений (Fassnacht et al., 2016; Габделхаков и др., 2014; Karasiak et al., 2017). При проведении глобального мониторинга биоразнообразия выделяют 4 основных источника наблюдений: экстенсивные и интенсивные схемы мониторинга, полевые исследования и дистанционное зондирование (Proença et al., 2017). ДЗЗ особенно подходит для работы с информацией о функционировании экосистем и структуре показателей биоразнообразия (EBV– *англ.* Essential Biodiversity Variables). Ошибки в данных могут повлиять на репрезентативность глобальных наборов о биоразнообразии экосистем.

ДЗЗ становится неотъемлемой частью технологий по изучению изменения климата и его влияния на экосистемы

(Racknell, 2011; Воробьев и др., 2019; Медведева и др., 2019). За последние десятилетия во многих регионах ЕС интенсивное землепользование и изменение наземного покрова (LUCC – *англ.* Land Use/Land Cover Change) привели к смене городских ландшафтных структур, что многократно повышает риск возникновения лесных пожаров (Paveglio et al., 2015). Моделирование на основе логистического регрессионного сценариев развития пожароопасных ситуаций и их пространственно-временное картографирование по данным ДЗЗ позволяет спрогнозировать и снизить последствия их негативного влияния на жизнь городских территорий (Modugno et al., 2016).

Ключевым фактором для оперативного управления и мониторинга лесов является наличие актуальной и своевременной геопрограмственной информации об их состоянии (Anderson et al., 2017). В Германии на основе спутниковых снимков высокого разрешения RapidEye предложена более совершенная система управления, которая способна эффективно обслуживать службы лесной инвентаризации и планирования, разного уровня централизации, вплоть до лесных районов (Stoffels et al., 2016). В ходе исследования авторы использовали пространственно-адаптивную классификацию спутниковых изображений для получения информационных тематических слоев лесных участков (тип леса, преобладающая порода, возраст) на основе разновременных спутниковых данных.

В Финляндской Республике неуправляемая классификация спутниковых снимков методом ближайшего соседа для разграничения лесных и нелесных земель стала неотъемлемой частью национальной инвентаризации лесов (Haapanen et al., 2004; Rasanen et al., 2019). Кроме того, в стране при проведении национальной инвентаризации активно используется лазерное сканирование, что позволяет повысить точность проводимых исследований (Pakkala et al., 2013; Kotivuori et al., 2016).

Спутниковые снимки среднего разрешения Landsat получили наибольшее распространение при мониторинге состояния лесного покрова (Барталев, 2016; Терехин, 2012; Hansen et al., 2012; Жирин и др., 2014; Курбанов и др., 2014). К примеру, в Европейском Союзе единственная общеевропейская карта наземного покрова, которая разработана в рамках программы об окружающей среде (CORINE), была получена на основе данных спутниковой съемки Landsat (Bossard et al., 2000) при минимальной единице картографирования 25 га.

Широкое применение при мониторинге изменений, происходящих на поверхности Земли под влиянием изменения климата и деятельности человека, находят разновременные спутниковые снимки (Herpin-Stall-Cymerman et al., 2009; Hai-Hoa et al., 2013; Елсаков, Кулюгина, 2014; Ghosh, et al., 2016). Анализ данных спутниковой съемки позволяет выявлять изменения на больших площадях, а также проводить их оценку и валидацию. Такие исследования проводились в США, Бразилии, Европе, Африке, Израиле, России и ряде других стран.

Российские ученые также активно проводят исследования в области дистанционного мониторинга растительного (лесного) покрова. Среди них следует отметить коллективы Института космических исследований РАН (Барталев и др., 2004; Лупян и др., 2011; Барталев, 2015; Ховратович и др. 2019), которые показали современные возможности спутникового мониторинга при широкомасштабных оценках состояния и динамики бореальных лесных экосистем Северной Евразии. Ими также создан профессиональный информационный сервис анализа данных спутниковых наблюдений «БЕГА-PRO», который предназначен для оценки и мониторинга растительного (лесного) покрова Северной Евразии при организации регионального дистанционного мониторинга на территории Российской Федерации и близлежащих стран (Лупян, 2014).

Ученые института биологии Коми НЦ УрО РАН проводят исследования межгодовых изменений максимальных величин индекса NDVI на участках тундровой зоны Европейского северо-востока по спутниковым изображениям Terra-MODIS (Елсаков, Телятников 2013; Елсаков, Щанов, 2019).

Оценка степени нарушенности лесных экосистем для устойчивого управления лесами и использования лесных ресурсов на базе снимков спутника Landsat проведена учеными Белгородского государственного национального исследовательского университета. В ходе работы авторами подготовлена картограмма нарушенности верхних ярусов лесных массивов юго-запада Среднерусской возвышенности (Терехин, 2017; Терехин, Постернак, 2019).

В последние годы широкое применение находят данные спутника Sentinel проекта «Copernicus» Европейского Союза. Проведены оценки возможности построения классификатора преобладающих пород леса на основе данных Sentinel-2, что позволит повысить точность лесной таксации (Курбанов и др., 2018; Денисова, 2019; Meyer et al., 2019).

Применение данных Sentinel-2 для решения задач мониторинга лесов и других типов земного покрова, а также управления чрезвычайными ситуациями существенно расширяет возможности спутникового картографирования растительного покрова территории России (Барталев и др., 2016).

Снимки Sentinel-2 обладают большим потенциалом для повышения точности классификации типов леса и их породного состава (Puletti et al., 2017; Meyer et al. 2019; Grabska et al., 2019). Обычно для выделения отдельных крон деревьев исследователи используют изображения, полученные с радиометров высокого разрешения (Козодеров, Дмитриев, 2017; Жарко и др., 2018), и спутниковые данные, совмещенные с лидарной съемкой (Kane et al., 2010; Clark et al., 2011; Kangas et al., 2018).

1.2. Сервисы данных ДЗЗ

Наблюдение за земной поверхностью – это сбор информации о физических, химических и биологических системах и процессах на планете Земля с помощью технологий дистанционного зондирования, обычно с использованием спутниковых систем, имеющих устройства визуализации. Применяемые технологии используются для мониторинга, оценки состояния и изменений как природной, так и техногенной сферы.

На современном этапе космические (спутниковые) технологии представляют собой надежные способы сбора данных с повторным охватом территории исследования, которые в сочетании с соответствующими методиками оценок предоставляют уникальные возможности для получения информации об окружающей среде, ее состоянии и антропогенном воздействии человека.

Одно из ведущих мест в мире в продвижении современных технологий по программам мониторинга Земли на системном уровне, наряду с такими организациями как Роскосмос и NASA, принадлежит объединенному исследовательскому центру (JRC – *англ.* The Joint Research Centre) Европейской комиссии. Этот центр в своей деятельности развивает и поддерживает несколько направлений исследований, в которых использование данных ДЗЗ играет ключевую роль.

К ним можно отнести следующие программы: Инфраструктура пространственной информации в Европе (INSPIRE – *англ.* Infrastructure for spatial information in Europe), Общедоступная система информации по окружающей среде (SEIS – *англ.* Shared Environmental Information System), Европейская программа наблюдения Земли (Copernicus), Глобальная система наблюдений за Землей (GEOSS – Global Earth Observation System of Systems), Общая сельскохозяйственная политика (CAP – *англ.* Com-

mon Agricultural Policy) и комплексная морская политика (Integrated maritime policy) (Joint Research Centre, 2019).

Одним из интересных проектов JRC является создание цифровой копии планеты Земля, которая будет использована для поддержки глобальных решений ЕС, а также для общественности и в научных исследованиях. JRC, в котором работают более 2000 ученых, также способствует установлению международных стандартов для исследований из космоса, сотрудничает с международными партнерами, а также предоставляет пользователям данные спутниковой съемки (Topp et al., 2018).

Особое место в Европейской космической программе занимает проект спутниковой системы навигации «Галилео» (*Galileo*), который координируется Европейским космическим агентством (ESA – *англ.* European Space Agency). Галилео является частью проекта «Трансевропейские сети» (Trans-European Networks), который предназначен для решения геодезических и навигационных задач (United space in Europe ...). В настоящее время компания «Галилео» совместима с системами GPS (Global Positioning System) и GLONASS (Global Satellite Navigation System), глобальными спутниковыми навигационными системами США и России. Предлагая в качестве стандарта двойные частоты, программа Galileo обеспечивает точность позиционирования в реальном времени вплоть до метрового диапазона.

Еще одной важной в структуре научных исследований Copernicus ЕС является программа «Координация информации об окружающей среде» (CORINE – *англ.* Coordination of Information on the Environment), в рамках которой создается база данных о земном покрове всей Европы. Панъевропейский компонент этой программы координируется Европейским агентством по окружающей среде (EEA – *англ.* European Environment Agency) и предоставляет информацию о земном покрове

ве / землепользовании (LC/LU Land Cover/Land Use) в виде тематических слоев высокого разрешения (рисунок 1.1).

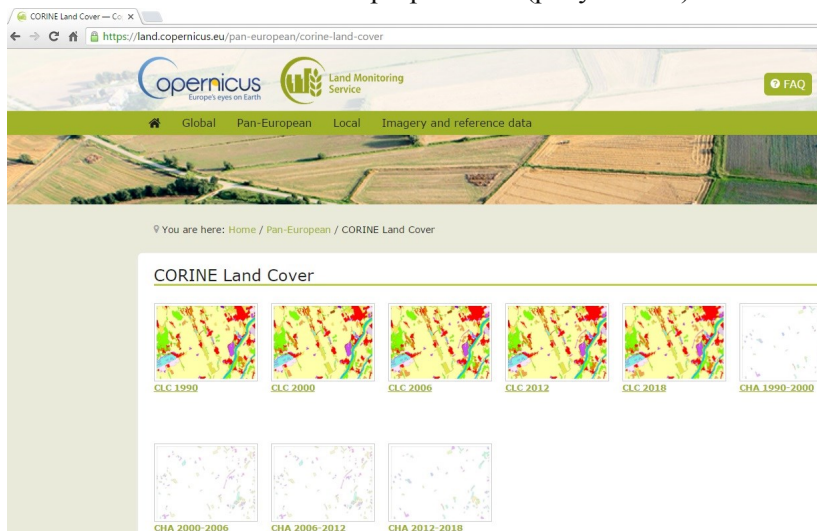


Рисунок 1.1 – Сайт проекта CORINE LU/LC

Данные CORINE Land Cover были разработаны для 1990, 2000, 2006, 2012 и 2018 годов. Этот векторный набор данных включает 44 класса растительного покрова и землепользования. Временной ряд CORINE Land Cover также включает слой смены землепользования, показывающий изменения в наземном покрове и землепользовании.

Слои высокого разрешения (HRL – *англ.* High Resolution Layers) представляют собой наборы растровых данных, которые предоставляют тематическую информацию о различных характеристиках наземного покрова и дополняют наборы данных для картографирования наземного покрова (например, CORINE Land Cover). Пять слоев HRL описывают некоторые из основных характеристик наземного покрова: непроницаемые поверхности (например, дороги и населенные пункты), лесные терри-

тории, луга, водные и болотные угодья, а также мелкие лесные объекты.

По мере развития технологий менялись и данные, которые использовались для мониторинга окружающей среды, начиная с Landsat MSS и заканчивая на современном этапе данными спутника Sentinel (Copernicus Global Land ...). В последние годы в качестве исходного материала для проекта CORINE выступают данные, получаемые по глобальному сервису Copernicus (рисунок 1.2).

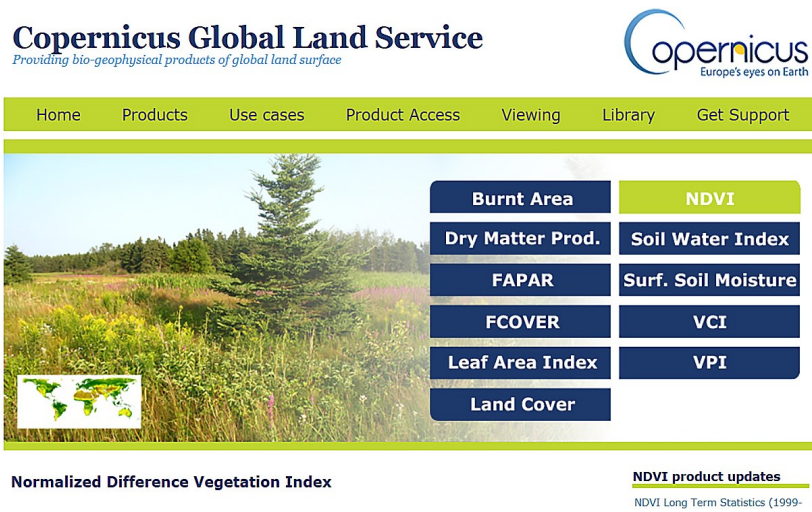


Рисунок 1.2 – Сайт проекта Copernicus

Copernicus – это европейская система мониторинга Земли, координируемая и управляемая Европейской комиссией (ЕС – *англ.* European Commission). Развитие инфраструктуры наблюдений осуществляется под эгидой Европейского космического агентства (ESA), обеспечивающего космические данные, и Европейским агентством по окружающей среде (ЕАА), обеспечивающим программу результатами наземных исследований. Она

нацелена на достижение глобальной, непрерывной, автономной, высококачественной и легкодоступной информации в широкой области наблюдений за поверхностью Земли. Помимо всего, она имеет целью повышение эффективности управления окружающей средой, выявления и смягчения последствий изменения климата и обеспечения гражданской безопасности.

Услуги, предлагаемые программой Copernicus, охватывают шесть основных взаимосвязанных тем: атмосфера, море, суша, климат, чрезвычайные ситуации и безопасность. Copernicus базируется на трех главных составляющих.

Космический компонент. Спутники наблюдения и связанные с ними наземные станции наблюдения за параметрами суши, атмосферы и океанов). Он включает в себя два типа спутниковых миссий: пять специализированных спутниковых аппаратов ESA Sentinel и других космических агентств, которые называются миссиями содействия.

Наземные измерения. Наземные и бортовые сети сбора данных, предоставляющие информацию об океанах, континентальной поверхности и атмосфере.

Услуги, разработанные и управляемые Copernicus и предлагаемые его пользователям и широкой общественности.

Большим спросом у специалистов также пользуются данные космического ведомства США NASA (National Aeronautics and Space Administration), предлагающего большой объем новых и архивных данных дистанционного зондирования земли, а также множества готовых тематических продуктов (NASA Research ..). Спутниковые изображения разного пространственного разрешения можно получить с сайта правительственной Геологической службы США (USGS *англ.* – United States Geological Survey), специализирующейся в науках о Земле. Отдельный раздел этой службы посвящен спутниковым данным по изучению растительного покрова Земли (рисунок 1.3).

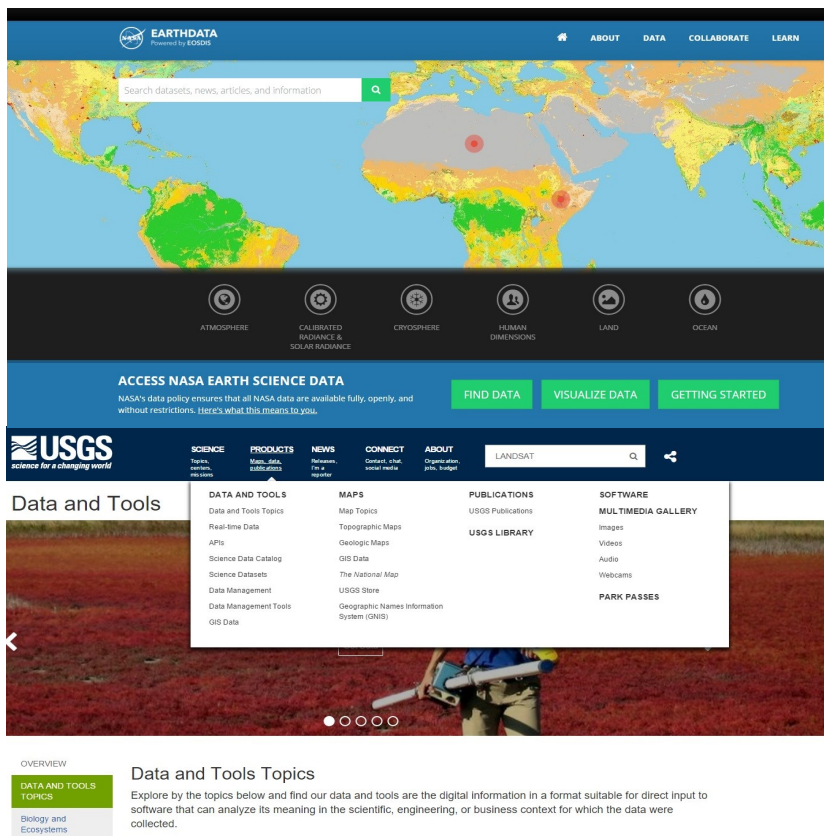


Рисунок 1.3 – Сайты космического ведомства NASA и USGS

ДЗЗ с российских спутников можно получить на геопортале Роскосмоса, который сочетает в себе средство просмотра снимков земной поверхности и средство поиска данных по наиболее полному в России каталогу (рисунок 1.4). С его помощью пользователь может не только оформить заявку на найденные им по каталогу архивные данные, но и заказать новую съёмку, задав требуемые параметры. Ежедневно в Геопортале размещается до 50 маршрутов съёмки с российских спутников «Ресурс-П» и «Канопус-В» (Геопортал данных ...).



РОСКОСМОС



Госкорпорация

Публикации

Космическая деятельность

Карьера

Информационные ресурсы

Главная → Информационные ресурсы → Геопортал данных ДЗЗ

Геопортал данных ДЗЗ Роскосмоса

Геопортал Роскосмоса — геоинформационный ресурс для доступа к единому банку данных дистанционного зондирования (ДЗЗ) Земли из космоса.

<https://gpd.ru>

Геопортал Роскосмоса — ресурс, который сочетает в себе средство просмотра космических снимков земной поверхности и средство поиска данных ДЗЗ с российских спутников по наиболее полному в России каталогу. С его помощью пользователь может не только оформить заявку на найденные им по каталогу архивные данные, но и заказать новую съёмку, задав требуемые параметры.

Оптической особенностью Геопортала Роскосмоса является оперативная публикация данных (для просмотра в полном пространственном разрешении), поступающих с космических аппаратов. Ежедневно в Геопортале размещается до 50 маршрутов съёмки с российских спутников «Ресурс-П» и «Канопус-В».

Основными потребителями данных Геопортала Роскосмоса являются органы государственной власти Российской Федерации, такие как МЧС, Минприроды, Росгидромет.^{*} Наряду с органами государственной власти, заказать данные ДЗЗ могут коммерческие организации и частные лица. Пользователю необходимо лишь выбрать район интереса и выполнить поиск по каталогу космических снимков.



Рисунок 1.4 – Сайт проекта корпорации Роскосмос

Коммерческим пользователям можно получить данные с российских и зарубежных спутников в российских компаниях «СканЭкс» (рисунок 1.5) и «Совзонд» (рисунок 1.6). Развитие отечественных средств дистанционного зондирования позволяет повысить их конкурентоспособность на рынке геоинформационных услуг. Снятие ограничений в ближайшие годы на использование спутниковых изображений высокого пространственного разрешения позволит значительно расширить возможность их получения и использования широкому кругу пользователей.

Полезным ресурсом для специалистов, работающих в области природопользования, сельского и лесного хозяйства, является «БЕГА-PRO», который представляет собой информационный сервис анализа данных спутниковых наблюдений для оценки и мониторинга возобновляемых биологических ресурсов, включая лесные экосистемы Российской Федерации. В основу сервиса «БЕГА-PRO» легли многолетние разработки ученых Института космических исследований Российской академии наук (Отдел технологий спутникового мониторинга) в области автоматизированных методов и технологий сбора, обработки и распространения спутниковых данных.

С помощью этого сервиса можно проводить контроль использованием временных рядов вегетационных индексов текущего состояния растительности на интересующем специалиста объекте (сельскохозяйственных полях, участках пастбищ, сенокосов, лесных выделах и т.п.). При этом пользователи сервиса «БЕГА-PRO» могут самостоятельно задать границы интересующего природного объекта и производить анализ имеющихся для него данных (Вега-PRO спутниковый сервис ...) для любого региона России. В архивах сервиса имеются ежедневно обновляемые данные по лесному покрову с начала двадцать первого столетия.

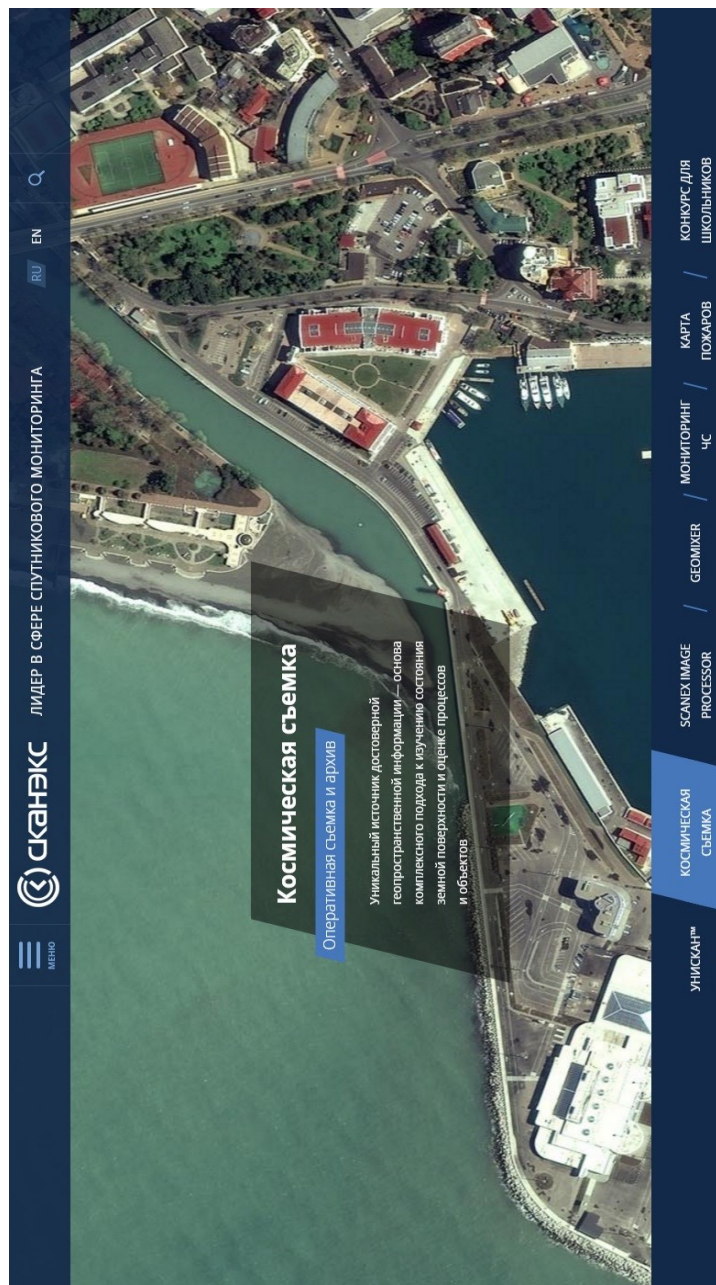


Рисунок 1.5 – Сайт проекта компании СканЭкс

ОТРАСЛЕВЫЕ РЕШЕНИЯ

ЛЕСНОЕ ХОЗЯЙСТВО

Картографирование земель
 лесного фонда
 Инвентаризация земель
 лесного фонда
 Мониторинг
 лесозаготовительной
 деятельности
 Мониторинг соблюдения
 правил заготовки древесины
 Мониторинг площадей,
 пройденных пожарами и
 ветровалами
 Лесопатологический
 мониторинг

[Главная](#) → [Отраслевые решения](#) →

Аэрокосмический мониторинг лесного хозяйства

В лесном хозяйстве данные ДЗЗ активно используются при инвентаризации лесов с целью определения качественных и количественных характеристик лесных массивов, для оценки ущерба, нанесенного лесным массивам пожарами, болезнями леса, загрязнением воздуха, незаконными вырубками.

Документы по проведению лесосурьства в лесном фонде Российской Федерации предусматривают применение космических снимков при решении широкого круга задач, особенно при устройстве маловосенных лесов северных и восточных регионов России. За последние годы существенно возросли как технические возможности съемочной аппаратуры, так и возможности дешифрирования в автоматическом или полуавтоматическом режиме. Все это позволяет эффективно использовать данные ДЗЗ при организации лесосурьства.

Решение задач, направленных на обеспечение информацией предприятий лесного хозяйства базируется на материалах базовой, регулярной и оперативной космической съемки, а также на фактических, статистических, полевых данных, имеющихся в распоряжении заказчика. Все выходные материалы, полученные в результате автоматизированной обработки и анализа, могут быть представлены в сетевом



Рисунок 1.6 – Сайт проекта компании СОВЗОНД

1.3. Способы получения данных ДЗЗ

Несмотря на то, что первые дистанционные цифровые изображения поверхности Земли появились еще в начале 70-х годов прошлого столетия, их массовое использование нашло применение в различных областях деятельности человека и народном хозяйстве только в последние десятилетия XXI века. Это объясняется существенным снижением цен для потребителей на спутниковые снимки или даже бесплатным доступом к ним, появлением соответствующего высокотехнологического оборудования и комплексных программ по обработке геопространственных данных, а также требованиями рынка услуг дистанционного зондирования, ростом количества доступной спутниковой информации и компьютеризацией общества.

Можно отметить, что во всем мире растет осознание важности доступа к надежным, подробным, своевременным и доступным геопространственным данным. Не менее важно, что технология сбора и предоставления геопространственных данных для ДЗЗ быстро развивается за счет стремительного прорыва в области информационных и коммуникационных технологий.

В настоящее время значение цифровой обработки данных ДЗЗ выходит за рамки простого визуального дешифрирования объектов местности. Все большее применение находят компьютерный анализ, разработка пошаговых алгоритмов обработки и моделирование пространственных данных. В частности, с помощью комплексных программ возможно классифицировать представленные на спутниковом изображении объекты местности для создания цифровой тематической карты наземного (растительного) покрова.

Одной из первых задач при работе с ДЗЗ является поиск и подбор геопространственных данных, требуемых для выполнения конкретных научных исследований, проектов или приклад-

ных задач (Principles of remote ..., 2009). *Геопространственные данные* – это цифровая информация об объектах на поверхности Земли, включая сведения об их конкретном местоположении в геодезической системе координат и свойствах (пространственных и атрибутивных). Внедрение высокоскоростных каналов передачи данных и использование ГИС-технологий привело к широкой доступности геопространственных данных для пользователей и специалистов, представляющих разные области знаний.

В мировой практике существуют два основных способа получения (подбора) геопространственных данных дистанционного зондирования для исследовательских проектов и прикладных решений:

1) Наземные методы, включающие полевые наблюдения, измерения на месте (закладка пробных площадей или тестовых участков) и геодезические работы. В этом случае сбор геопространственных данных проводится на реальных природных объектах (in situ).

2) Методы ДЗЗ, основанные на использовании информации, полученной с помощью специализированной аппаратуры, установленной на спутниках или беспилотных летательных аппаратах (датчиков, фотокамер, радиометров, сканеров или радаров). В этом случае полученные данные не полностью отражают характеристику о природном объекте.

Несмотря на широкие возможности применения данных дистанционного зондирования и улучшения качества спутниковой съемки, лучшим способом изучения и описания природных объектов местности является комплексный подход, требующий использование данных ДЗЗ в сочетании с наземными наблюдениями (рисунок 1.7). Например, точные карты лесного покрова могут быть получены с помощью данных спутникового изображения в сочетании с полевыми (таксационными) измерениями на исследуемой местности.

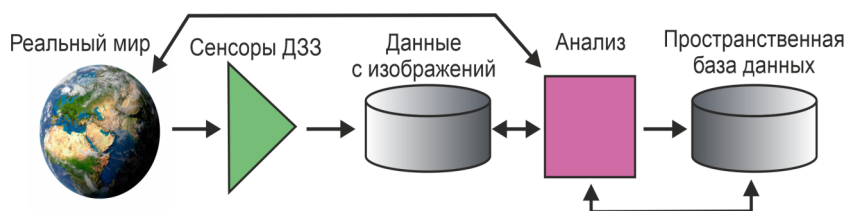


Рисунок 1.7 – Принцип комплексного подхода к исследованию объектов: данные ДЗЗ дополняются результатами наземных измерений

Интерпретация изображения ДЗЗ является сложной задачей, в которой существенная роль, в конечном итоге, отводится дешифровщику (аналитику). Обычно до начала работ со спутниковыми снимками дешифровщик не знает точно, какой тип растительности будет преобладающим на вновь полученной тематической карте исследуемой местности. Он будет в значительной степени зависеть от других факторов: рельефа, климатических условий, геоморфологии, лесорастительных условий и т.п. Работа аналитика в большой степени заключается в том, чтобы выявить связи между изображениями ДЗЗ и факторами, влияющими на конечный продукт тематического картографирования.

При этом важно признать, что роль программных продуктов по обработке геопространственных данных гораздо важнее и гораздо сложнее, чем мы можем себе это представить (White et al. 2018). Благодаря современным информационным технологиям в области ДЗЗ мы воспринимаем и используем данные о наземном (растительном) покрове местности. Эти технологии позволяют визуализировать геопространственные данные. Принимая во внимание огромный объем данных, фиксируемых спутниковыми сенсорами, можно сказать, что без таких технологий это сделать было бы не возможно.

|| Контрольные вопросы по разделу 1

1. Работы каких российских исследователей, использующих ДДЗ в картографировании наземного покрова, вам известны? Назовите коллективы и опишите научно-практические результаты их исследований.
2. Приведите примеры успешного использования ДЗЗ в области лесного хозяйства и природопользовании в других странах мира.
3. Какие спутниковые системы на сегодняшний день используются в Российской Федерации и странах Европейского Союза?
4. Назовите преимущества использования данных ДЗЗ при решении вопросов в области лесного хозяйства, лесоустройства и лесной инвентаризации в сравнении с наземными исследованиями.
5. Какие сервисы данных дистанционного зондирования используются за рубежом и в Российской Федерации? Приведите конкретные примеры геопорталов и геоинформационных услуг.
6. Что такое геопространственные данные? Как они могут быть использованы в лесном хозяйстве и природопользовании?
7. Какие способы получения геопространственных данных вы знаете? В чем их преимущества и недостатки? Как они дополняют друг друга?

2 || ЦИФРОВЫЕ ДАННЫЕ ДИСТАНЦИОННОГО ЗОНДИРОВАНИЯ ЗЕМЛИ

2.1. Цифровые изображения ДЗЗ

Цифровые изображения ДЗЗ обычно представлены в виде структуры растровых данных, в которых каждый элемент рисунка состоит из последовательного ряда значений. Каждый дополнительный спектральный канал формирует дополнительный набор связанных между собой подобных данных. При этом пиксель¹ рассматривается как отдельная единица, имеющая свои координаты в пределах изображения (рисунок 2.1).

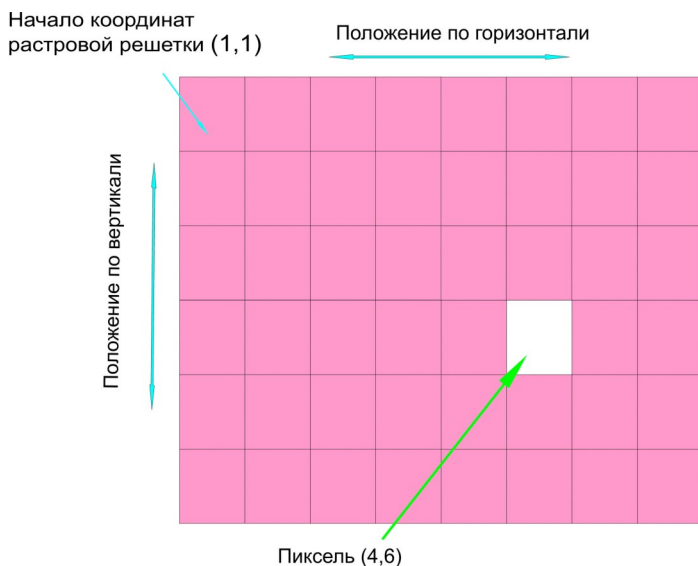


Рисунок 2.1 – Общее представление о растровых данных. Началом координатной системы (ряда, столбца) является левый верхний угол сетки в ячейке (ряд 1, столбец 1). Размер ячейки сетки (пикселя) обычно выражается в единицах расстояния на местности (метрах). Пиксели распределяются по координатам, поэтому пиксель (4, 6) лежит на пересечении 4 ряда и 6 столбца.

¹ **Пиксель** является сокращением от *англ.* picture element – минимальный элемент изображения.

Цифровые данные ДЗЗ получаются с помощью специальных приборов (сенсоров), систематически сканирующих участки подстилающей поверхности и регистрирующих фотоны, отраженные или излучаемые наземными объектами. В последние десятилетия методы оптико-механического сканирования являются главными в ДЗЗ. Оптико-механический сканер – радиометр (рисунок 2.2), который измеряет амплитуду электромагнитного излучения, исходящего от элементов ландшафта на поверхности Земли, и формирует кодированную по величине и развернутую по строкам запись наземного объекта.

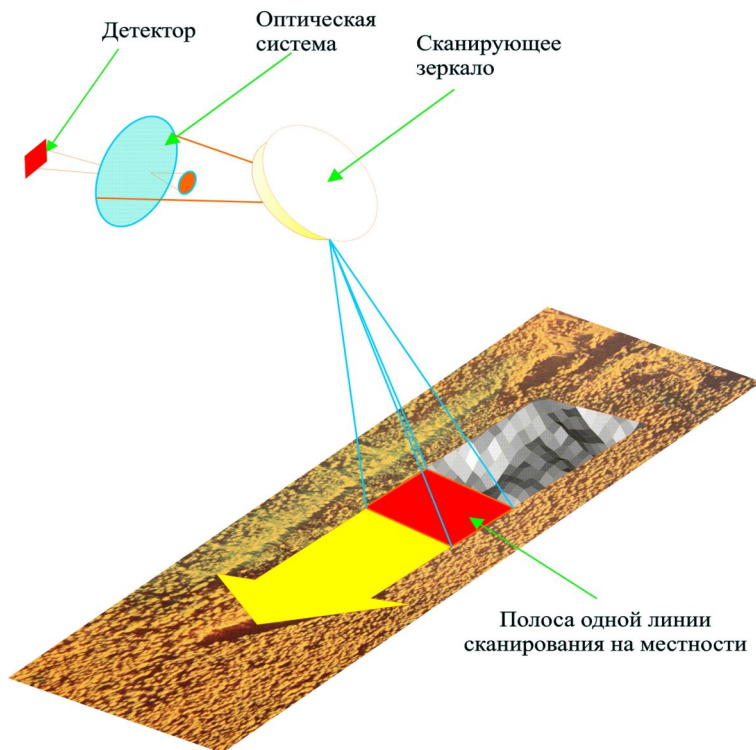


Рисунок 2.2 – Принцип работы оптико-механического сканера

Сканерные способы съемок считаются пассивными, так как в них используется естественное отраженное или вторичное тепловое излучение объектов, обусловленное солнечной радиацией. Оптико-механические сканеры физически вращают зеркала или объективы с целью охвата большего обзора поверхности земли (см. рисунок 2.2). При этом получаемый электрический сигнал имеет различную интенсивность в зависимости от яркости снимаемой поверхности.

Сенсоры, чувствительные к различным участкам электромагнитного спектра, используют фильтры для разделения электрического сигнала. Каждый из этих сигналов подразделяется на отдельные единицы, создающие дискретные величины, которые необходимы для цифрового анализа. Такое преобразование от постоянно варьирующего аналогового сигнала к дискретному цифровому выполняется при помощи дискретизации электрического сигнала через определенный интервал (аналого-цифровой) (рисунок 2.3). Трансформирование сигнала осуществляется при помощи аналого-цифрового преобразователя (АЦП). Цифровой сигнал в пределах преобразованного интервала представлен в виде усредненных значений, что приводит к погашению его варьирования в сравнении с аналоговым вариантом.

Вторым важным элементом сенсоров является прибор с зарядовой связью (ПЗС) (CCD – *англ.* charged couple device), которые изготавливаются из светочувствительных материалов, вставляемых в силиконовый чип (рисунок 2.4).

Светочувствительные компоненты ПЗС могут быть очень мелкими в размерах (до 1 микрона в диаметре) и быть восприимчивыми к видимой и ближней инфракрасной зонам спектра. Когда на ПЗС элементы поступает свет, они испускают электрический заряд, который переводится в бинарную информацию аналого-цифровым преобразователем сканера. Эти элементы

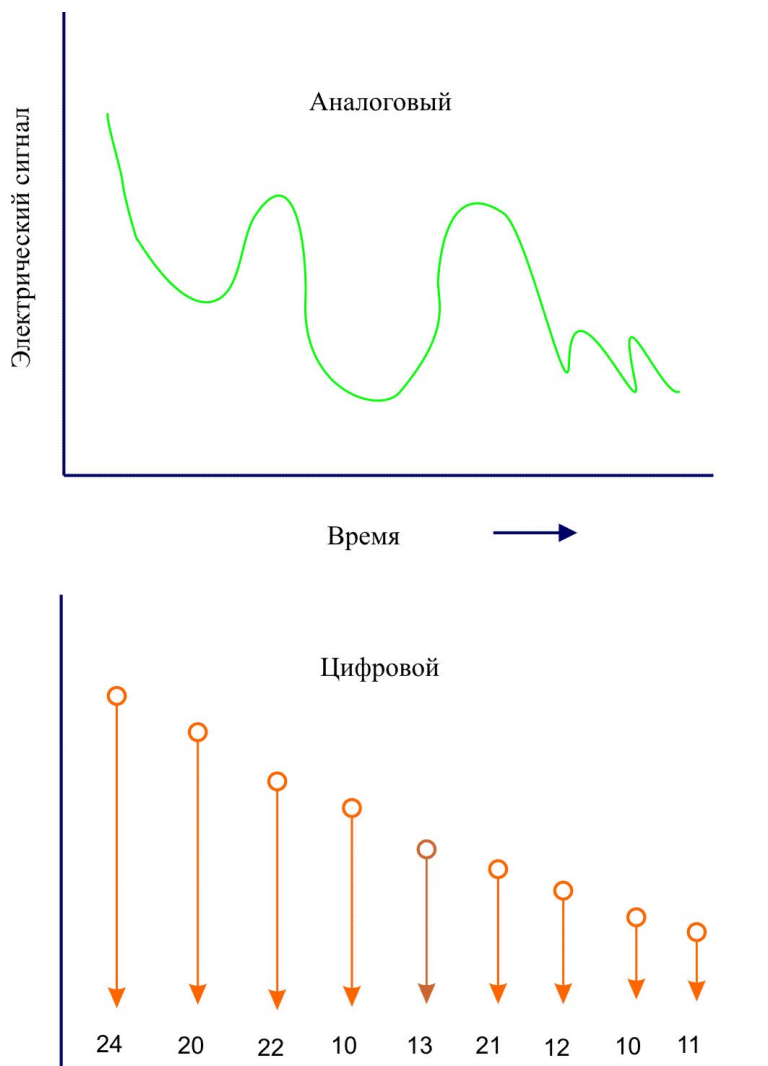


Рисунок 2.3 – Перевод аналогового сигнала в цифровой (Campbell, 2002)

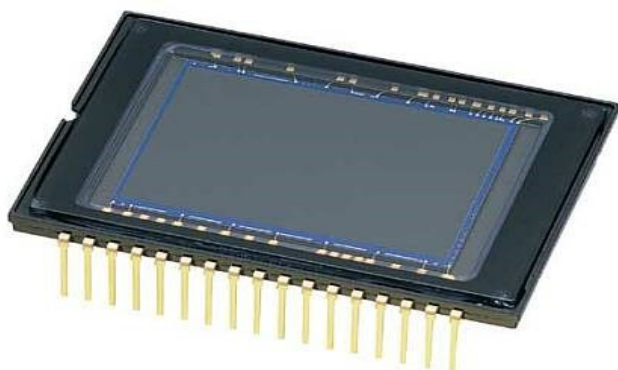
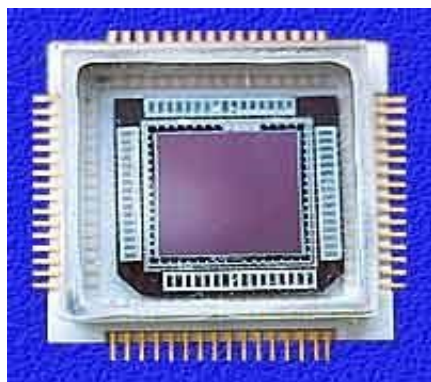


Рисунок 2.4 – Приборы с зарядовой связью

объединяются в одну общую микросхему и располагаются на поверхности полупроводниковой пластины в виде регулярного раstra (см. рисунок 2.1).

ПЗС может располагаться в фокальной плоскости сканера, что позволяет фиксировать узкую прямоугольную полосу местности, расположенную под прямым углом маршрута полета (рисунок 2.5). В таком случае в процессе полета будет последовательно снята полоса местности, фиксируемая сканером (Richards, 2012). Ширина каждой полосы захвата определяется

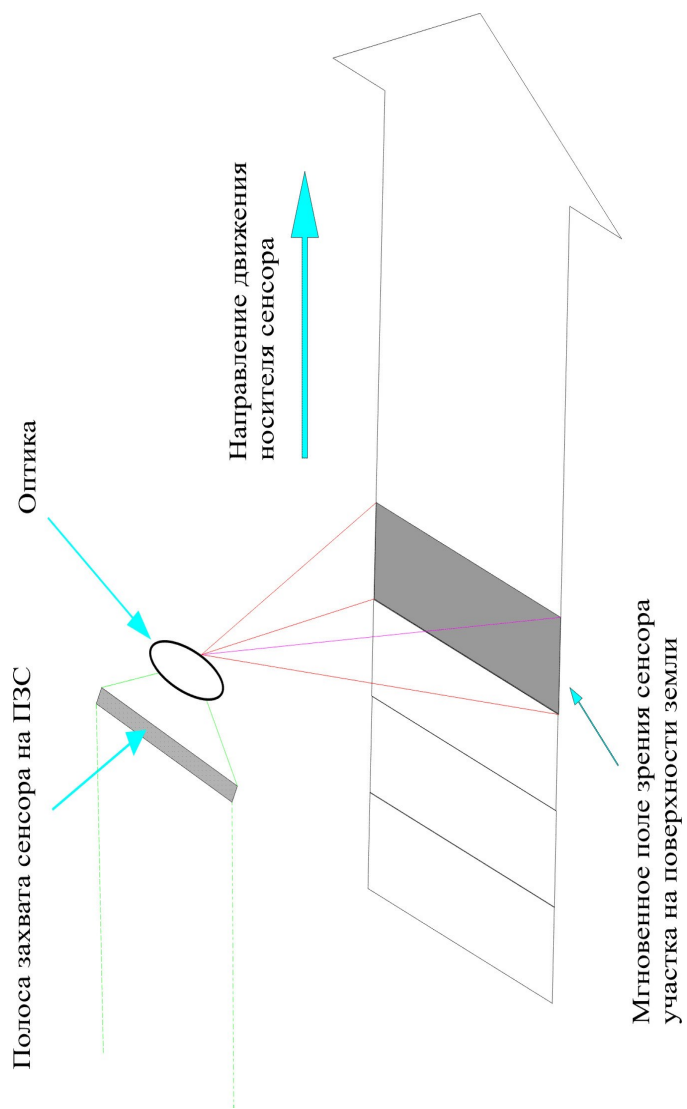


Рисунок 2.5 – Шлейфовое сканирование местности (pushbroom)

размером проекции ПЗС линейки, а длина формируется за счет орбитального движения спутника.

Такой режим съемки местности называется шлейфовое сканирование или «заметание» (*англ.* pushbroom или along-track). Сканирование поверхности Земли происходит с помощью одно-размерного *мгновенного поля зрения*, которое перемещается только в одном направлении, обычно – вдоль траектории носителя. Шлейфовое сканирование отличается от механического, при котором изображение формируется за счет вращения оптики сканера.

Мгновенное поле зрения (*англ.* IFOV – instantaneous field of view) – площадь, которую может фиксировать сканер в каждый момент времени. Соответственно этот показатель определяет наименьшую площадь на поверхности земли, регистрируемую сенсором, и устанавливает минимальный уровень пространственной детализации на цифровом изображении.

Каждый сенсор может иметь отклик, который не обязательно имеет отношение к яркости снимаемых предметов. Это явление называется цифровым шумом, оно вызывается скоплением электронных ошибок различных компонентов сенсора. На спутниковом снимке «шум» выглядит в виде случайных разноцветных пикселей на изображении в тех местах, где их быть не должно. Иначе говоря, шумом называются отклонения цветовых, яркостных характеристик пикселей от воспринимаемых ПЗС матрицей значений. Визуально «шум» воспринимается как зернистость, пятна, расплывчатость границ.

Для устранения этого недостатка приборы должны иметь уровень шума ниже, чем сам сигнал (яркость объекта), что обычно определяется соотношением сигнал/шум (SNR – *англ.* signal to noise ratio) (рисунки 2.6). Сигнал должен быть сильнее шума, чтобы коэффициент SNR мог быть высоким не только при фиксировании ярких объектов.

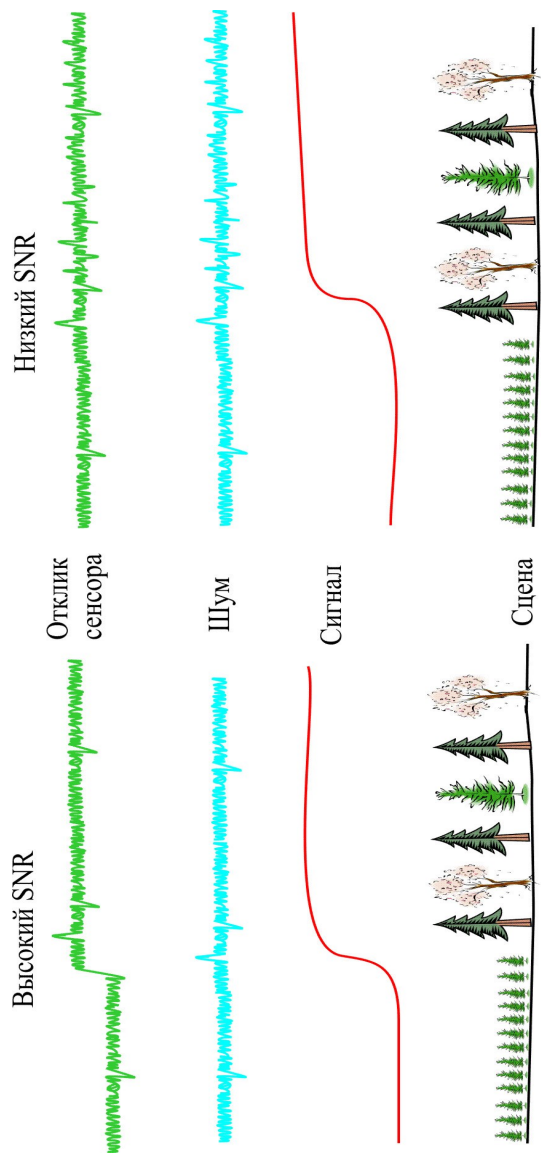


Рисунок 2.6 – Коэффициент сигнал/шум SNR. На нижней части рисунка представлены два участка растительности (спелый лес и молодняк). Сигнал регистрирует этот участок с небольшой разницей в яркости между этими двумя участками. Атмосферный эффект, ошибки сенсора и другие факторы вызывают шум, который добавляется к сигналу. Сенсор регистрирует комбинированный вариант сигнала и шума. Если уровень шума меньше сигнала (левая часть рисунка), сенсор выявляет различие между двумя участками леса. Если же сигнал слабее шума (правая часть), то сенсор не в состоянии выявить различие в яркости между этими двумя объектами (Campbell, 2008)

2.2. Разрешения изображений ДЗЗ

В ДЗЗ принято описывать спутниковые данные (изображения), обычно полученные в видимой и ближней инфракрасной зонах спектра, с точки зрения их пространственного, спектрального и радиометрического разрешения.

Пространственное разрешение характеризует минимальную линейную величину деталей или размер наименьших объектов местности, различимых на снимке. Под пространственным разрешением цифровых данных обычно понимают размер на местности одного пикселя. Спутниковые изображения варьируют по пространственному разрешению от низкого (1 км и более) до очень высокого (субметрового). В настоящее время самым лучшим считается пространственное разрешение 30 см (спутник WorldView-4). Это означает, что объект размером 30х30 см отобразится на снимке в виде одного пикселя (Совзонд. Обучение. Вопросы и ответы ...).

Пространственное разрешение является важным показателем в ДЗЗ, определяющим выбор спутниковых данных при решении различных задач в лесном хозяйстве и природопользовании. При разрешении 1х1 метр можно видеть крону каждого дерева, проводить лесотаксационные работы и выделять породный состав лесных насаждений на небольших площадях (десятки га) (рисунок 2.7). На этом уровне пространственного разрешения будет сложно выявить границы больших территорий (например, всего лесничества, лесов зеленой зоны, города). Для таких целей обычно используют разрешение 10 м и ниже (рисунок 2.8). При более широкомасштабных задачах или исследованиях (на уровне региона, области) лучше применять снимки с пространственным разрешением 250-500 м (рисунок 2.9). На континентальном или глобальном уровне более целесообразно использование изображений с пространственным разрешением 1-5 км.

а)



б)

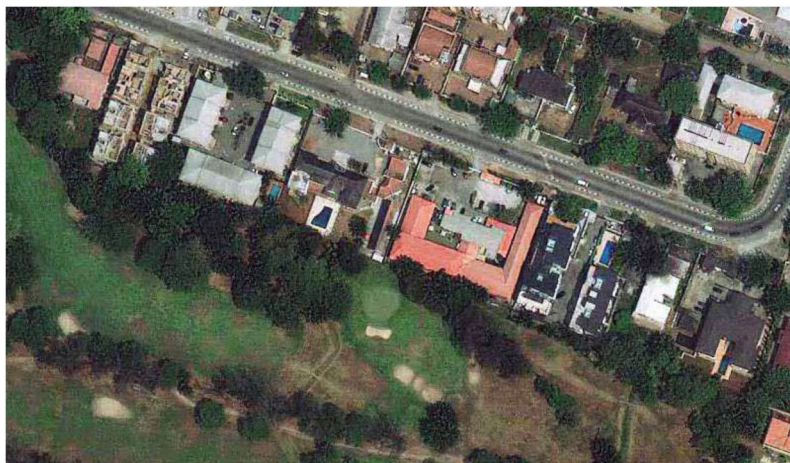
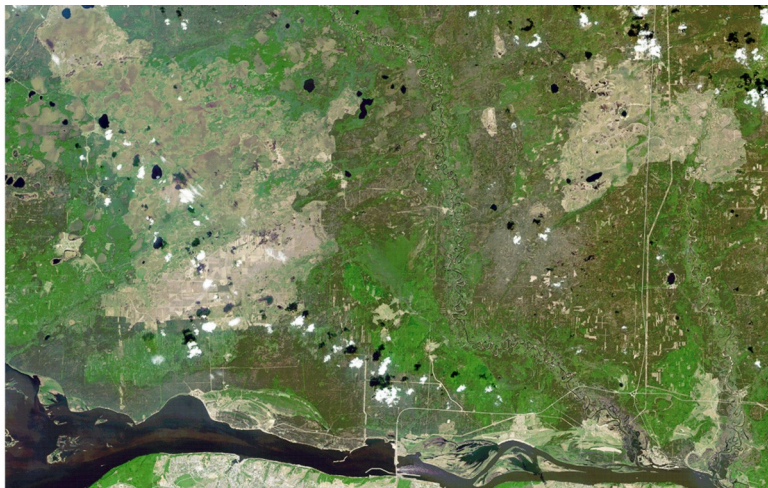


Рисунок 2.7 – Снимки высокого разрешения коммерческого спутника:
а) пригород Кульджа Синьцзян-Уйгурского автономного района КНР на
изображении WorldView-4 с разрешением 0,3 м (05.08.2017); б) район
города Лагос (Нигерия), WorldView-3 с разрешением 0,5 м (2.02.2017)

© DigitalGlobe Products. Satellite Imaging Corporation

<https://www.satimagingcorp.com>

а)



б)



Рисунок 2.8 – Мультиспектральное изображения лесных гарей 2010 года на территории Республики Марий Эл: а) снимок Landsat 8 OLI (NASA) с пространственным разрешением 30 м (04.06.2018); б) снимок Sentinel-2 (ESA) с пространственным разрешением 10 м (12.09.2018)

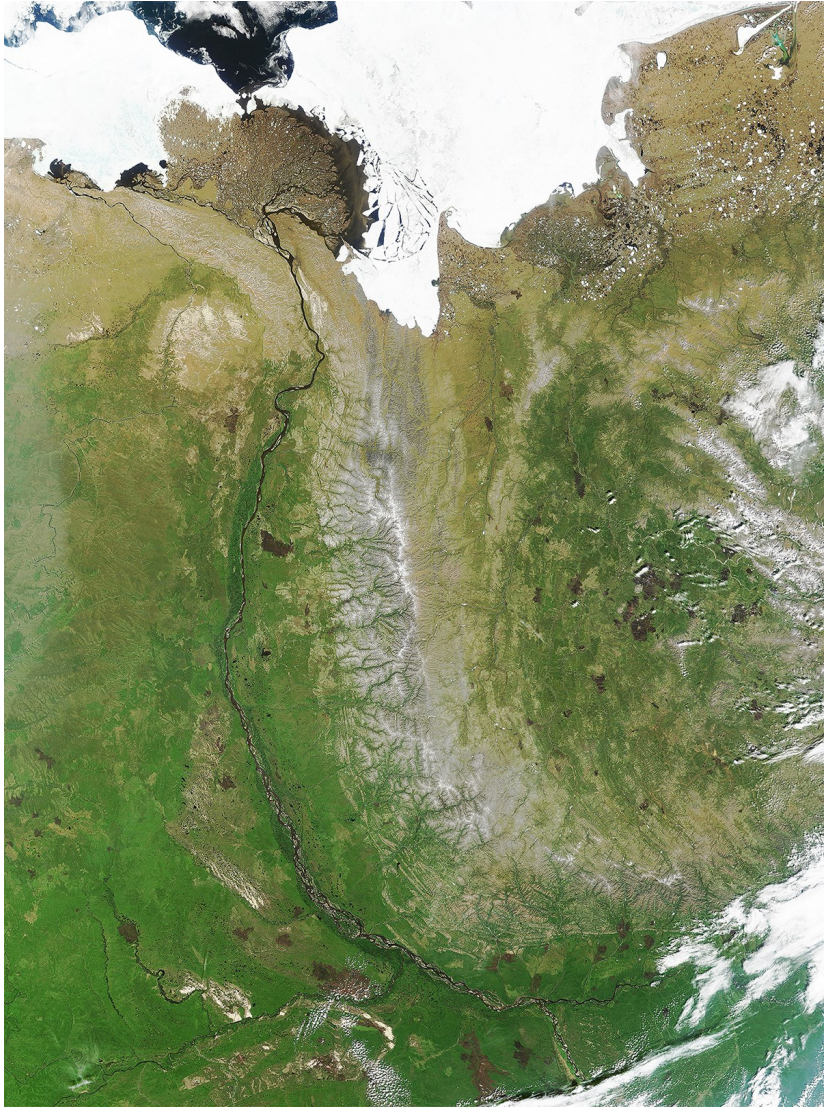


Рисунок 2.9 – Снимок спектрорадиометра MODIS с умеренным разрешением 250 м от 28 июня 2002 года. Изображен сибирский ландшафт вдоль реки Лены. Вверху лед все еще покрывает море Лаптевых (Visible Earth <https://visibleearth.nasa.gov>)

Радиометрическое (яркостное) разрешение или радиометрическая чувствительность определяется числом уровней яркости, регистрируемых приемником излучения (спутникового сенсора). Иными словами, под радиометрической разрешающей способностью понимается число градаций цвета, позволяющих различать больше деталей на очень ярких или очень темных областях изображения.

Радиометрическое разрешение относится к числу цифровых уровней квантования², используемых для выражения данных исследуемой поверхности, полученных сенсором (радиометром). Как правило, чем больше количество уровней квантования, тем выше детализация информации (рисунок 2.10). Иначе говоря, чем выше количество градаций цвета, тем больше деталей исследуемой местности можно различить на цифровом снимке (Сухих, 2005).

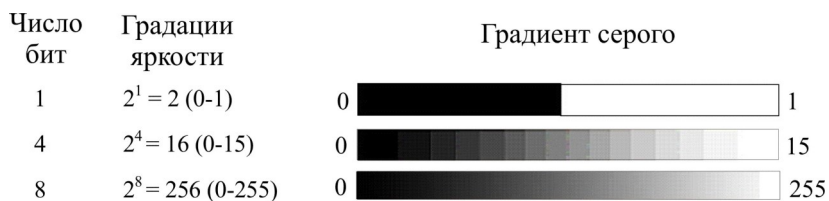


Рисунок 2.10 – Соотношение бит информации как показатель радиометрического разрешения и градаций яркости изображения. Чем больше битов имеет изображение изучаемой поверхности, тем больше градиентов серого цвета фиксируется сенсором

В ПЗС современного цифрового сканера, установленного на спутниках, используется двоичная система исчисления, в которой любое число можно представить в виде единиц и нулей.

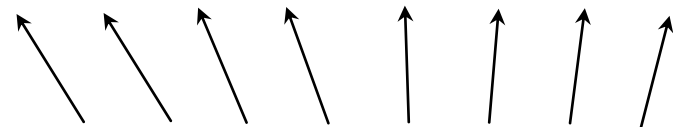
² Квантование (*англ.* quantization) - в информатике разбиение диапазона значений непрерывной или дискретной величины на конечное число интервалов.

Двоичная система исчисления представляет собой произведение коэффициента (единицы либо нуля) на двойку в степени от нуля до $n-1$, где n – разрядность ПЗС.

Например, рассмотрим 8-битную систему записи для нескольких значений цифровой информации. В этом случае возможны 8 бинарных вариантов для фиксирования яркости каждого канала сенсора. Значение 1 предполагает, что определенная степень от 2, расположенная последовательно в бинарном ряду, является значимой, а 0 показывает нулевое значение этой позиции. Их еще называют логическая единица и ноль (1 и 0), да и нет, true и false и т.д. Таким образом, 8-битовое бинарное число «11111111» выражается как $2^7 + 2^6 + 2^5 + 2^4 + 2^3 + 2^2 + 2^1 + 2^0 = 128 + 64 + 32 + 16 + 8 + 4 + 2 + 1 = 255$.

Рассмотрим, как регистрируются конкретные цифры, формирующих изображение, в двоичной системе. Например, число 41 будет выглядеть следующим образом. Происходит сложение значений активных ячеек, в которых стоит единица. Таким образом: $41 = 32 + 8 + 1$.

2^7	2^6	2^5	2^4	2^3	2^2	2^1	2^0
128	64	32	16	8	4	2	1
0	0	1	0	1	0	0	1



$$41 = 0 \cdot 2^7 + 0 \cdot 2^6 + 1 \cdot 2^5 + 0 \cdot 2^4 + 1 \cdot 2^3 + 0 \cdot 2^2 + 0 \cdot 2^1 + 1 \cdot 2^0$$

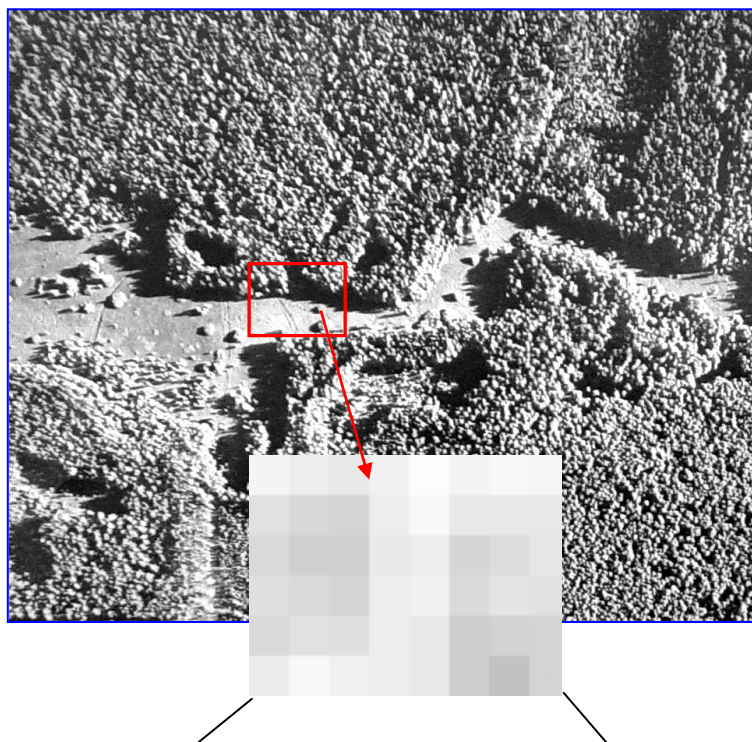
Ниже приведены значения в бинарной и десятичной системах исчисления:

Десятичная система	Двоичная система
0	00000000
1	00000001
2	00000010
3	00000011
4	00000100
5	00000101
6	00000110
7	00000111
8	00001000
.....	
255	11111111

Восемь бит составляют байт, который хранит одну единицу информации. Большие объемы информации измеряются в разных величинах: килобайтах (Кб) – 1024 (210) байт; мегабайтах (Мб) – 1048576 (220) байт; гигабайтах (Гб) – 1073741824 (230) байт и т.д.

В настоящее время используются спутниковые сенсоры, регистрирующие 64, 256, 1024 и 4096 градаций уровней яркости изображения. Большинство современных сенсоров обладает радиометрическим разрешением 12 бит и выше (MODIS, Sentinel-2, Landsat, Канопус-В), что позволяет различать от 0 до 4096 градаций яркости изучаемой поверхности.

На рисунке 2.11 показано цифровое растровое изображение светлого участка прогалины леса, которому соответствует секция массива чисел (значения пикселей), отвечающих за часть рисунка, выделенную прямоугольником.



222	158	160	151	236	189	204	189
164	124	111	191	236	111	109	88
142	86	74	167	141	64	84	154
104	124	86	136	189	84	99	115
149	127	145	189	167	94	76	88
114	229	160	161	147	93	24	69

Рисунок 2.11 – Цифровое изображение прогаины леса, показывающее соотношение между серыми уровнями пикселя, образующими изображение, и цифровым распределением пикселей серого уровня

Рисунок 2.11 является черно-белым, для него требуется только один массив данных пикселей, каждый из которых может иметь один из 256 уровней яркости – от 0 (черный) через 127 (средне-серый) до 255 (белый). Изображение по серой шкале может иметь только один компонент – различную градацию (оттенки) серого цвета. В то же время цветное изображение имеет три составляющих компонента в виде основных цветов света (красный, зеленый и синий, в дальнейшем RGB – *англ.* Red, Green, Blue) в каждом пикселе (рисунок 2.12). Значения от 0 до 255 представляют диапазон каждого основного цвета – от 0 (черного) до 255 (максимальной интенсивности RGB). Различные комбинации RGB образуют цвета спектра.

Оттенки цветов
в графической памяти
устройства

RGB

Цифровой снимок

120	131	176	168
211	142	182	201
164	175	182	146
124	155	113	81

Красный

69	85	86	116
58	64	56	118
24	36	48	88
36	42	55	43

Зеленый

46	28	29	64
37	66	46	94
18	23	28	75
29	42	58	114

Синий



Рисунок 2.12 – Цветное изображение на экране монитора получается при помощи трех цветов, находящихся в памяти графической карты компьютера. Эти цвета состоят из различных цифр оттенков красного, зеленого и синего. Каждая цветовая гамма имеет диапазон от 0 (черный) до 256 (яркий цвет)

показать одинаковую чувствительность по всему диапазону зеленого, но покажут высокую чувствительность около центра зеленого участка с ее понижением к красному и синему участкам спектра (рисунок 2.14). Это ограничивает спектральную чувствительность сенсоров, которые фактически способны регистрировать меньший участок спектральной области длины электромагнитной волны.

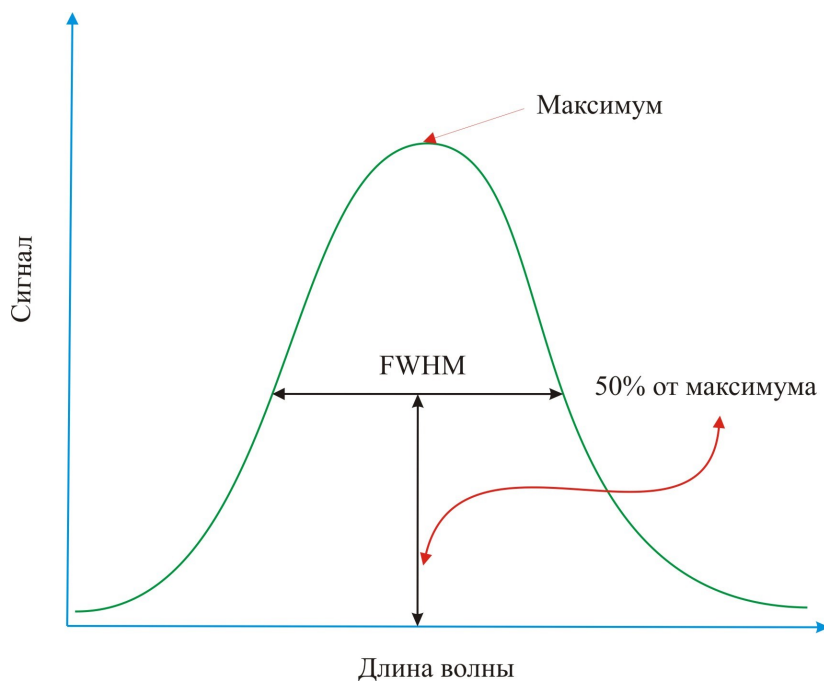


Рисунок 2.14 – FWHM – ширина частотного спектра на уровне 50% амплитуды (Campbell, 2008)

Поэтому спектральная чувствительность сенсоров обычно характеризуется таким показателем, как полная ширина на уровне половинной амплитуды (FWHM – *англ.* full width at half

maximum) – спектральный интервал, измеренный на уровне, при котором отклик сенсора достигает половины от ее максимального значения или ширина частотного спектра на уровне 50% амплитуды (см. рисунок 2.14). Соответственно FWHM определяет спектральное разрешение как самый узкий спектральный интервал, регистрируемый прибором.

Еще одним важным свойством систем дистанционного зондирования является его *временное разрешение* – время между последовательными датами получения изображений для данной точки на наземной поверхности. Периодичность повторной съемки может быть измерена в минутах, если спутник фактически неподвижен относительно фиксированной точки на поверхности Земли (геостационарная орбита), или в днях (неделях), если орбита спутника находится относительно поверхности Земли. Спутники Landsat, Terra, Aqua, Sentinel, Канопус или Spot располагаются на солнечносинхронных (полярных) орбитах, что определяет временное разрешение в днях и неделях.

Временное разрешение полярно-орбитального спутника определяется выбором параметров его орбиты (таких как высота орбиты, ее форма и наклон), которые непосредственно связаны с конкретной миссией спутника. Кроме того, на временное разрешение влияет ширина полосы захвата (*англ.* swath width) сенсора спутника на поверхности Земли. Сенсоры спутниковой системы Landsat имеют ширину захвата 185 км, в то время как у сенсора MODIS эта величина может достигать 2330 км (MODIS. Specifications...).

MODIS установлен на борту спутников Terra и Aqua. Орбита спутника Terra вокруг Земли рассчитана таким образом, что утром он проходит с севера на юг через экватор, а днем Aqua проходит с юга на север также через экватор. В связи с этим временное разрешение Terra MODIS и Aqua MODIS составляет каждые 1-2 дня.

2.3. Форматы данных ДЗЗ

Одной из проблем, которую человечество не может решить или просто признать, является стандартизация. Например, левостороннее движение автомобильного транспорта в Великобритании, Ирландии, Японии и ЮАР отличается от всего остального мира, который предпочитает ездить по правосторонним правилам (Mather, Magaly, 2010). Метрическая система стандартов также различается по странам: в США жидкие и сыпучие продукты принято считать галлонами, а в Европе и России – в литрах; электрическое напряжение в бытовой сети в США составляет от 110 вольт, в то время как в большинстве других стран мира эта мера равна 220-240 вольт. Поэтому не удивительно, что форматы хранения данных ДЗЗ также разнятся в зависимости от их поставщиков.

Известно, что ДЗЗ базируется на способности наземных объектов отражать, поглощать или излучать электромагнитные волны в различных диапазонах спектра. Каждому диапазону длин волн соответствует отдельный набор данных на изображении, который называется каналом (*англ.* Band). Само цифровое изображение состоит из тысяч пикселей (от *англ.* Picture element), которые индивидуально не могут быть распознаны человеческим глазом. Для каждого пикселя такого дистанционного изображения электромагнитные измерения (волны) сохраняются в виде цифровых чисел или значений DN (от *англ.* Digital numbers).

Формат растровых данных является удобным при обработке пиксельных изображений, что позволяет быстро найти необходимый пиксель и определить его значение. Среди недостатков следует отметить то, что растровые изображения плохо масштабируются и имеют большие размеры. Альтернативой растровым данным является векторный формат, который формирует изображение на основе простых объектов — прямых линий,

дуг, окружностей, эллипсов, прямоугольников, областей одно-тонного или изменяющегося цвета (заполнителей). Тем не менее, векторный формат обычно не используется при анализе цифровых данных ДЗЗ. Почти все программные продукты по обработке цифровых данных космической съемки за основу принимают растровый формат.

Изображения ДЗЗ обычно формируются в соответствии с одним из трех альтернативных вариантов хранения цифровых данных. Предположим, что изображение состоит из четырех спектральных каналов, которые вместе могут быть отображены в виде наложенных друг на друга образов. При этом соответствующие пиксели, принадлежащие одному спектральному каналу, могут регистрироваться такими же пикселями в других каналах (Campbell, Wynne, 2011).

Одним из первых вариантов *форматов цифровой информации* был ***BIP*** (англ. Band Interleaved by Pixel) – канал с чередованием пикселей. Данные такого многоканального раstra организованы в порядке, при котором последовательно записываются значения первого пикселя всех каналов, затем данные всех каналов пикселя второго столбца и т.д. (рисунок 2.15).

Каждый пиксель, расположенный в совокупности данных формата BIP, имеет те же самые значения, записанные в порядке очередности, во всех четырех каналах. В связи с этим такой формат не совсем удобен в использовании, потому что требует дополнительной работы по сортировке данных и каналов в соответствующих изображениях.

Тем не менее, организация цифровых данных в формате BIP позволяет обрабатывать любое количество спектральных каналов спутниковых изображений, что дает возможность аналитику (дешифровщику) работать с данными черного и белого цветов, градациями серого, псевдоцветов, а также в реальных цветах мультиспектрального снимка.

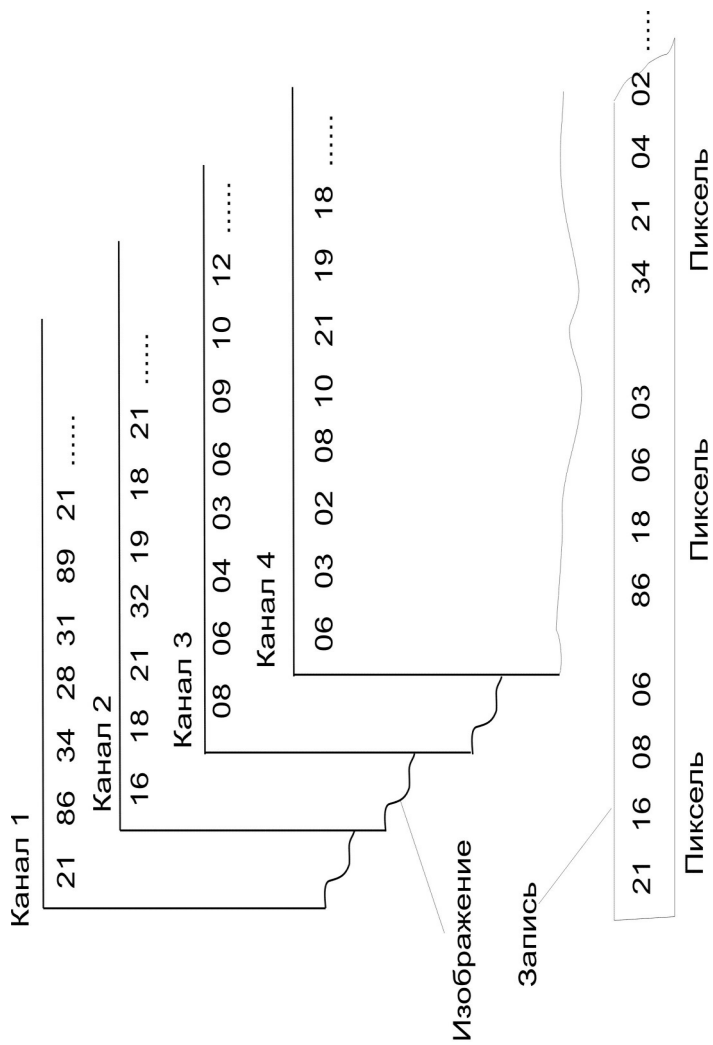


Рисунок 2.15 – Формат растрового изображения BIP

Формат BIL (англ. Band Interleaved by Line – каналы, последовательно перемежающиеся по строкам) организует каждую строку данных в виде отдельного объекта (рисунок 2.16). В этом случае происходит построчное хранение цифровых данных изображения: строка 1 для 1 канала, строка 1 для 2 канала, строка 1 для 3 канала, строка 1 для 4 канала; и далее – строка 2 для 1 канала, строка 2 для 2 канала и т.д. Каждая строка данных представлена во всех четырех спектральных каналах до стыковки со следующим рядом.

Третьим способом цифровой записи данных ДЗЗ является **формат последовательных каналов BSQ** (англ. Band Sequential). При такой поканальной записи данные спектрального канала 1 последовательно записываются в первую очередь, затем записываются все пиксели канала 2 и т.д. Каждый канал обрабатывается как отдельный объект (рисунок 2.17). В большинстве приложений по работе с изображениями формат записи BSQ является наиболее используемым, потому что он наиболее адекватно отражает структуру данных, выводимую на мониторы для анализа спутниковых данных. Тем не менее, если исследуемая площадь природного объекта меньше, чем вся сцена изображения, то аналитик (дешифровщик) должен рассмотреть все четыре спектральных канала, чтобы в конечном итоге определить и выделить требуемую рабочую площадь.

Примеры различий в построении цифрового изображения ДЗЗ форматами записи BIP, BIL и BSQ с использованием цветовой модели RGB показаны в таблице 2.1.

Основные форматы записи данных, используемые в настоящее время, обычно являются производными от трех вышеописанных. Точная характеристика формата обычно специфична для каждой организации (компании) и вида цифровых данных. Поэтому исследователь при получении изображения ДЗЗ должен также внимательно ознакомиться с их форматом.

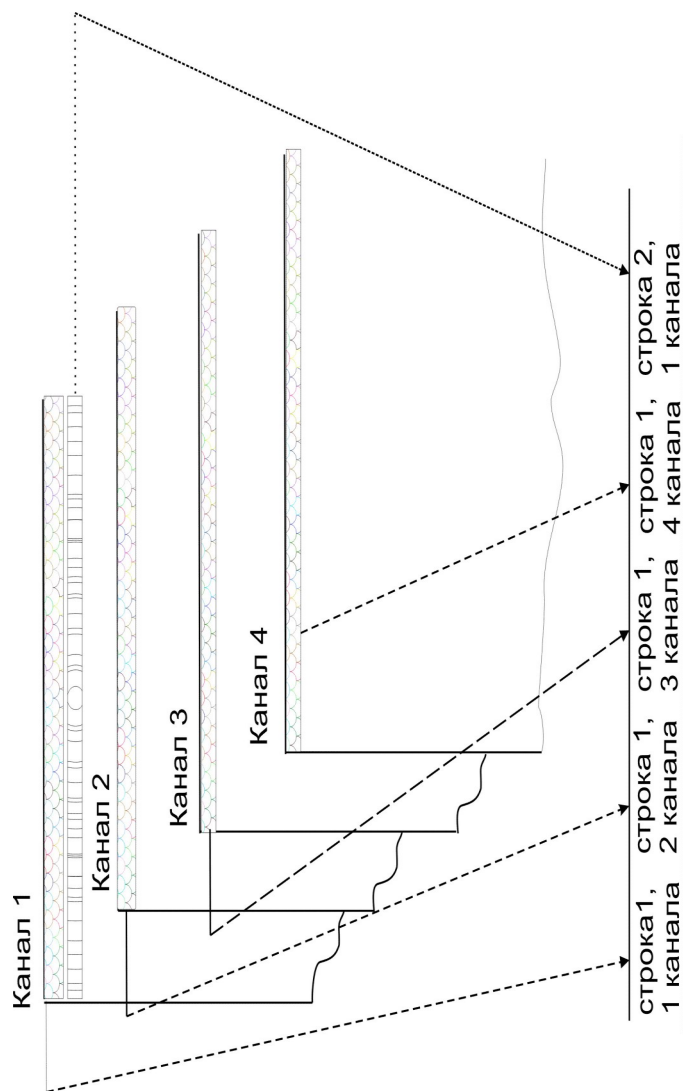


Рисунок 2.16 – Формат растрового изображения ВР

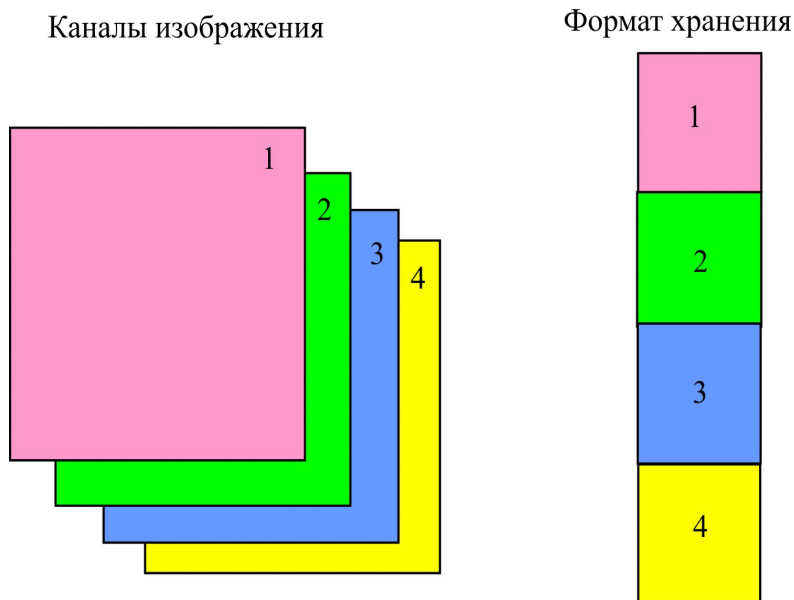


Рисунок 2.17 – Формат растрового изображения BSQ

Таблица 2.1 – Форматы данных ДЗЗ в цветовой модели RGB, растровая решетка которого состоит из 5 пикселей в ряду и 3 пикселей в столбце

BIL	BIP	BSQ
RRRRR G G G G G BBBBB RRRRR G G G G G BBBBB RRRRR G G G G G BBBBB	R G B R G B R G B R G B R G B R G B R G B R G B R G B R G B R G B R G B R G B R G B R G B	RRRRR RRRRR RRRRR G G G G G G G G G G G G G G G BBBBB BBBBB BBBBB

Использование того или иного формата записи данных дистанционного зондирования зависит от непосредственной цели работы и зачастую от используемой компьютерной программы и оборудования. Если будут использоваться все спектральные каналы спутникового изображения ДЗЗ, тогда наиболее полезными будут форматы записи BSQ и BIL. Если аналитик (дешифровщик) заранее знает точное расположение рабочей площади сцены местности, то в этом случае применяется формат записи BIP, потому что значения пикселей для всех спектральных каналов находятся вместе и нет необходимости в поиске отдельного участка (объекта) среди всего массива значений. В конечном итоге дешифровщик должен быть готов работать с изображением ДЗЗ в том формате, в котором оно получено, или перевести его в тот, который ему более удобен для выполнения работ.

Все перечисленные форматы записи содержат набор цифровых данных, представляющих собой метаданные и непосредственно формирующие изображения ДЗЗ. Метаданные содержат числовые и текстовые описания спутниковых снимков (количество сканируемых строк и пикселей на каждую строку, картографическую проекцию, широту и долготу центра и краев изображения, калибровочные сведения, размеры снимка, азимут и зенитный угол и т.п.).

В настоящее время на рынке услуг дистанционного зондирования существуют несколько видов форматов спутниковых изображений: универсальные, метаданные и пользовательские. Универсальные форматы изображений широко используются в обработке геопространственных данных дистанционного зондирования Земли в различных компьютерных программах, в то время как пользовательские форматы могут использоваться только отдельными компаниями или специализированными организациями.

Например, французская компания SPOT image представляет информацию в патентованном формате «CAP», называемом именем центра компании (*франц.* Centre d'Archivage et de Pre-traitement). Изображения с американской спутниковой системы Landsat можно получить в любом формате GeoTIFF (*англ.* Tagged Image File Format) (общий), HDF (*англ.* Hierarchical Data Format) (патентный) или Fast Landsat 7A (патентный). Несмотря на то, что комитет по спутникам изучения Земли CEOS (*англ.* Committee on Earth Observation Satellites) прилагает все усилия к выработке общих стандартов форматов сохранения информации в современных условиях, данные других компаний, работающих на рынке услуг ДЗЗ, также имеют целый ряд форматов.

Следует отметить, что национальное американское аэрокосмическое управление NASA (*англ.* National Aeronautics and Space Administration) по долгосрочной программе «Система изучения Земли» EOS (*англ.* Earth Observing System) приняла формат данных HDF, который позволяет хранить данные заголовков и изображений ДЗЗ в одном файле. Примером также могут служить данные японского сенсора ASTER, установленного на спутнике Terra, который сохраняет метаданные и изображения в формате HDF.

Производители программ по обработке изображений дистанционного зондирования также определяют свои «внутренние» (корпоративные) форматы данных. Система обработки изображений ENVI (*англ.* Environment for Visualizing Images) требует два файла на каждую базу данных изображений. Первый файл метаданных имеет расширение «.hdr», в то время как данные изображения хранятся в отдельных файлах в формате с расширением «.bsq» или формате с расширением «.bil». ENVI распознает данные изображений во внешних форматах, например, таких как CAP или GeoTIFF, и конвертирует их во внутренний формат самой программы.

2.4. Программы по обработке ДЗЗ

Данные ДЗЗ обычно анализируют при помощи комплексных программ цифровой обработки изображений, которые переводят информацию, содержащуюся в их пикселях, в количественные и качественные характеристики, описывающие конкретные объекты на местности. Несмотря на то, что такие программы цифровой обработки данных широко варьируют в зависимости от поставленных задач и способов обработки геопространственных данных, можно выделить основные компоненты, содержащиеся в большинстве из них.

Часть такой системы, разработанной для распознавания данных дистанционного зондирования, реорганизует их в формат самой программы. Например, многие программы работают с форматом BSQ. Поэтому первым шагом в работе таких пакетов является чтение форматов BIL и VIP с последующим переформатированием их в формат BSQ, который требуется для работы аналитических компонентов системы программы. Другая часть системы позволяет дешифровщику (аналитику) разделить изображение ДЗЗ на составные части, чтобы после соответствующей обработки их можно было наложить, объединить или создать мозаику.

Основным элементом системы цифровой обработки изображений является блок программ, которые детально анализируют, классифицируют, визуализируют и управляют геопространственными данными ДЗЗ, а также другой атрибутивной статистической информацией. Наконец, часть программы цифровой обработки отвечает за вывод данных ДЗЗ (изображения или метаданных) на дисплей или на принтер пользователя. Кроме того, программы имеют подпрограммы по учету потока и регистрации файлов из одной части программы в другую, а также для регистрации ошибок и оперативной помощи дешифровщику (аналитику).

Большинство программ цифровой обработки геопространственных данных ДЗЗ поддерживают периферийное оборудование, а также позволяют подключать дополнительные устройства памяти, сканеры, плоттеры, цветные принтеры и т.п. Почти все такие системы имеют подробное меню и графический интерфейс пользователя, позволяющий аналитику (дешифровщику) оперативно выбирать различные опции из листа возможных на экране.

Наиболее используемые современные комплексные программы по обработке спутниковых изображений в России и за рубежом: ERDAS Imagine, ENVI, ER Mapper, EASI/PACE, ARC GIS, IDRISI, ScanEX и другие. В данном учебном пособии подробно рассматриваются примеры обработки изображений ДЗЗ в программе ENVI, поэтому остановимся на ее описании более подробно .

Комплексная программа ENVI версии № 5 с интерактивным языком программирования (IDL) является развитой системой обработки, которая может анализировать и визуализировать данные дистанционного зондирования (L3Harris Geospatial...) (рисунок 2.18). Этот программный пакет поддерживает большое число растровых форматов ДЗЗ данных, включая ERDAS, SPOT, RadarSat, Windows bmp и другие. Используя возможности интерактивного языка IDL, пользователь легко может ввести в программу ENVI функции экспорта и импорта любых данных .

Основная цель ENVI – обеспечить специалистов в области ДДЗ наилучшими возможностями именно в области обработки изображений, а не ГИС. Философия компании состоит в том, что ENVI является комплексным пакетом для обработки изображений, дополняющим существующие ГИС, но ни в коем случае не устранившим их из процесса обработки. Пакет поддерживает большое число картографических проекций и координат.

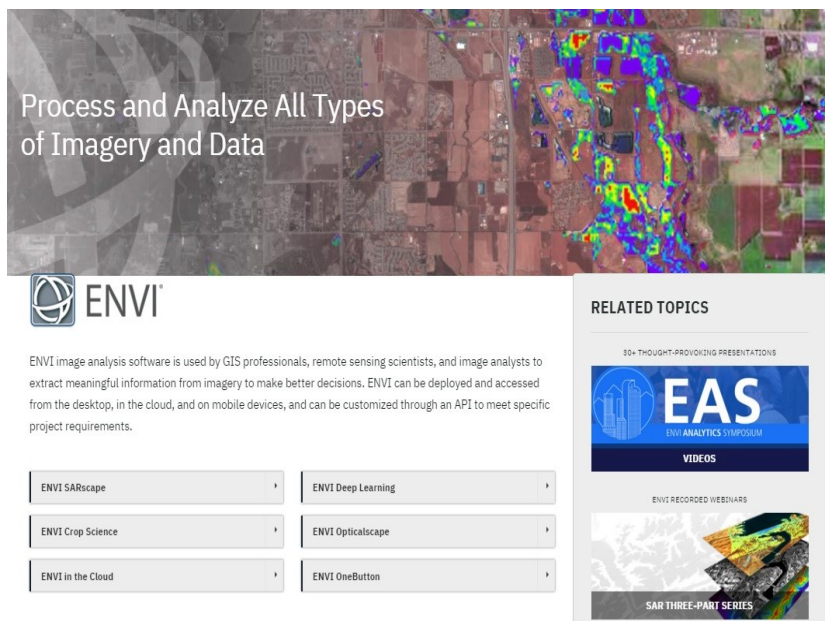


Рисунок 2.18 – Сайт программы ENVI

натных систем, в том числе широко используемую в России проекцию Гаусса-Крюгера. Основные преимущества ENVI являются при работе с многоспектральными и радиолокационными данными.

ENVI использует обобщенный формат растровых данных, состоящий из простого двоичного файла и текстового файла сопровождения ASCII-заголовка³. Этот формат файла позволяет ENVI использовать практически любой файл изображения, включая те, которые содержат собственную информацию в виде

³ ASCII – *англ.* American Standard Code for Information Interchange, американский стандартный семиразрядный код, обеспечивающий 128 различных битовых комбинаций для обмена информацией и используемый в большинстве вычислительных систем.

встроенного заголовка. Обобщенные растровые данные могут храниться в виде двоичного потока байтов в формате BSQ, BIP или BIL.

В настоящем учебном пособии приведено подробное описание работы с данными дистанционного зондирования (спутниковыми изображениями) в программе ENVI 5. Главное дисплейное меню и многочисленные диалоговые окна для классического варианта комплексной программы ENVI 5 отображается на мониторе компьютера в виде командной строки, на которой приведены все основные команды и функционал, позволяющие загружать и обрабатывать различные изображения ДЗЗ (рисунок 2.19).

В ENVI 5 удобно проводить синтез мультиспектральных изображений, комбинируя разные каналы, что особенно важно для интерпретации изображений растительного (лесного) покрова. В зависимости от уровня и качества используемой системы сканирования, синтез изображений может варьировать от простого подбора спектральных каналов до использования сложных процедур их комбинаций.

В таблице 2.2 приведены различные комбинации спектральных каналов спутника Landsat, позволяющие исследовать и проводить оценки растительности (Quinn, 2001; L3Harris Geospatial. Landsat...). Например, сочетание спектральных каналов видимого диапазона спутникового изображения Landsat 8 в последовательности 4 – 3 – 2 формирует изображение в так называемых «естественных цветах». В этой комбинации объекты земной поверхности выглядят на изображении так, как они воспринимаются человеческим глазом. Растительный покров (ненарушенный) на спутниковом изображении в такой комбинации каналов выглядит зеленым цветом: нездоровая (нарушенная) растительность – коричневым и желтым; дороги отображаются в серых тонах, а побережье – белым.

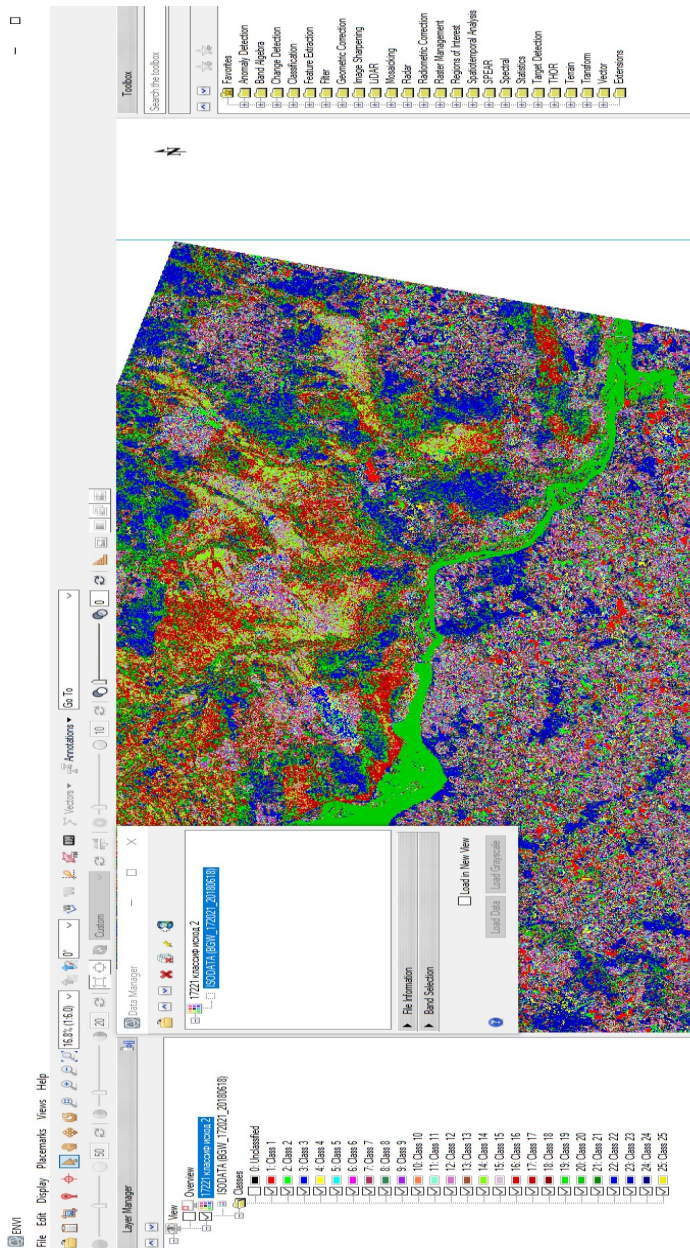


Рисунок 2.19 – Интерфейс ENVI 5

Таблица 2.2 – Комбинации спектральных каналов системы Landsat, используемые для оценки растительного покрова

Landsat 5,7	Landsat 8	Описание получаемой информации
4,3,2	5,4,3	Стандартная комбинация «ложные цвета». Растительность отображается в оттенках красного, городская застройка – в голубых, а почвы варьируются от темных до светло-коричневых цветов. Хвойные деревья будут выглядеть более темно-красными в сравнении с твердолиственными породами.
3,2,1	4,3,2	Комбинация «естественные цвета». В этой комбинации используются каналы видимого спектрального диапазона, поэтому объекты земной поверхности выглядят так, как они воспринимаются человеческим глазом. Растительный покров (нечтественный) отображается зеленым цветом: нездоровая (нарушенная) растительность – коричневым и желтым; дороги – в серых тонах; побережье – белым.
7,4,2	7,5,3	Эта комбинация дает изображение, близкое к естественным цветам, но в то же время позволяет анализировать состояние атмосферы и дымки. Здоровая растительность будет ярко-зеленой и может насыщаться в периоды сильного роста, луга станут зелеными, розовые участки - бесплодная почва. Сухая растительность будет оранжевой, а вода – синей.
4,5,3	5,6,4	Эта комбинация ближнего, среднего ИК-каналов и красного видимого канала позволяет четко различить границу между водой и сушей и подчеркнуть скрытые детали, плохо видимые при использовании только каналов видимого диапазона. Комбинация 4,5,3 демонстрирует различия во влажности и будет полезна для анализа состояния
7,5,3	7,6,4	Эта комбинация дает изображение, близкое к естественным цветам, но в то же время позволяет анализировать состояние атмосферы и дымки.
5,4,3	6,5,4	Комбинация дает дешифровщику важную информацию о цветовых контрастах. Здоровая растительность выглядит ярко-зеленой, а почвы – розовато-лиловыми.

|| Контрольные вопросы по разделу 2

1. Расскажите о принципе формирования и структуре цифрового изображения. Какими приборами ДЗЗ получают такие изображения? Каковы их принципиальные компоненты?
2. Рассмотрите пошаговый алгоритм чтения данных в формате VIP, после чего переведите их в последовательность формата данных BSQ.
3. Опишите основной принцип получения изображения местности сканерами, установленными на спутниковых системах.
4. В чем разница между шлейфовым и механическим сканированием поверхности Земли оптическими сенсорами?
5. Что такое SNR и как этот показатель влияет на качество получаемого изображения растительного покрова?
6. Приведите примеры успешного применения спутниковых данных высокого пространственного разрешения в лесном хозяйстве, экологии или природопользовании. Каковы недостатки и преимущества таких изображений по сравнению с данными более низкого пространственного разрешения?
7. Опишите возможности спутниковых изображений для определения и описания следующих объектов наземного покрова в зависимости от пространственного, спектрального и радиометрического разрешений:
 - а) отдельно стоящее дерево;
 - б) выдел насаждения;
 - в) русло реки;
 - г) озеро или пруд;
 - д) полигон твердых бытовых отходов;
 - е) городская застройка;
 - ж) лесные гари.

8. Объясните, почему природные наземные объекты могут быть выявлены на спутниковых изображениях в соответствующих диапазонах электромагнитного спектра и слабо различимы в других его зонах.
9. Какое пространственное и спектральное разрешение используется на современных сенсорах в мультиспектральном и панхроматическом диапазонах?
10. Назовите и опишите форматы данных, используемых разными аэрокосмическими агентствами и компаниями по обработке спутниковых изображений.
11. Как временное разрешение спутниковых систем может влиять на использование их изображений в лесном хозяйстве и природопользовании?
12. Какое радиометрическое разрешение используется на современных спутниковых сенсорах, предназначенных для исследования природных объектов на поверхности Земли? Приведите примеры спутников.

3 || ПРЕДВАРИТЕЛЬНАЯ ОБРАБОТКА ИЗОБРАЖЕНИЙ ДЗЗ

Перед использованием спутниковых снимков с ними необходимо провести предварительную работу. На рисунке 3.1 представлен алгоритм действий для типичного цифрового анализа, которого придерживаются профессиональные аналитики.



Рисунок 3.1 – Схема анализа цифровых изображений

Предварительная обработка цифровых данных состоит из операций по подготовке изображений к соответствующему анализу. Обычно этот этап работы с изображением направлен на коррекцию систематических ошибок. Предварительная обработка изображений включает порядок действий, которые преобразуют исходные данные ДЗЗ в определенные продукты стандартных уровней обработки, которые можно будет использовать в дальнейшей работе.

Основная задача предварительной обработки заключается в улучшении качества исходных данных, устранении имеющихся дефектов, вызванных влиянием атмосферы, положением солнца и т.п. Зная природу этих явлений, можно выявить степень их влияния, затем устранить или минимизировать их воздействие на используемые данные. Предварительная обработка изображений также включает в себя географическую привязку, радиометрическую и геометрическую коррекцию изображений, калибровку и т.п.

Следует отметить, что хотя некоторые методы предварительной обработки широко используются при работе с дистанционными изображениями, на практике не существует точного перечня «стандартных» приемов таких действий, потому что каждый их вид требует индивидуального подхода и принятия решения самим дешифровщиком (аналитиком) о целесообразности его применения.

Кроме того, качество изображения может сильно варьировать в каждом конкретном случае, поэтому некоторые данные ДЗЗ не требуют предварительной обработки, которая необходима в других условиях. Предварительная обработка приводит к изменению первоначальных данных изображения, что в конечном итоге способствует их улучшению, но дешифровщик должен иметь в виду, что этот процесс также может привести к появлению артефактов (ошибок), которые проявляются не сразу.

3.1. Радиометрическая коррекция

Многие операции по предварительной обработке могут быть отнесены к действию «восстановление изображения», которое заключается в устранении нежелательного влияния атмосферных помех, системного шума и приборных помех. Эти помехи влияют на яркость пикселей изображений и могут привести к двум типам радиометрических искажений.

К первому типу искажений относится различие в равномерности распределения яркости по изображению в каждом отдельном спектральном канале и на основной сцене. Во втором случае относительная яркость каждого пикселя в каждом спектральном канале изображения может не соответствовать его характеристике спектральной отражательной способности на земной поверхности.

Зная природу этих явлений, можно выявить степень их влияния на изображение, затем устранить или минимизировать их воздействие на используемые данные.

Радиометрическая коррекция – это коррекция радиометрических ошибок, вызванных специфическими ошибками датчика сенсора и атмосферными условиями во время записи данных. На измерения яркости влияют конструкция спутникового сенсора и природные условия, во время которых было выполнено измерение.

Радиометрические свойства цифрового изображения ДЗЗ обычно определяются по его *гистограмме*, которая представляет собой график статистического распределения элементов (объектов) изображения с различной яркостью. По горизонтальной оси гистограммы обычно отображается яркость, а по вертикали – относительное число пикселей заданной яркости. Изменения (коррекции) в гистограмме влияют на визуальное качество изображения при его предварительной обработке в программных пакетах.

Гистограмма описывает распределение значений пикселей изображения в диапазоне от 0 до 255 DN (см. рисунок 2.10). По существу она показывает количество пикселей для каждого значения в этом диапазоне или, говоря другим словами, представляет собой частотное распределение данных DN. Гистограмма может быть представлена либо в табличной форме, либо графически (рисунок 3.2). Табличное представление гистограммы обычно выглядит в виде пяти столбцов (таблица 3.1).

Таблица 3.1 – **Выборка данных распределения DN в виде таблицы**

DN	Нпикс	%	Кумулятивное Нпикс	Кумулятивное, %
0	9	0,01	9	0,00
2	3	0,00	16	0,00
3	11	0,01	27	0,00
14	248	0,20	955	0,11
15	236	0,19	1191	0,13
50	4617	3,80	100276	11,31
51	4509	3,71	104585	11,79
53	5695	4,68	114623	12,92
100	7908	6,50	464910	52,42
101	7827	6,43	472737	53,30
102	7811	6,42	480548	54,18
103	7650	6,29	490916	55,35
162	2051	1,69	766288	86,40
163	2030	1,67	768918	86,70
164	2016	1,66	770934	86,93
178	1565	1,29	797723	89,95
179	1508	1,24	799231	90,12
180	1509	1,24	800740	90,29
254	946	0,78	885958	99,89
255	934	0,77	886892	100,00

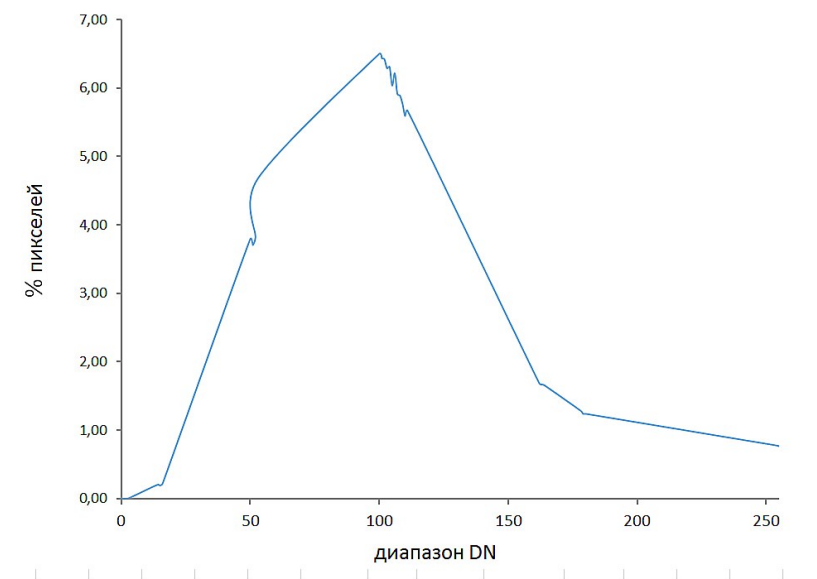


Рисунок 3.2 – Пример распределения стандартной гистограммы DN для канала R , используемой для контрастного выравнивания изображения

Гистограмма обычно оценивается с помощью описательных статистик: среднее значение, стандартное отклонение, минимальное и максимальное значения (таблица 3.2). Стандартное отклонение указывает на разброс значений DN вокруг среднего значения. Чем меньше это значение (ниже контрастность изображения), тем уже график оцениваемой гистограммы.

Таблица 3.2 – Описательные статистики для гистограммы (см. рисунок 3.2)

Мин	Макс	Среднее	Стандартное отклонение
0	255	116,36	60,84

При элементарной обработке (улучшении) изображения обычно используются две операции: работа с *гистограммой* и *фильтрация*. Работа с гистограммой направлена на улучшение общего контраста изображения, что приводит к увеличению визуального различия между объектами местности. В то время как операции с фильтрами направлены на повышение яркости смежных участков или подавление нежелательных деталей изображения. Обе эти операции являются важными при предварительной обработке изображения, позволяющей судить о данных распределения уровней его яркости после преобразования.

Гистограмма рассматривает все пиксели, не учитывая их месторасположение на самом изображении. При этом она присваивает соответствующему пикселю значение яркости, выбранное из справочной таблицы, которая создается на основе статистического анализа всего изображения. Поэтому гистограммы используются при создании бесшовных мозаик из нескольких мультиспектральных сцен и приведении совмещаемых данных к одному виду. Фильтрацию можно охарактеризовать как «локальное действие», присваивающее новое значение пикселю на основе их значений в соседних группах.

Контрастное выравнивание

Линейное контрастное выравнивание (растяжение) – это простое преобразование серой шкалы, при котором наименьший интересующий входной DN становится равным нулю, а наибольший интересующий DN приравняется к 255. Монитор отображает ноль как черный, а 255 – как белый цвет, а оттенки серого для промежуточных значений получаются линейной интерполяцией. В качестве минимального и максимального входного DN обычно также принимают значения 1 % и 99 %.

Сам процесс называется растяжением контраста, поскольку он сжимает входные данные в более узкий диапазон темных уровней на выходном изображении. Такое преобразование при-

водит к увеличению диапазона яркости изображения, что визуально выражается в эффекте повышения контраста и различимости объектов на исследуемом изображении ДЗЗ.

Другим вариантом контрастного выравнивания принято считать операцию *эквализация гистограммы*, при которой происходит нелинейное преобразование, а гистограмма стремится к равномерному распределению. Обычно пакеты обработки изображений предлагают его в качестве функции по умолчанию. Эквализация гистограммы в большинстве случаев приводит к расширению динамического диапазона изображения, что позволяет также выявить ранее не замеченные детали.

В пакете ENVI выравнивание представлено несколькими функциями контрастного растяжения: от простой линейной (*англ. Linear*) до логарифмической (*англ. Logarithmic*) (рисунок 3.3). В пользовательском варианте (*англ. Custom*) программа позволяет оценить уровень и качество используемых функций выравнивания с помощью гистограмм. При этом предусмотрена возможность регулирования пороговых значений DN для растровых изображений. На рисунке 3.4 приведены 4 варианта контрастного выравнивания каналов RGB и отдельно спектрального канала R (красный) спутникового снимка Landsat-8.

Гистограммы выравненного изображения Sentinel-2 (см. рисунок 3.4) состоят из нескольких пиков, огибающая которых отражает соответствующую закономерность функции распределения яркости исследуемого изображения. При 5 % линейном выравнивании убираются все 5 % пиксели выше верхнего и ниже нижнего порога значений яркости изображения. Гауссово выравнивание в пакете ENVI основано на распределении яркостей входного изображения ДЗЗ в соответствии с нормальным законом распределения Гаусса (Чабан, 2013). При этом среднее значение данных устанавливается равным экранному значению 127, значение данных на три стандартных отклонения ниже

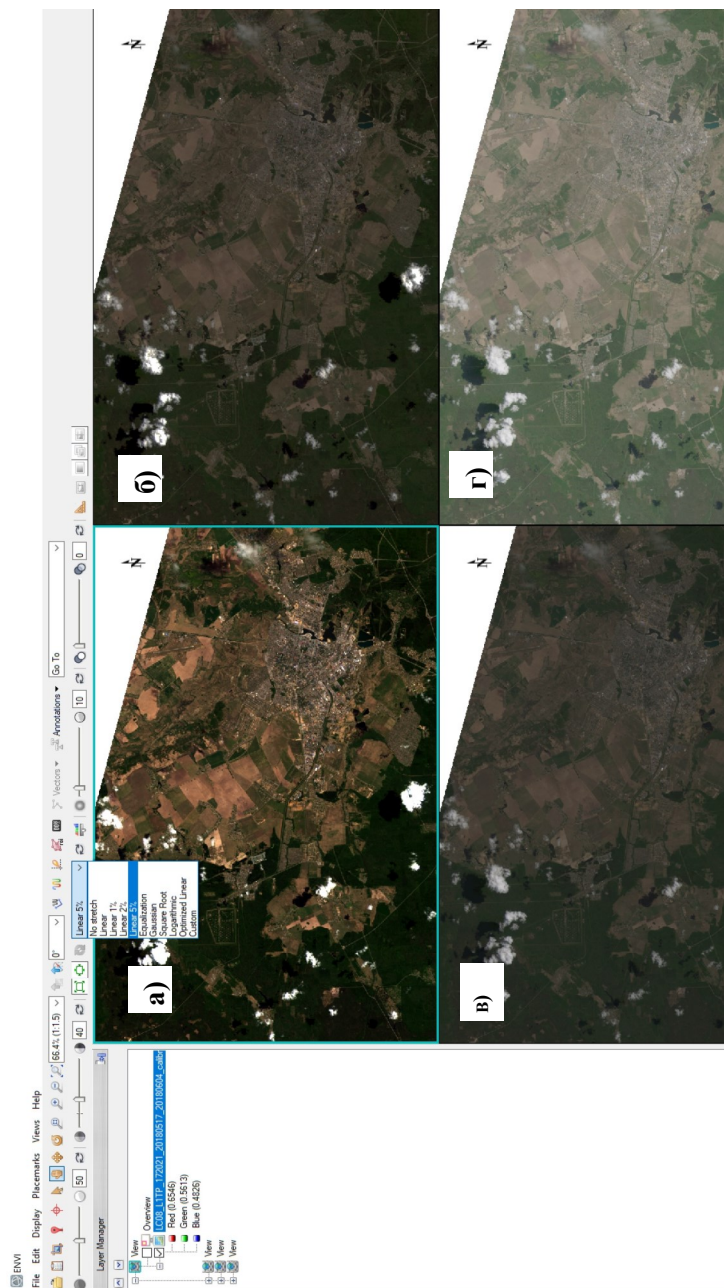


Рисунок 3.3 – Опции контрастного выравнивания в ENVI мультиспектрального снимка Landsat-8 функциями: а) линейная 5 %; б) Гаусса; в) среднеквадратическая г) логарифмическая

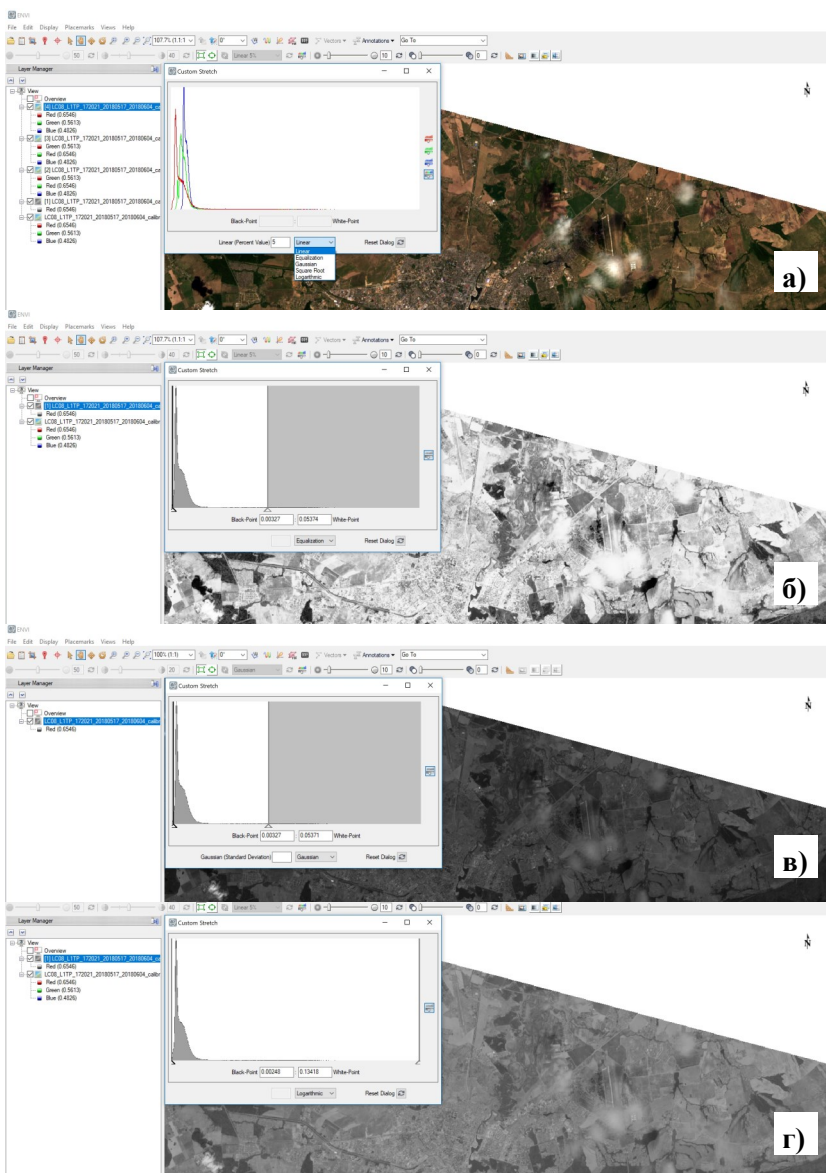


Рисунок 3.4 – Гистограммы выравнивания снимка Landsat-8 функциями: а) линейная 5 % для RGB; для спектрального канала R: б) масштабирование, в) Гаусса, в) логарифмическая

среднего значения составляет 0, а значение данных на три стандартных отклонения выше среднего значения составляет 255.

Следует отметить, что усиление контраста (с помощью линейного растяжения или выравнивания соответствующей гистограммы) просто устраняет неточности в данных, что позволяет визуально лучше различать объекты местности на изучаемом изображении ДЗЗ. При этом количественно его данные не расширяются.

Операции с гистограммой должны проводиться на основе анализа ее формы и функции входных (первоначальных) данных изображения ДЗЗ для проведения соответствующего дешифрирования (интерпретации) объектов наземного покрова. Иначе это может привести к снижению или даже потере содержательной (качественной) части цифровой информации (Principles of remote...).

Фильтрация изображений

Следующим шагом в создании оптимальных изображений для дешифрирования наземного покрова является фильтрация, которую обычно выполняют для отдельного спектрального канала изображения. Функция фильтрации – это локальное преобразование изображения, основанная на сравнении с некоторым пространственным множеством (окрестность) соседних точек (пикселей). Иначе говоря, фильтрация основывается на оптимальном использовании DN как из рабочей площади исследуемого объекта, так и из ее окрестности. При этом в процессе выравнивания (анализа) программа ENVI использует пиксели только в пределах заданной окрестности данных.

В программном комплексе ENVI используются фильтры разных частот, основанные на различных математических операциях, включая операции свертки: усреднения, гауссовой модели и медианного расстояния. Применение фильтров высокой частоты позволяет выделить линейные особенности объектов

наземного покрова (транспортные пути, водные объекты, линии электропередач и т.п.). Низкочастотные фильтры обычно используются для текстурного сглаживания изображения (см. рисунок 3.4).

Большую группу фильтров составляют линейные фильтры, которые позволяют получить новое значение DN как линейную комбинацию заданных значений в рабочем поле и соседних пикселях (окрестности).

Одним из способов, реализованных в программном пакете ENVI является метод пространственной фильтрации. На рисунке 3.5 приведены примеры такого выравнивания снимка спутника Sentinel-2 (RGB) с использованием сверточного фильтра (от *англ.* convolution filter) в программном пакете ENVI (L3Harris Geospatial Solutions. Convolution ...). В качестве примера для фильтрации выбран фрагмент сцены Sentinel-2 на территорию г. Йошкар-Ола 2018 г. летнего периода.

Для проведения этой операции в командной строке Toolbox ENVI 5 выбираем сверточный фильтр (*англ.* convolutions and morphology). В появившемся диалоговом окне (convolutions and morphology) выбираем высоко-частотный режим (*англ.* high pass) и командой применить к файлу (*англ.* apply to file) выбирается файл для дальнейшей обработки в окне (*англ.* Convolution input File) (рисунок 3.5). После нажатия клавиши Ок в появившемся окне параметры свертки (*англ.* convolution Parameters) задаются параметры плавающего окна для анализа информации в пределах его границ с заранее заданными размерами матрицы 3x3 пикселей и указывается путь сохранения выходных данных (рисунок 3.6).

Преобразованное спутниковое изображение позволяет более детально проводить дешифровочный анализ городской территории и может быть использовано для оценки устойчивости городской среды и последующей классификации изображений.

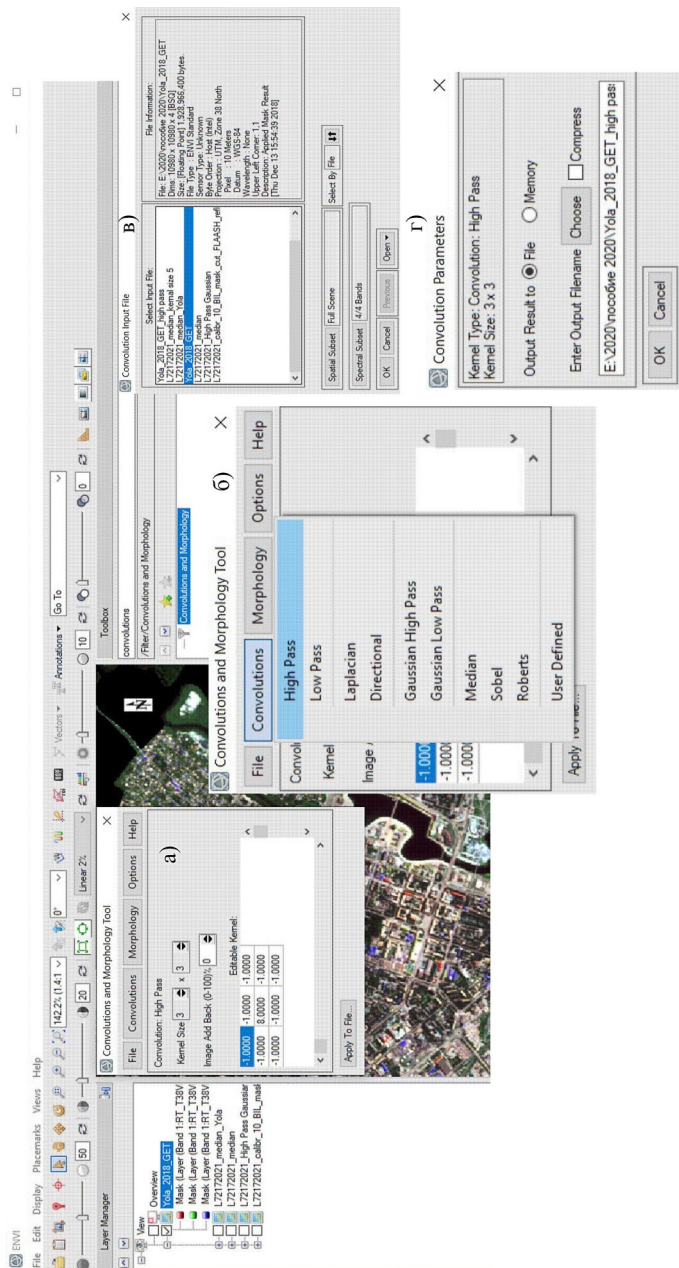


Рисунок 3.5 – Порядок фильтрации изображения Sentinel-2 в ENVI сверточным фильтром: а) запуск опции; б) выбор фильтра высокой частоты; в) загрузка исходного изображения; г) сохранение выходных данных

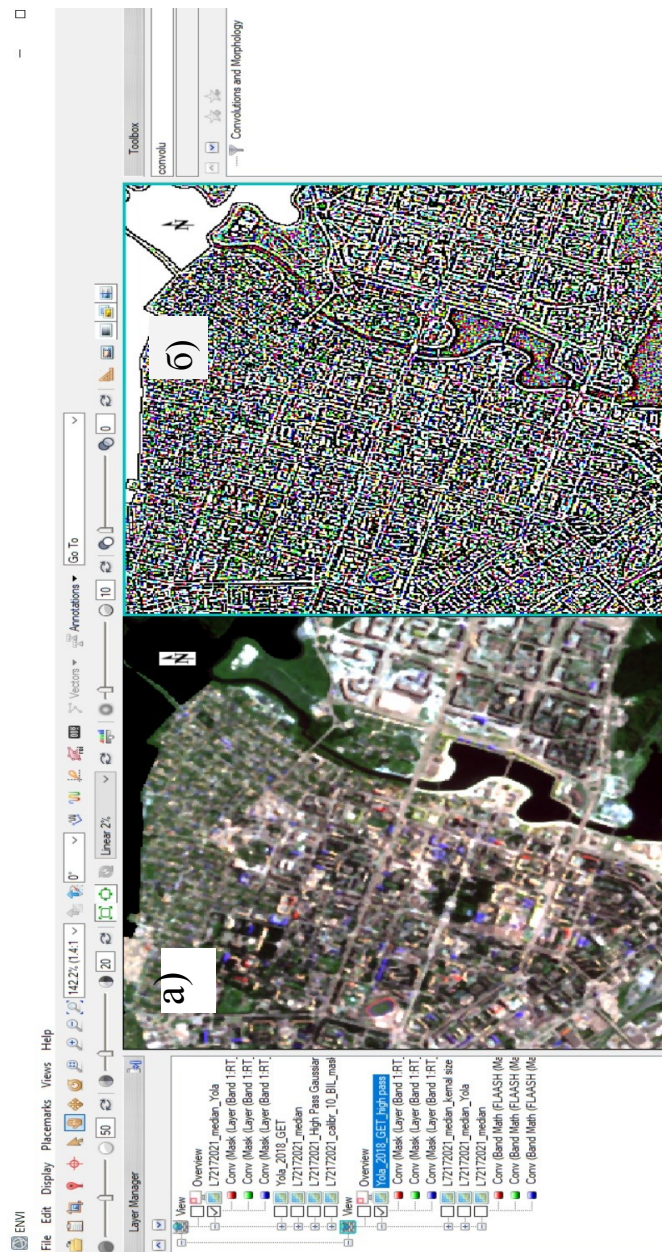


Рисунок 3.6 – Результаты пространственной фильтрации изображения Sentinel-2 в ENVI методом сверточного фильтра: а) исходное изображение; б) преобразованное изображение

3.2. Атмосферная коррекция

В большинстве случаев наличие разнородной, плотной и слоистой приземной атмосферы, состоящей из водяного пара, аэрозолей и газов, нарушает качество сигнала, достигающего сенсора спутника. Следовательно, методы *атмосферной коррекции* необходимы для «очистки» цифровых изображений от этих возмущений, чтобы получить чистое излучение от поверхности Земли.

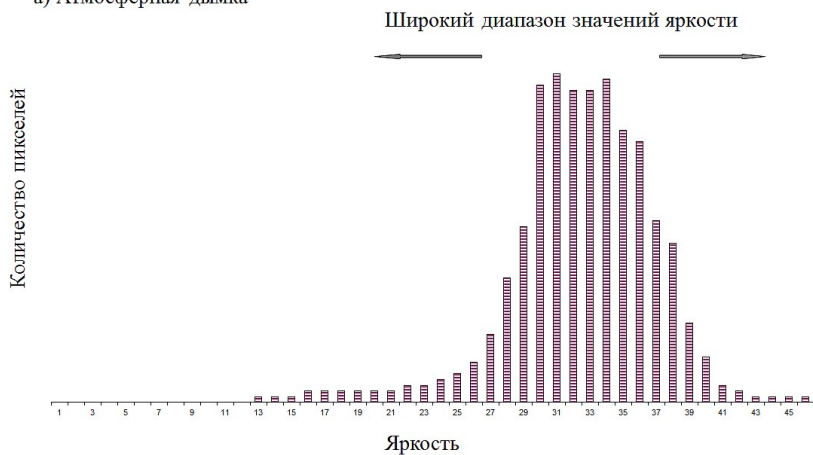
Атмосферная коррекция является одним из ключевых этапов предварительной обработки изображений дистанционного зондирования. В идеальном варианте коррекция атмосферных помех должна проводиться для каждого пикселя спутниковой сцены, но обычно на практике используют коррекцию для всего спектрального канала или фрагмента (рабочей площади) изображения.

Во время предварительной работы над спутниковым изображением дешифровщик (аналитик) должен определиться с необходимостью атмосферной коррекции. На практике это может быть непростой задачей, потому что влияние атмосферы на спутниковое изображение на первый взгляд не всегда очевидно. Для этого всегда необходимо внимательно анализировать статистические данные, получаемые для каждой сцены изображения, которые включают среднее значение, изменчивость, гистограмму (рисунок 3.7).

На основании этих данных можно судить о качестве используемого спутникового изображения. Приведем несколько важных оснований для проведения атмосферной коррекции при работе с данными дистанционного зондирования:

- использование разновременных ДЗЗ (например, при обнаружении изменений в землепользовании, анализе нарушений лесного полога);

а) Атмосферная дымка



б) Чистая атмосфера

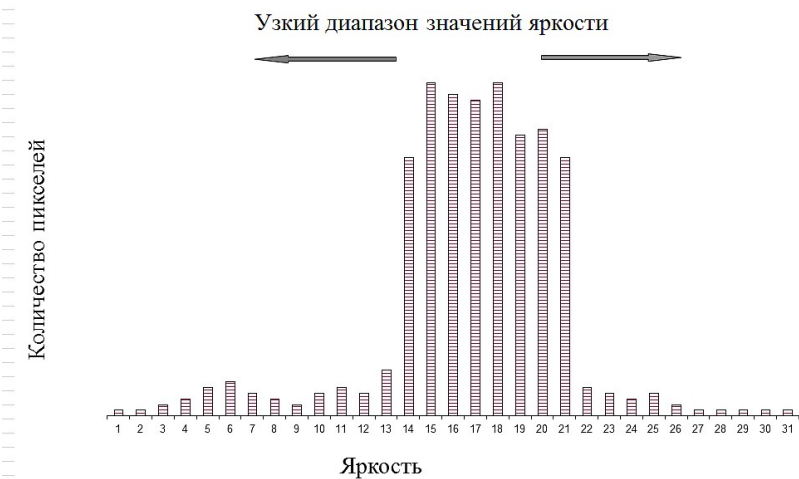


Рисунок 3.7 – Гистограмма яркости изображения: а) при атмосферной дымке; б) чистой атмосфере (темные значения смещены к нулевым значениям)

- сравнение спектральных данных разных типов растительного покрова;
- создание мозаики из нескольких изображений;
- количественный анализ растительности на основе объединения полевых данных и спектральных значений ДЗЗ (например, для оценки биомассы);
- использование вегетационных индексов при оценке растительности.

В целом анализ изображения может выявить наличие ошибок, требующих дальнейшей коррекции. Потеря разрешения и низкая контрастность спутникового изображения могут свидетельствовать о неблагоприятных атмосферных условиях, при которых был сделан снимок.

В отдельных случаях об атмосферных условиях можно судить по дате и времени полученного изображения. Например, в летнее время чаще бывают дни с повышенной влажностью, атмосферной дымкой и плохой видимостью. В другие сезоны года (осенью, зимой и весной) атмосферные условия являются более благоприятными.

Атмосферная коррекция изображений дистанционного зондирования проводится в модуле FLAASH ENVI 5 (*англ.* Fast Line-of-sight Atmospheric Analysis of Hypercubes). Прежде чем изображение будет скорректировано с помощью этого дополнительного модуля программы ENVI 5, с ним необходимо провести процедуру калибровки яркости, регистрируемой съемочной системой, и затем конвертировать значения DN в TOP (*англ.* Top of atmosphere) (рисунк 3.8).

Более подробно с процедурой атмосферной коррекции различных спутниковых изображений в модуле FLAASH можно ознакомиться на сайте ее разработчика (L3Harris Geospatial. Atmospheric correction...).

3.3. Геометрическая коррекция

Снимки дистанционного зондирования сами по себе не представляют собой готовые карты, поэтому аналитику до проведения тематической классификации требуется выявить и устранить на изображении более сложные искажения, чем радиометрические. Во время фиксирования изображения сканером спутника могут появляться геометрические искажения, которые вызываются в результате влияния разных факторов. Например, относительное движение платформы спутника, ее сканеров и Земли могут привести к ошибкам асимметричного характера в изображении. Несовершенство оптики самих датчиков сенсоров, искривление Земли и неконтролируемые изменения в положении и высоте расположения спутника могут привести к геометрическим погрешностям различной степени сложности.

Потенциально существует гораздо больше источников геометрических искажений, которые связаны с рядом факторов: вращение Земли во время получения изображения, скорость и широкое поле сканирования некоторых сенсоров, кривизна Земли и смещение рельефа, изменения высоты орбиты и скорости движения спутника, панорамные эффекты геометрии изображения (Richards, Jia, 2006).

Преобразование исходного изображения ДЗЗ таким образом, чтобы оно имело масштаб и проекции заданной картографической проекции, называется **геометрической коррекцией** (англ. Geometric correction), или геопривязкой. Геометрическая коррекция в программных пакетах представляет собой операцию по исправлению таких искажений и привязыванию снимка на местности, чтобы каждой его точке была задана координата соответствующей точки на местности. Необходимость таких преобразований при работе с изображением ДЗЗ вызвана также смещением пикселей по строке (вдоль движения спутника), что приводит к изменению его пространственного разрешения (рисунок 3.9).

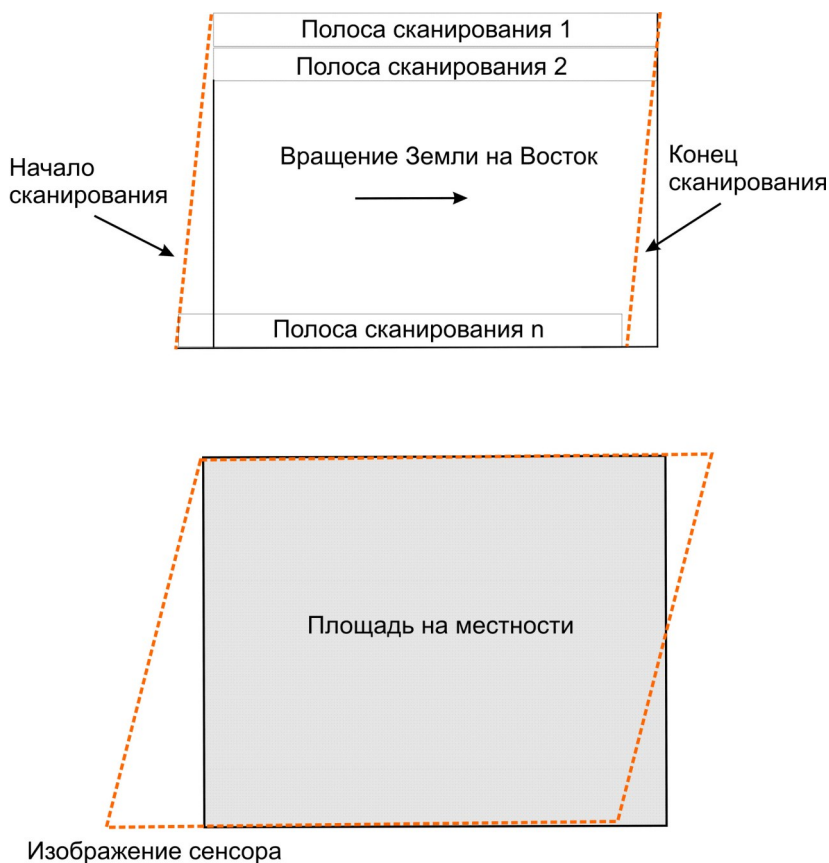


Рисунок 3.9 – Влияние вращения Земли на геометрию сканирования изображений. Начало каждой полосы в процессе сканирования немного смещено в западном направлении

Математически в комплексных пакетах геопривязка обычно осуществляется с помощью степенных полиномов. Точность привязки повышается при использовании опорных точек (GCP – *англ.* ground control points), полученных на местности (тестовые участки). После проведения геометрической коррекции исходного снимка ДЗЗ аналитик оценивает яркостные характеристики трансформированного изображения соответствующими метода-

ми: ближайшего соседа, билинейной интерполяции, бикубической свертки. В некоторых случаях в процессе геотрансформации происходит потеря спектральной яркости первоначального изображения. В связи с этим при оценках растительного покрова с использованием вегетационных индексов вначале рекомендуется проводить тематическую классификацию снимка ДЗЗ, а потом его геометрическую коррекцию. Такая последовательность работ обычно проводится в исследованиях, в которых спектральная характеристика растительного покрова является их основной целью.

3.3.1. Интерполяция значений яркости при повторной дискретизации

Центры пикселей снимков ДЗЗ обычно не проецируются в точные их местоположения на картах местности, поэтому при повторной дискретизации (*англ.* resampling) изображения значения яркости пикселей должны быть определены с учетом их новых координат. Для этой цели можно использовать три метода: ближайшего соседа, билинейной интерполяции и бикубической свертки.

Изображения ДЗЗ в этих методах рассматриваются как массивы данных, которые должны быть использованы для создания другого массива с заданной геометрией. На схематическом рисунке 3.9 подобное изображение представлено в виде множества открытых кружков, каждый из которых представляет собой центр пикселя рабочего изображения до трансформации. Темные точки на рисунке 3.10 представляют второй массив данных, показывающий центры пикселей трансформированного изображения с прогнозируемыми геометрическими свойствами (изображение на выходе).

При повторной дискретизации *методом ближайшего соседа* каждому пикселю присваивается значение яркости, которое имеет ближайший к узлу пиксель новой сетки. Этот пиксель за-

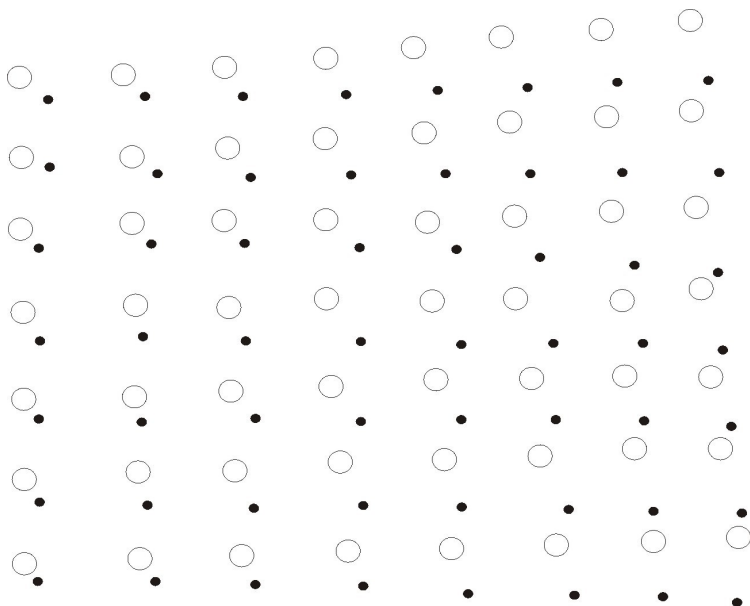


Рисунок 3.10 – Повторная дискретизация изображения. Светлые окружности представляют координатную сетку значений пикселей исходного изображения. Черные точки показывают обычную координатную сетку, которая будет использована для формирования вторичного изображения. В каждом методе повторной дискретизации используется свой подход для оценки значений в трансформированном изображении с учетом значений пикселей исходных данных (Campbell, 2008)

тем переносится в соответствующее положение координатной сетки (рисунок 3.11). Поскольку значение яркости исходной ячейки (пиксель) присваивается новой ячейке без изменения, вся спектральная информация соответственно сохраняется во вторичном изображении. Поэтому метод ближайшего соседа является предпочтительным в том случае, когда трансформированное изображение планируется для последующей классификации.

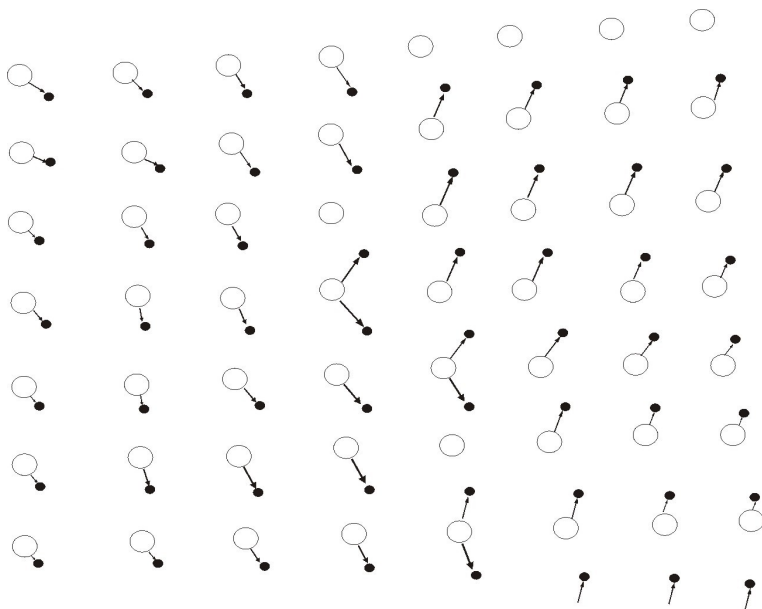


Рисунок 3.11 – Повторная дискретизация по методу ближайшего соседа. Каждое исследуемое значение (•) приобретает новые параметры ближайшей точки системы координат (○)

С другой стороны, такой подход вызывает значительные позиционные погрешности, которые могут быть существенными в линейных объектах. Применение метода ближайшего соседа может привести к искажению краев объектов, что отражается в их ступенчатом виде на трансформированном изображении.

Вторым более сложным методом повторной дискретизации является *билинейная интерполяция* (рисунок 3.12). Она заключается в вычислении яркости каждого вторичного пикселя на основании средневзвешенного значения четырех ближайших ему пикселей, расположенных на исходном изображении. В этом случае «взвешенный» означает, что ближайшие значения пикселя обладают большим влиянием при вычислении вторичных

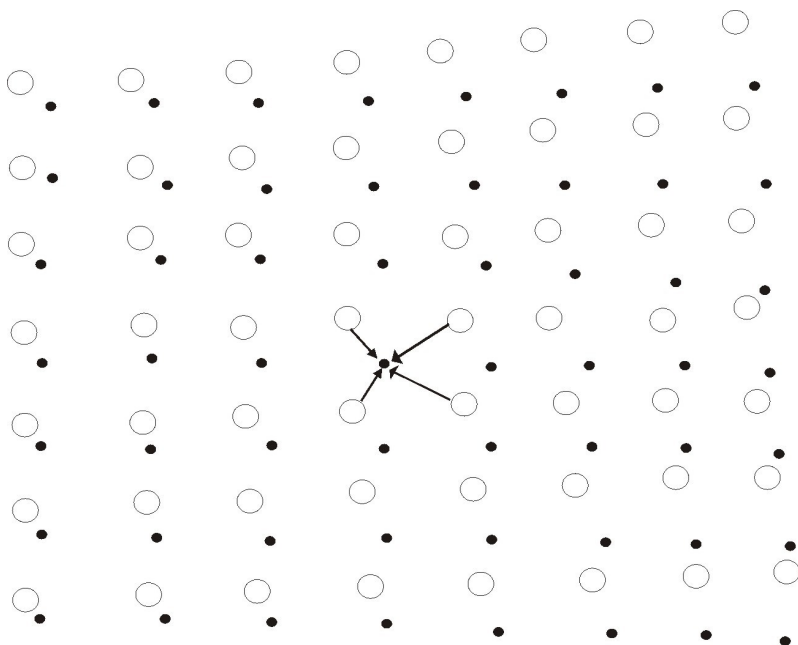


Рисунок 3.12 – Билинейная интерполяция повторной дискретизации. Каждое значение яркости пикселя вторичного изображения формируется путем вычисления средневзвешенного значения четырех ближайших соседних пикселей исходного изображения

значений, чем те, которые расположены дальше в цифровой матрице. В связи с тем, что каждое выравненное значение пикселя основано на нескольких исходных значениях других, вторичное изображение будет иметь более естественный вид.

К недостаткам данного метода относится то, что в этом случае теряются значения яркости пикселей исходного изображения. Диапазон значений яркости вторичного изображения будет отличаться от исходных данных. Такие изменения во вторичном изображении могут повлиять на следующие этапы работы с дистанционными данными. Кроме того, повторная дис-

кретизация методом билинейной интерполяции проводится путем усреднения смежных пикселей, что приводит к снижению пространственного разрешения изображения.

Бикубическая интерполяция (повторная дискретизация с бикубической сверткой) – это наиболее сложный и, возможно, самый распространенный метод повторной дискретизации изображения ДЗЗ. Данный метод интерполяции основан на вычислении средневзвешенного значения яркости по 16 ближайшим (на участке 4×4) пикселям вокруг трансформируемой точки исходного изображения (рисунок 3.13).

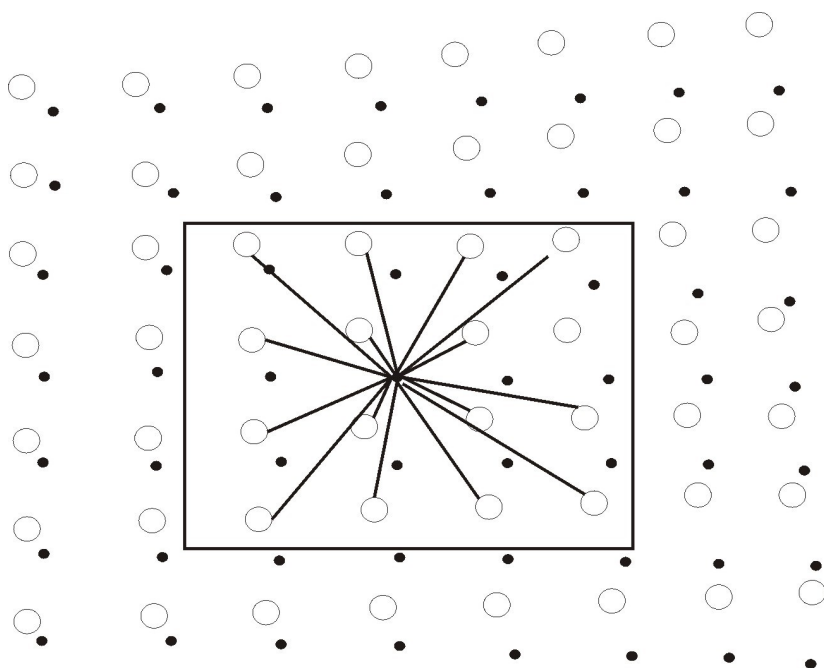


Рисунок 3.13 – Метод бикубической интерполяции повторной дискретизации. Каждое значение вторичной матрицы получается на основании средневзвешенного значения яркости 16 соседних пикселей исходного изображения

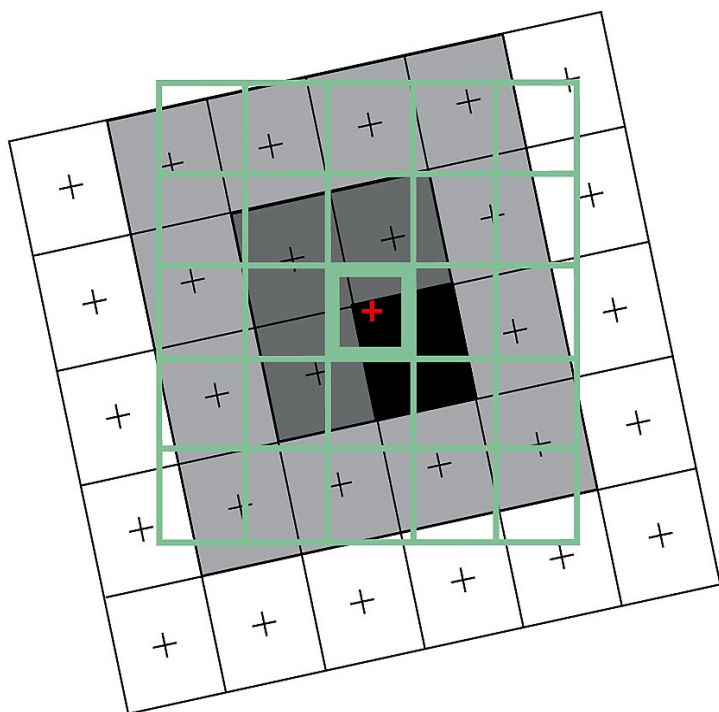
Метод бикубической интерполяции использует средневзвешенные значения в пределах соседних значений, распространяясь на 2 пикселя в каждом направлении. Обычно изображения, получаемые по методу бикубической интерполяции, часто используются в обработке изображений, давая более качественное изображение по сравнению с билинейной интерполяцией.

В то же время при данном способе трансформации данные подвергаются существенным изменениям, чем с использованием методов ближайшего соседа и билинейной интерполяции, поэтому такие изображения следует внимательно анализировать, прежде чем проводить дальнейшее дешифрирование.

Обобщенно все три метода повторной дискретизации представлены на рисунке 3.14. Трансформированное изображение здесь представлено в виде решетки ячеек зеленого цвета. Центры пикселей обозначены крестиками. По мере перехода от метода ближнего соседа до бикубической интерполяции происходит расширение площади используемых пикселей (см. рисунок 3.14) (Principles of remote ..., 2009) .

3.3.2. Опорные точки

Важным практическим моментом процесса *географической регистрации* (привязки) изображений ДЗЗ является наличие достаточного числа *наземных опорных (контрольных) точек* (GCPs – *англ.* ground control points). Они представляют собой характерные точки на изучаемой местности, которые могут быть четко выявлены на точных картах и изображениях ДЗЗ. Картой в этом случае может служить топографическая карта или другое изображение ДЗЗ, предварительно трансформированное до требуемого уровня системы позиционирования. В идеальном случае GCPs должны быть размером с пиксель, чтобы их можно было легко идентифицировать при совмещении двух изображений.



Метод ближайшего соседа



Билинейная интерполяция



Бикубическая интерполяция



Рисунок 3.14 – Принцип проведения повторной дискретизации изображения ДЗЗ на основе трех методов

На практике большинство GCPs выглядят как участки, состоящие из группы пикселей. Например, перекрестки автомобильных дорог, квартальные просеки, водные объекты, границы землепользований, точки пересечения и излучины рек и т.п. (рисунок 3.15). На первый взгляд, идентификация таких точек может показаться аналитику простой задачей, но на практике зачастую возникают сложности в процессе их выявления и геопривязки, особенно на спутниковых изображениях низкого пространственного разрешения. Это может вызвать серьезные трудности для всего последующего процесса работы с изображением.

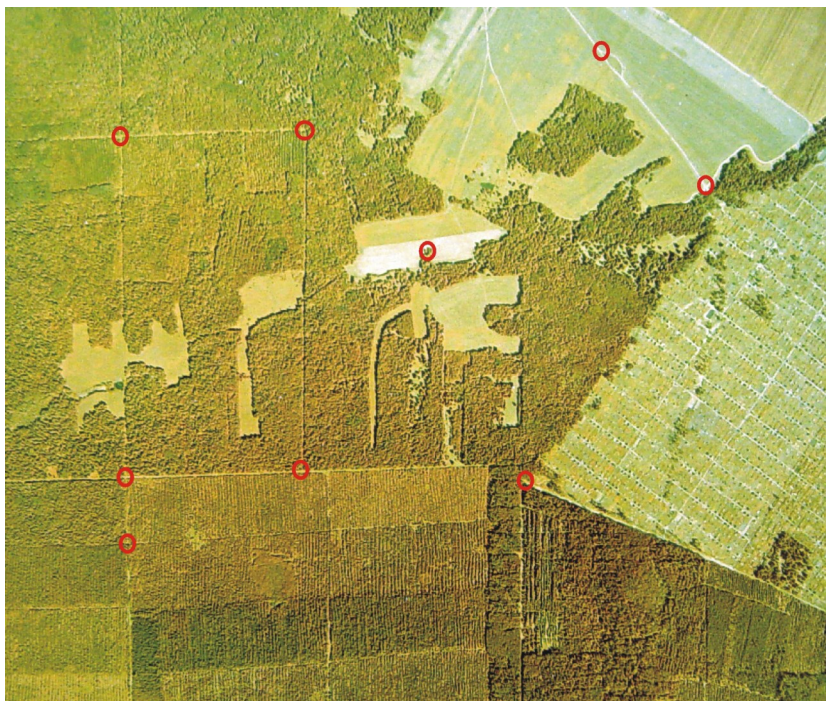


Рисунок 3.15 – Примеры наземных контрольных точек (GCPs) на аэрофотоснимке лесного участка: пересечение квартальных просек и дорог; отдельно стоящие деревья; участки земли в садоводческом товариществе

Для большей точности позиционирования GCPs должны быть равномерно распределены по всему исследуемому изображению, особенно по его краям. Аналитик должен быть готов к сложности таких работ при подборе опорных точек для предварительной подготовки спутниковых изображений, особенно в процессе выделения подгруппы пикселей, которые могут быть недостаточными по размеру для успешной работы по гео-регистрации изображения.

Другой возможностью/альтернативой геопривязки является выделение GCPs на изображении дистанционного зондирования и последующая идентификация их географических координат на исследуемой местности при помощи GPS приемников (*англ.* Global Positioning System) или ГЛОНАСС (Глобальная навигационная спутниковая система) – российская спутниковая система навигации.

Такой способ геопривязки считается среди специалистов самым надежным и точным, но более сложным и трудозатратным. Поэтому чаще всего для этих целей принимается первый способ подбора опорных точек.

3.3.3. Геометрическая коррекция изображений в ENVI

Данные современных спутниковых систем обычно поставляются пользователям с геопривязкой в международной системе координат UTM (*англ.* Universal Transverse Mercator) (WGS_84 – *англ.* World Geodetic System). Тем не менее, у специалистов часто возникает необходимость выявить соответствие между системой координат исходного изображения с используемой (опорной, рабочей) системой координат.

Географическая привязка в программном комплексе ENVI 5 проводится инструментом (опцией) «**Image Registration Workflow**» (Процесс регистрации изображений) двумя способами с использованием точек привязки: 1) при проведении регистра-

ции изображения к спутниковому изображению (растровые данные); 2) привязка по картографическим данным (опорные точки, векторные ГИС карты, отсканированные карты и т.п.).

Географическая привязка в ENVI при проведении регистрации изображения к изображению

Утилиты регистрации и геометрической коррекции ENVI 5 позволяют привязывать пиксельные изображения по географическим координатам и / или корректировать их в соответствии с геометрией основного изображения.

В нашем примере для геопривязки двух изображений были использованы фрагменты спутниковых сцен на территорию пригорода Йошкар-Олы (Республика Марий Эл): Sentinel-2 (ESA) с географической привязкой в качестве базового изображения и Landsat 8 OLI. Открываем оба эти растровых изображения в программном комплексе ENVI 5 и загружаем их в новую группу отображения (рисунок 3.16).

Далее в строке главного меню панели инструментов выбираем опции **Geometric Correction - Registration - Image Registration Workflow**, что позволит создать диалоговое окно регистрации двух спутниковых изображений.

В открывшемся диалоговом окне **File Selection** (Выбор файла) выбираем базовое спутниковое изображение Sentinel-2 (**Base Image File**), которое будет выступать в качестве опорного (главного) изображения (рисунок 3.17). В поле **Warp Image File** (файл обрабатываемого изображения) выбираем спутниковый снимок Landsat 8. Щелкаем на кнопку **Next**, что приведет к открытию диалогового окна создания опорных точек.

В открывшемся окне **The Point Generation** (Создание точек) указываются параметры для автоматической генерации точек привязки в программе ENVI 5 (рисунок 3.18).

Создание точек привязки рекомендуется только в том случае, если оцениваемые изображения не имеют географическую при-

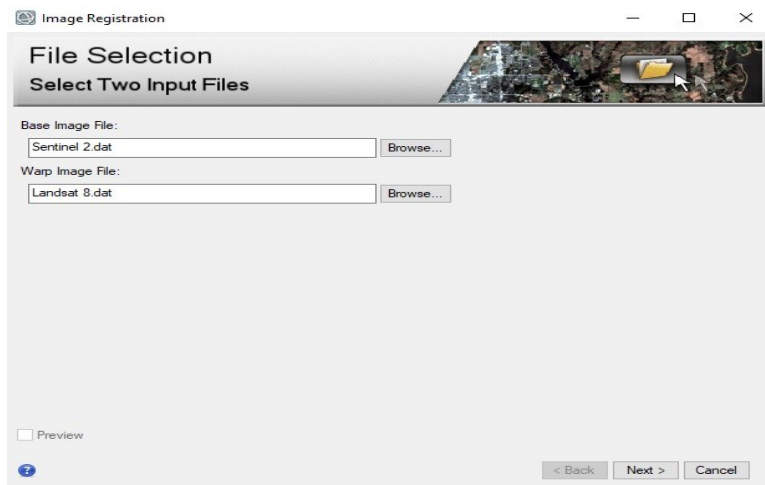


Рисунок 3.17 – Диалоговое окно регистрации базового Sentinel-2 и обрабатываемого Landsat-8 OLI изображений

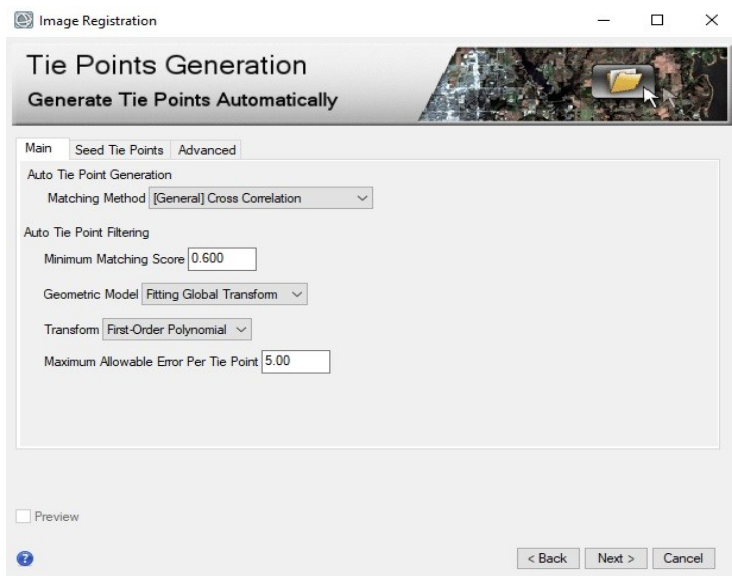


Рисунок 3.18 – Диалоговое окно выбора связующих точек

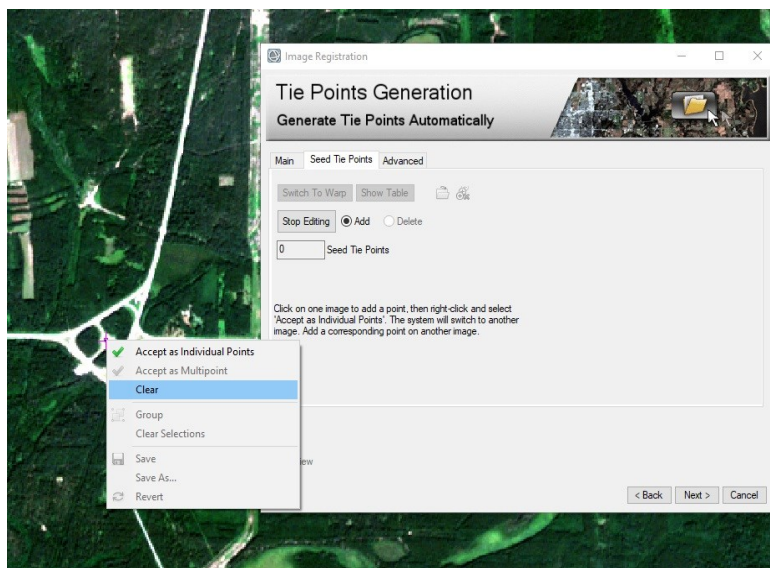
вязку или она недостаточна. Если одно из изображений имеет плохую привязку, а другое – не имеет, то первое обычно используется в качестве базового. Если базовое изображение основано на пикселях или имеет псевдопроекции, то в этом случае до процедуры геопривязки необходимо добавить или импортировать как минимум три начальные точки привязки (L3Harris Geospatial. Image Registration...).

После перехода в диалоговое окно **Seed Tie Points** точки привязки формируются посредством помещения курсора на двух изображениях на один объект (пиксель). На базовом изображении определяем объект ландшафта и помещаем на него курсор. Для закрепления выбранной точки правой кнопкой мыши выбирается команда **Accept as Individual Points** (Принять как индивидуальные точки) (рисунок 3.19 а). После автоматического перехода на привязываемое изображение Landsat 8 на нем также выделяется тот же самый объект и аналогично закрепляется в программе (рисунок 3.19 б).

В программе ENVI также предусмотрен автоматический поиск точек привязки, который осуществляется после активирования клавиши **Next**. Программа автоматически набирает необходимое количество точек привязки с последующим отображением их в окне **Image**.

Корректность набора точек привязки на оцениваемых спутниковых изображениях определяется аналитиком на основании значений среднеквадратической ошибки точек привязки (**RMS Error**). Для большей корректности геопривязки значения среднеквадратической ошибки, которые приводятся в таблице **Tie Points Attribute Table**, должны быть меньше 1. Для просмотра этих значений в программе ENVI используется команда **Show Table** (рисунок 3.20). Точки, имеющие значение **RMS Error** выше 1, обычно удаляются из общего множества набранных точек привязки.

а)



б)

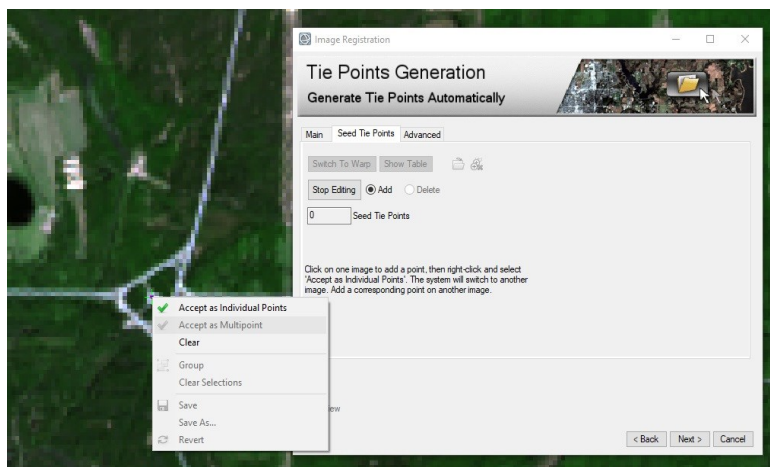


Рисунок 3.19 – Обнаружение и добавление связующей точки на изображениях: а) Sentinel-2, б) Landsat 8

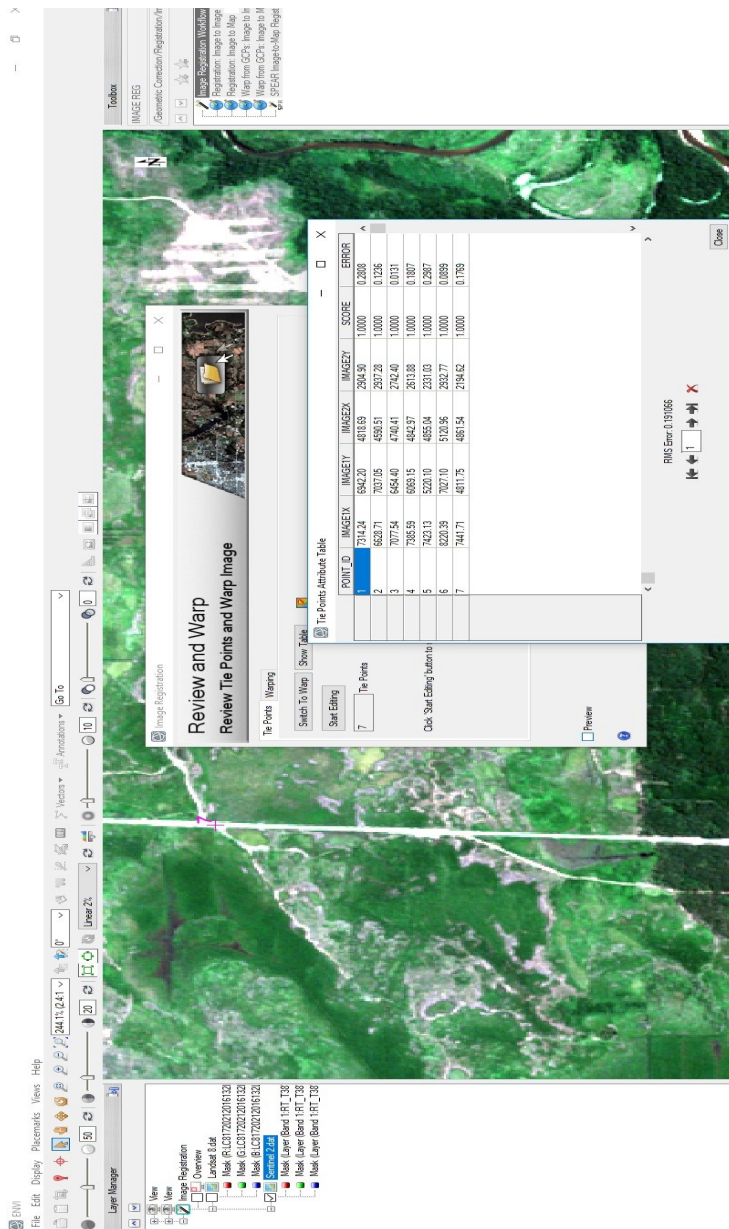


Рисунок 3.20 – Набор точек привязки с данными среднеквадратической ошибки (RMS error)

Процесс геопривязки двух растровых спутниковых изображений завершается последовательным нажатием клавиш **Next**, что приводит к открытию диалогового окна, в котором необходимо указать директорию сохранения выходных файлов, и **Finish** (рисунок 3.21).

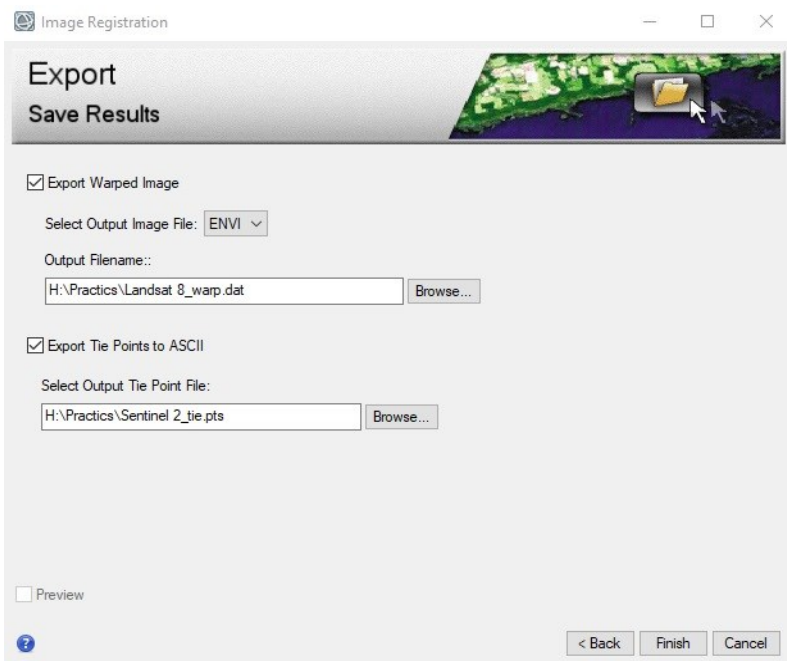


Рисунок 3.21 – Экспортирование привязанных файлов в пакете ENVI 5

В результате использованных команд в ENVI 5 была проведена геометрическая привязка фрагмента спутниковой сцены Landsat 8 к фрагменту спутникового изображения Sentinel-2. Результирующее изображение сохраняется в соответствующей папке пользователя программным пакетом для последующей работы в окне **Layer Manager**.

3.4. Объединение растровых данных

Большинство современных спутниковых сенсоров одновременно фиксируют мультиспектральные и панхроматические диапазоны данных. При этом панхроматический канал по своему пространственному разрешению обычно на порядок выше у каналов RGB и NIR, которые наиболее часто используются при работе с растительным покровом или для анализа объектов природопользования. В то же время цветные изображения более удобны при работе с такими объектами, что делает их предпочтительными при дешифрировании. Поэтому специалисты часто используют в своей работе процесс объединения таких изображений, который в международной практике называется «Фьюжн» (англ. Fusion).

Слияние (Fusion) – процесс приведения двух и более данных ДЗЗ с различным пространственным разрешением к одному изображению, которое является более подходящим и понятным для человеческого и машинного восприятия. Такое изображение может иметь высокое пространственное разрешение панхроматического канала и мультиспектральные каналы с более грубым разрешением. Полученное изображение будет более информативным, чем любой из входных спектральных каналов данных ДЗЗ.

Слияние (объединение) данных может применяться к набору различных форм ДЗЗ. Например, объединение мультиспектральных и радиолокационных данных, мультиспектральных изображений с данными цифровой модели местности. Наибольшее применение методика Fusion находит для объединения мультиспектрального изображения с относительно низким пространственным разрешением с другим подобным изображением, полученным с более высоким пространственным разрешением. Примеры могут включать в себя слияние многоспектральных (RGB) данных спутника Landsat-8 (с пространствен-

ным разрешением 30 м) с соответствующей панхроматической сценой Landsat-8 (с 15-метровым пространственным разрешением), или многоспектральные данные спутника Sentinel-2 с соответствующими данными аэрофотосъемки на большой высоте.

Техника слияния основывается на том, что изображения совместимы по времени съёмки (или близки по вегетационному периоду) и могут быть гео привязаны с точностью до субпикселя. Кроме того, такие изображения должны пройти геометрическую коррекцию и иметь пространственное соответствие. Несовпадение между спектральными каналами, в особенности для канала с более низким пространственным разрешением, может привести к возникновению эффекта «цветных артефактов», мешающих при последующем дешифрировании объединённого изображения.

3.4.1. Pan-sharpening изображений ДЗЗ

Для повышения детализации спутниковых данных специалисты обычно используют метод паншарпенинг (*англ.* Panchromatic sharpening), который позволяет повысить качество изображения с низким пространственным разрешением за счёт снимков с более высоким (Pohl, Genderen, 1998; Amro et al., 2011). Паншарпенинг – это метод слияния изображений, который объединяет три изображения из мультиспектральных каналов с панхроматическим изображением с более высоким разрешением в цветной композит. Повышение четкости (пространственного разрешения) изображения в реальном или ложных цветах стало стандартным продуктом многих поставщиков спутниковых данных.

Суть этого процесса заключается в передаче изображением (обычно панхроматическим) высокого пространственного разрешения изображению с низким разрешением (обычно мультиспектральному). Иначе говоря, метод паншарпенинг увеличивает пространственное разрешение мультиспектральных каналов

изображения ДЗЗ, используя пространственную информацию, извлеченную из панхроматического канала более высокого разрешения, за счет некоторого искажения спектральной информации (Thomas et al., 2008).

Применение этого метода позволяет усилить геометрическую коррекцию спутникового изображения (Johnson, 2014), улучшить его визуализацию (деталей на мультиспектральном снимке) и сегментацию объектов (Johnson et al., 2012), повысить точность классификации изображений (Colditz et al., 2006; Palsson et al., 2012), а также улучшить процесс выявления изменений в наземном (растительном) покрове (Zeng, 2010; Воробьев и др., 2016). Особую важность паншарпенинг приобретает при объединении изображений, полученных с двух сенсоров в разное время и даты съёмки (Ehlers et al., 2010; Rodriguez-Galiano et al., 2012).

В последние десятилетия было разработано много технологий и алгоритмов паншарпенинга спутниковых изображений, большинство из которых основаны на балансе между желаемым пространственным разрешением и спектральной характеристикой прогнозируемого результата (Aanaes et al., 2008). Выбор подходящего метода паншарпенинга зависит от спектральных характеристик наборов входных данных ДЗЗ и предполагаемого применения трансформированных изображений (Jalan, Sokhi, 2012).

Метод **интенсивного насыщенного оттенка** (англ. Intensity-hue-saturation) (Edwards, Davis, 1994; Tu et al., 2004) является одним из наиболее часто используемых способов паншарпенинга, целью которого является увеличение пространственных деталей, но этот метод также может привести к спектральным искажениям.

Метод **фильтра высоких частот** (англ. High-pass filtering), основанный на использовании высокочастотных компонентов в

интерполированных мультиспектральных данных, показал лучшую производительность за счет улучшения качества пространственных деталей (Chavez et al. 1991).

Другие методы паншарпенинга изображений ДЗЗ базируются на алгоритмах *анализа главных компонент* (англ. Principal component analysis), вейвлет-преобразовании (Ranchin et al., 2003; Lillo-Saavedra, Gonzalo 2006), геостатическом совмещении на основе ко-кригинга (англ. Geostatistical fusion)(Pardo-Iguzquiza et al., 2011).

3.4.2. Процедура Pan-sharpening в ENVI

В рассматриваемом ниже примере процедура «Pan-sharpening» в комплексном пакете ENVI представляет собой комбинирование данных мультиспектральных каналов спутника Landsat 8, которые обладают 30 м пространственным разрешением, с пространственным разрешением панхроматического канала (PAN), которое для спутника Landsat 8 составляет 15 м. В результате этой трансформации получается мультиспектральное цветное изображение Landsat 8 с пространственным разрешением 15 м.

Для проведения этой операции в командной строке **Toolbox ENVI 5** выберите **Image Sharpening – Gram-Schmidt Pan Sharpening** (Основные инструменты – Преобразование Изображения – Преобразование Грама — Шмидта) (рисунок 3.22 а). В диалоговом окне **File selection** (Выбор файла) выбирается растровое изображение низкого пространственного разрешения (**Select Low Spatial Resolution Raster**), мультиспектральное изображение спутника Landsat 8 OLI (Multispectral) и выполняется команда ОК (рисунок 3.22 б).

Далее в том же диалоговом окне комплексного пакета ENVI 5 открывается команда **Select Input High Resolution Raster** (Выбрать входной растер высокого разрешения), в которой



Рисунок 3.22 – Последовательность действий по проведению паншарпинга: а) использование преобразования «Грамм-Шмидта», б) выбор снимка низкого разрешения, в) выбор снимка низкого разрешения

выбирается панхроматическое изображение спутника Landsat 8 OLI (Panchromatic) и решение подтверждается командой ОК (рисунок 3.22 в).

В диалоговом поле ENVI 5 **Sensor** (Сенсор) диалогового окна **Pan Sharpening Parameters** (Параметры паншарпенинга) вводятся исходные данные по спутниковому сенсору Landsat 8 OLI, а в поле **Resampling** (повторная дискретизация) выбирается одна из трех функций преобразования:

- Bilinear (билинейная интерполяция, по умолчанию);
- Nearest neighbor method (метод ближайшего соседа);
- Cubic Convolution (кубическая свертка).

В конечном итоге в поле **Output Filename** «Название выходного файла» вводится название итогового файла и нажимается «ОК» (рисунок 3.23).

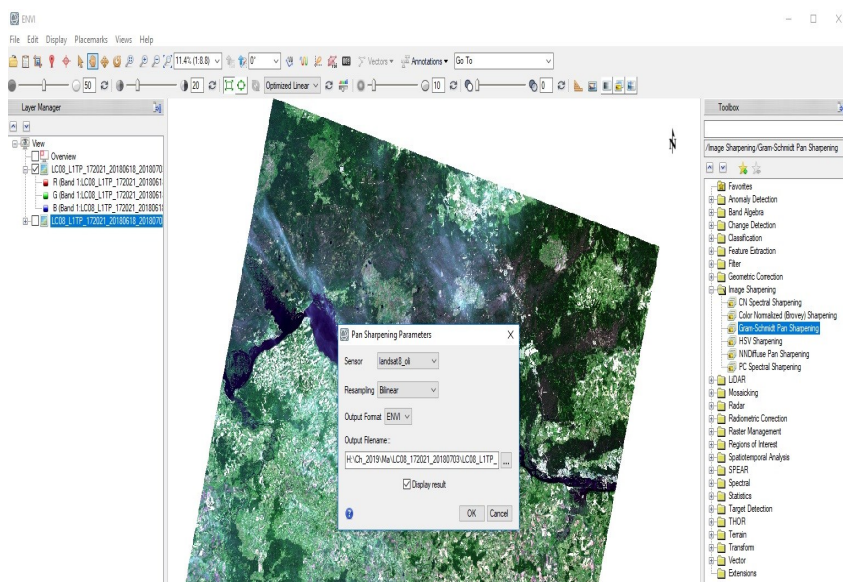


Рисунок 3.23 – Визуализация процесса паншарпенинга изображения Landsat 8 в пакете ENVI

В результате этих действий получается преобразованное мультиспектральное изображение Landsat 8 OLI с более высоким пространственным разрешением. Различие между итоговым и исходным спутниковыми изображениями можно оценить с помощью стандартной команды **Portal** (Портал) (рисунок 3.24), которая позволяет в интерактивном режиме визуализировать несколько слоев используемых изображений (рисунок 3.25).

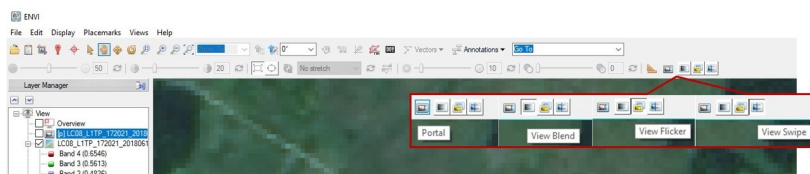


Рисунок 3.24 – Диалоговое окно «Portal» в пакете ENVI 5

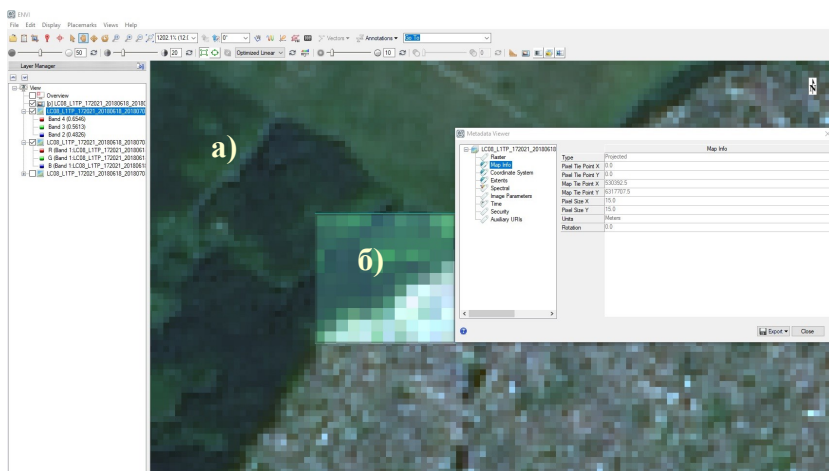


Рисунок 3.25 – Сравнение изображения Landsat 8 после проведения трансформации паншарпинга с исходными данными с помощью команды визуализации Portal: а) трансформированное изображение с пространственным разрешением 15 м, б) исходное изображение в виде группы пикселей изучаемого участка с пространственным разрешением 30 м

|| Контрольные вопросы по разделу 3

1. Для чего проводится предварительная обработка изображений ДЗЗ? В каких случаях она может быть излишней?
2. Что характеризует гистограмма цифровых данных изображения? Какими статистическими показателями она описывается?
3. Перечислите и опишите способы контрастного выравнивания изображения ДЗЗ.
4. Приведите пример обработки изображения ДЗЗ с помощью метода фильтрации.
5. С какой целью проводится атмосферная коррекция изображений ДЗЗ? Какие факторы создают атмосферные помехи на спутниковых снимках?
6. Почему геометрические преобразования спутникового изображения могут негативно отразиться на результате последующей тематической классификации по яркостным признакам?
7. Назовите три основных метода интерполяции (повторной дискретизации) яркостных характеристик пикселей изображения ДЗЗ. В каких случаях целесообразно применять каждый из этих методов?
8. Каким требованиям должны удовлетворять опорные точки (GCPs) при геопривязке изображения к карте или другому изображению ДЗЗ?
9. С какой целью проводится процесс паншарпенинг для мультиспектрального изображения? Приведите примеры выполнения паншарпенинга для изображений разных спутниковых систем.

4|| ДЕШИФРИРОВАНИЕ РАСТИТЕЛЬНОСТИ

4.1. Спектральные свойства растительности

Растительный покров Земли часто является первой поверхностью, на которую попадают электромагнитные волны света, используемые в дистанционном зондировании. Именно поэтому на многих изображениях ДЗЗ большая часть сцены обычно представлена растительным покровом. Дистанционное зондирование является эффективным решением при картировании и мониторинге лесов, исследовании вредителей и болезней леса, а также лесоустройстве лесов как в региональном, так и глобальном масштабе.

Спектральная сигнатура представляет собой вариацию отражения или излучающей способности подстилающей поверхности в зависимости от длины волны электромагнитного спектра. Она представляет собой важный момент к пониманию разделимости классов растительного покрова на изображениях ДЗЗ (Lillesand et al., 2015). Для количественной оценки спектральных сигнатур используется спектральная отражательная способность (спектральная яркость) поверхности. Она представляет собой величину, описывающую способность какой-либо подстилающей поверхности или границы раздела двух сред отражать падающий на неё поток электромагнитного излучения. Спектральные отражательные свойства разных объектов могут быть измерены в лабораторных условиях или на местности. Полученные таким образом наборы справочных спектральных данных могут быть использованы для интерпретации изображений (Jensen, 2015).

Современные программные пакеты обработки изображений ДЗЗ используют закономерности отражательных и спектральных свойств растительности. Верхний полог растительного покрова отражает или поглощает только определенные

зоны электромагнитного спектра. Хлорофилл листьев деревьев поглощает солнечные лучи по-разному. В первую очередь молекулы хлорофилла для процесса фотосинтеза поглощают синюю и красную часть спектра (рисунок 4.1).

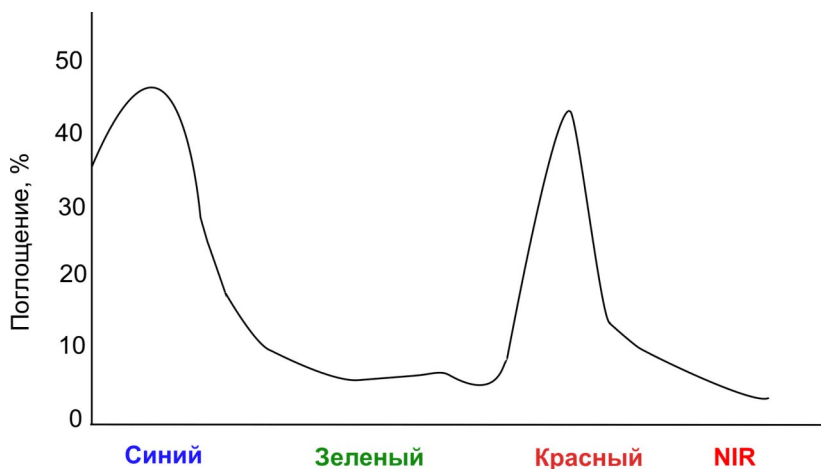


Рисунок 4.1 – Спектр поглощения хлорофиллом листа растений

Они могут поглотить до 90 % падающего света. Зеленая зона электромагнитного спектра света поглощается меньше, но в свою очередь больше отражается. Поэтому глаз человека, который воспринимает только видимую часть спектра света, определяет цвет листа и в целом растительного покрова в виде зеленого (рисунок 4.2).

На границе видимого спектра в связи со снижением поглощения красного света пигментами хлорофилла происходит резкое увеличение отражения (см. рисунок 4.2). Если рассматривать отражение света не только в видимой части спектра, то ее пик будет находиться не в зеленой, а в ближней инфракрасной зоне (NIR – *англ.* Near-Infrared), что имеет решающее значение при исследовании растительности дистанционными методами

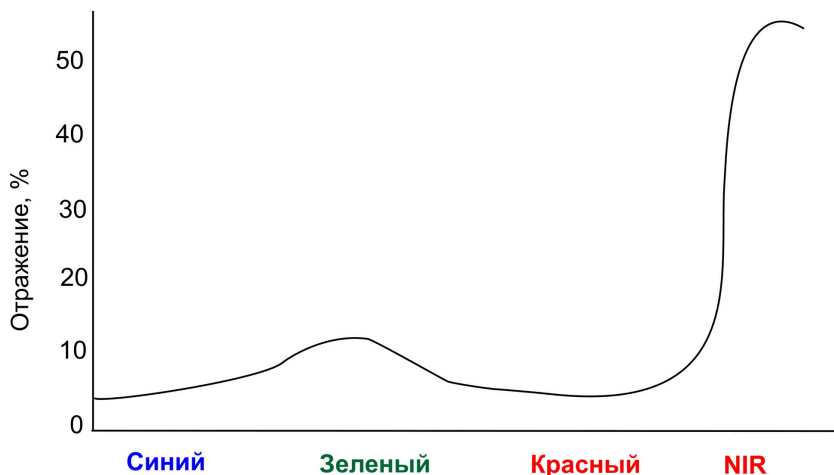


Рисунок 4.2 – Характерная спектральная кривая отражения света листьями растений

(Howard, 1991). Это происходит на всем участке ближней инфракрасной зоны спектра, обладающей максимальной тепловой энергией. Если бы листья поглощали эту энергию с такой же эффективностью, как и в видимой зоне электромагнитного спектра, то происходило бы их перегревание с последующей неизбежной денатурацией протеина. Растительность приспособилась к этому участку спектра, отражая или пропуская соответствующие зоны электромагнитного спектра солнечной энергии на нижние листья или земную поверхность.

Такое свойство растительности позволяет выделять его на фоне других подстилающих поверхностей, которые обычно имеют более темный цвет в инфракрасной зоне спектра. Дифференциация в отражательной способности различных пород деревьев и растений хорошо проявляется также в этой зоне спектра, что позволяет проводить выделение классов растительного покрова при тематическом картографировании изображений ДЗЗ (рисунок 4.3).

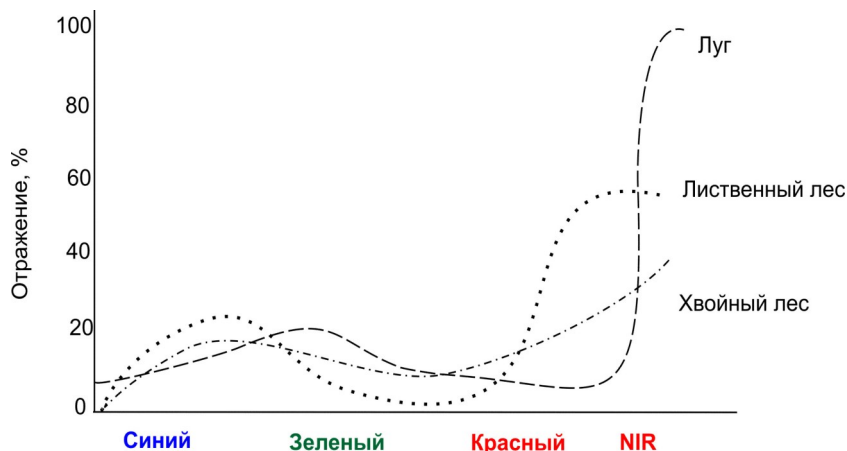


Рисунок 4.3 – Спектральные кривые для различных классов растительности. Наибольшее различие в отражении света наблюдается в ближней инфракрасной зоне спектра

С увеличением возраста, при нарушении вредителями и болезнями, недостатке влаги спектральная характеристика растительного покрова тоже может меняться. В целом такие изменения проявляются как в видимой (RGB), так и в ближней инфракрасной (NIR) зоне спектра, в которой они визуальное хорошо проявляются. Это позволяет оценивать подобные изменения, а также проводить мониторинг лесных посадок и естественного лесовозобновления; выявлять участки лесных территорий, подверженных болезням и вредителям.

4.2. Вегетационные индексы

Одной из главных задач многих современных исследований методами дистанционного зондирования является определение состава, запаса и общего состояния лесов (растительности) на соответствующей территории исследования. С начала 60-годов прошлого столетия и до настоящего времени для изучения растительного покрова исследователи во всем мире широко исполь-

зуют **вегетационные индексы** (VI – *англ.* Vegetation Index) – безразмерный радиометрический показатель, показывающий относительное распространение и интенсивность живой растительности на основании показателей спектральной яркости изображения (спектрального отражения). Он получается в результате комбинирования нескольких спектральных значений, которые прибавляются или умножаются для получения одного значения, которое характеризует вегетационный потенциал растительности в пределах одного пикселя.

Высокие показатели VI свидетельствуют о том, что пиксели указывают на хорошую биологическую продуктивность и здоровую растительность. Этот показатель часто учитывает индекс листовой поверхности (LAI – *англ.* leaf-area index), процент живой растительности, содержание хлорофилла, биомассу и поглощенную фотосинтетическую активную радиацию (APAR – *англ.* absorbed photosynthetically active radiation). Вегетационный индекс часто используется для оценки биомассы или скорости биопродуктивности наземных экосистем.

Существуют более 20 различных вегетационных индексов. Рассмотрим подробнее некоторые из них. Самой простой формой вегетационного индекса является отношение между двумя цифровыми значениями двух различных спектральных каналов изображения ДЗЗ. Например, первым наиболее простым VI было простое соотношение SR (*англ.* Simple ratio) значений спектральных яркостей в ближней инфракрасной зоне спектра (NIR) и красного (Red) диапазона спектра (Tucker, 1979).

Rouse и др. (1974) предложили показатель, который в настоящее время называется нормализованный **разностный вегетационный индекс** (NDVI – *англ.* Normalized Difference Vegetation Index) – количественный показатель количества фотосинтетически активной биомассы растительности. На сегодняшний день это один из самых распространенных и используемых индексов

для решения широкого круга задач при оценках растительного покрова. NDVI был широко адаптирован и применен для дистанционных цифровых изображений спутниковой системы Landsat и Sentinel. Индекс вычисляется как отношение значений спектральной яркости в красной и ближней инфракрасной зонах спектра по следующей формуле:

$$NDVI = \frac{NIR - red}{NIR + red}.$$

Расчет NDVI основывается на двух участках спектра, отраженных растительностью. В красной области спектра (0,6-0,7 мкм) происходит максимальное поглощение солнечного света хлорофиллом листьев, а в инфракрасной области (0,7-1,0 мкм) расположена область максимального его отражения (см. рисунок 4.3). Отношение этих показателей друг к другу позволяет дифференцировать растительный покров по классам и выделять его от других природных объектов на изображении ДЗЗ.

Индекс NDVI чувствителен к наличию растительности на земной поверхности и может быть использован для определения ее типа, количества и состояния. Значения NDVI варьируют в пределах от -1 до 1. Положительные значения индекса соответствуют покрытым растительностью участкам, а отрицательные значения свидетельствуют о лишенной растительности поверхности: вода, снег, лед или облака. Ноль означает полное отсутствие растительности. В диапазоне от 0 до 1 повышение значения NDVI свидетельствует об увеличении фитомассы растительного покрова (рисунок 4.4).

Будучи безразмерным показателем, индекс NDVI имеет высокую связь с другими параметрами природных объектов: фитомассой, влажностью почв, осадками, снежным покровом. Поэтому данный вегетационный показатель часто используется при создании тематических карт: фитомассы лесного покрова,

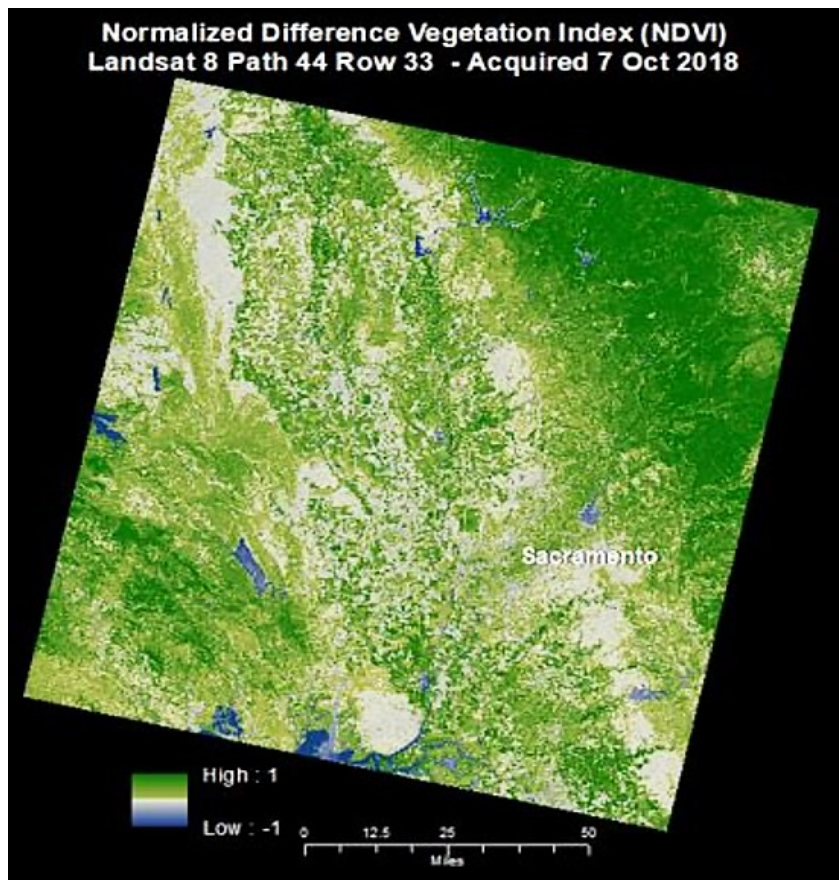


Рисунок 4.4 – Вегетационный индекс NDVI, полученный по снимку Landsat 8 на территорию Западного побережья США (U.S. Geological Survey, 2018, Normalized Difference ...)

типов ландшафтов, природных зон, почвенных, аридных и других (Lanorte et al., 2014; Karlson et al., 2016). В зависимости от используемых данных ДЗЗ NDVI может быть рассчитан и использован для мониторинга территорий с большим пространственным охватом (регион, страна или континент) (рисунок 4.5).

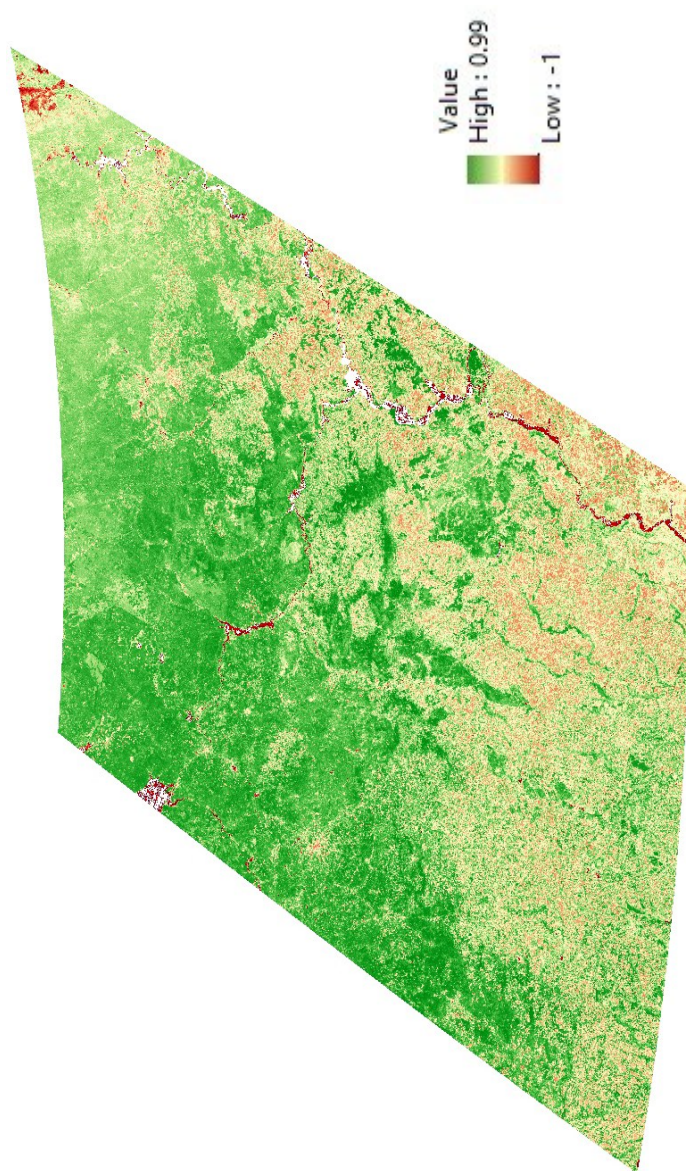


Рисунок 4.5 – 16-дневной композит NDVI на территорию Среднего Поволжья России, полученный по данным радиометра MODIS (MOD13Q1.A2018225.h20v03.006), август 2018 г.

Данные же сенсоров высокого разрешения для спутниковых систем типа Landsat, Aster, Sentinel, Канопус, Ресурс позволяют создавать тематические карты NDVI объектов, соответствующим по площади лесным посадкам, гарям или лесному выделу (Курбанов и др., 2013).

Взаимосвязь NDVI с климатическими параметрами широко используется при оценке глобальных климатических изменений на региональном и глобальном уровнях (рисунок 4.6)

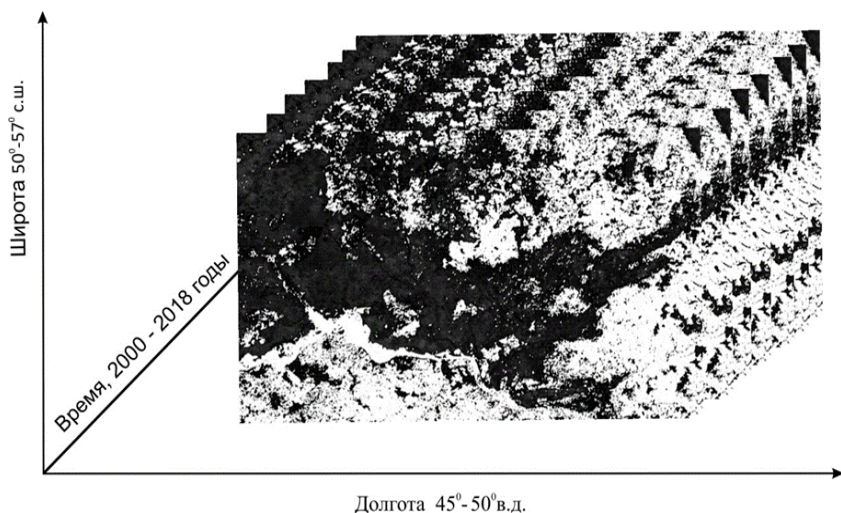


Рисунок 4.6 – Временной ряд изображений вегетационного индекса NDVI радиометра MODIS на территорию Марийского лесного Заволжья за период с 2000 по 2018 гг.

При использовании NDVI индекса следует принимать во внимание следующие факторы:

- Этот показатель несет лишь часть полезной информации, доступной в исходных мультиспектральных данных изображений ДЗЗ.
- Погрешности, связанные с атмосферными явлениями, облачностью, аэрозолями или дымкой.

- Возможность использования снимков ДЗЗ, полученных только на период сезона вегетации для исследуемого региона. NDVI не несет ценной информации на спутниковых снимках, полученных в осенний и зимний период (особенной для бореальных лесов).
- Почва имеет тенденцию к потемнению во влажном состоянии, поэтому ее отражательная способность напрямую зависит от содержания воды. Если спектральный отклик на увлажнение не совпадает в двух спектральных каналах, может показаться, что значения индекса NDVI исследуемого участка варьируют в результате изменений влажности почвы (осадки или испарение), а не из-за изменений в растительном покрове.
- В связи с тем, что технические характеристики (позиционирование, высота съемки, ширина и форма спектральных диапазонов и т.п.) для каждого сенсора спутниковых систем имеют разные параметры, вегетационный индекс NDVI также может иметь неодинаковые значения, получаемые этими приборами (Nouri et al., 2017).

Почвенный вегетационный индекс (SAVI – *англ.* Soil Adjusted Vegetation Index) служит для минимизации влияния почв («шума» почв), возникающих при оценке растительного покрова (Huete, 1988). Этот вегетационный индекс помимо двух спектральных каналов NIR и red включает также калибровочный фактор L:

$$SAVI = \frac{(1 + L)(NIR - red)}{NIR + red + L} ,$$

L варьирует от 0 до 1. При низкой плотности растительного покрова L = 1, средней – L = 0,5 (наиболее используемый), а при высокой – L = 0.25.

Группа разработчиков спектрорадиометра MODIS среднего разрешения, расположенного на спутниковых системах Terra и Aqua (MODIS vegetation index ...), предложила **усовершенствованный вегетационный индекс** (EVI – *англ.* Enhanced vegetation index):

$$EVI = \left(\frac{NIR - red}{NIR + C1red - C2blue + L} \right) (1 + L) ,$$

где NIR, red, blue – значения отражательной способности в ближней инфракрасной, красной и синей зонах (0.841-0.876, 0.620 – 0.670 и 0.459 – 0.479 мкм); L – поправочный коэффициент, учитывающий влияние почвы местности (*англ.* soil adjusted factor); C1, C2 – коэффициенты, описывающие влияние вклада синей зоны электромагнитного спектра в коррекцию красной за рассеяние атмосферными аэрозолями (*англ.* for atmospheric aerosol scattering). Коэффициенты C1, C2 и L для индекса EVI эмпирически установлены как равные 6.0, 7.5, и 1.0 соответственно (Huete et al., 1997).

Значения вегетационного индекса EVI могут варьировать от –1 до 1. Для растительного (лесного) покрова этот показатель обычно принимает положительные значения в интервале от 0.2 до 0.8, что позволяет эффективно его выявлять на спутниковых изображениях разного пространственного и временного разрешения.

Вегетационный индекс EVI отличается повышенной чувствительностью к участкам местности, содержащей высокую биомассу (фитомассу) на спутниковом изображении. Это дает ему существенное преимущество для дистанционного мониторинга и оценки растительного (лесного) покрова, поскольку в этом случае влияние почвы и атмосферы на изображение минимизировано.

4.3. Определение NDVI в пакете ENVI

При помощи автоматизированного калькулятора индекса растительности

1. В строке инструментов ENVI 5 выбирается команда **Spectral → Vegetation → NDVI**.

2. После запуска модуля в появившемся диалоговом окне **NDVI Calculation Input file** (Определение NDVI входного файла) в списке доступных спутниковых изображений выбирается предварительно подготовленное мультиспектральное изображение. В примере представлен спутниковый снимок Landsat-8, съемка проведена в летний период 2018 года (рисунок 4.7). Нажимаем **Ok**.

3. В появившемся окне **NDVI Calculation Parameters** (Параметры расчета NDVI) в списке доступных каналов выделяются те каналы, которые соответствуют спектральным диапазонам: канал 4 – **Red** и канал 5 – **NIR**. Программа ENVI 5 в автоматическом режиме определяет используемый сенсор (спутник) с последующим автоматическим выбором спектральных каналов (рисунок 4.8).

После нажатия кнопки пуск **Ok** будет сформирована тематическая карта NDVI для спутникового изображения Landsat 8 OLI. В полученном изображении значения NDVI для растительного покрова в лесных областях выражены в светло-серых тонах, но имеют более высокие значения, чем объекты наземного покрова слабо покрытые (травянистый покров) или не покрытые растительностью (населенные пункты) (рисунок 4.9).

Оценить значения вегетационного индекса NDVI можно, используя команду **Cursor Value** (Значение курсора). Для объекта спутникового изображения, на который был наведен курсор, значение NDVI составило 0.6956. Для высоко- и средне-полнотных лесных массивов значение NDVI должно быть не менее 0,6.

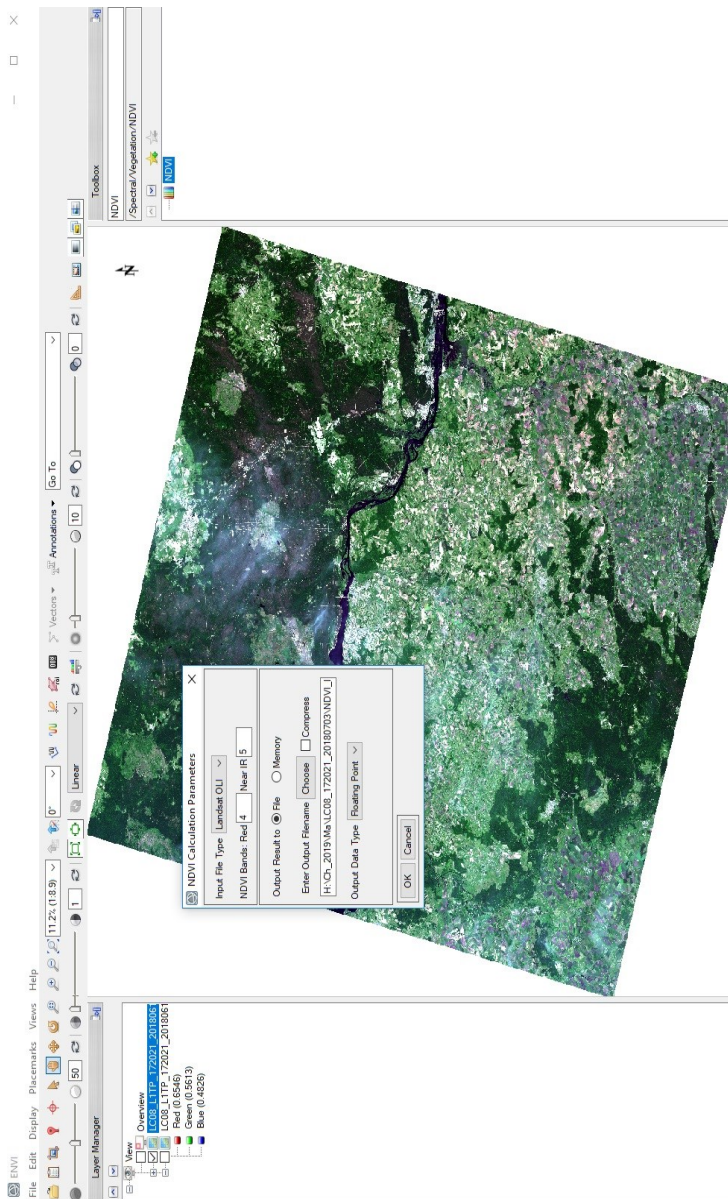


Рисунок 4.8 – Выбор спектральных каналов в диалоговом окне «Параметры расчета NDVI»: 4 – Red (красная зона спектра) и 5 – NIR (ближняя инфракрасная зона спектра)

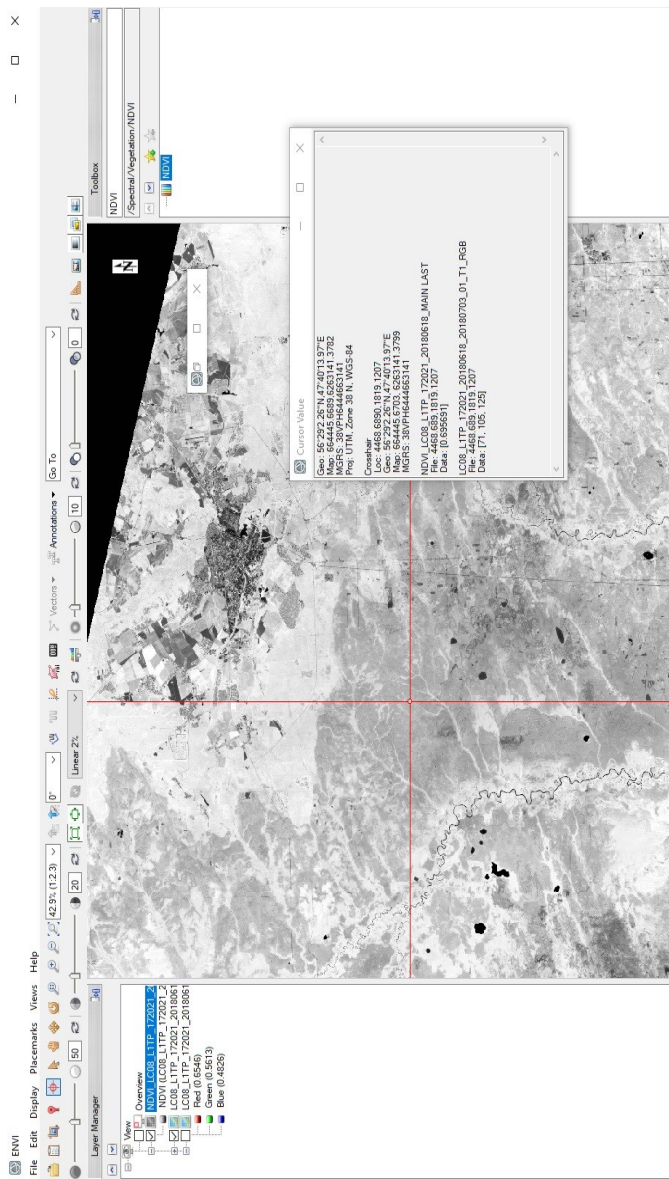


Рисунок 4.9 – Карта NDVI для изображения Landsat 8 на лесную территорию Марий Эл (южнее г. Йошкар-Олы)

Определение NDVI при помощи функции Band Math

При помощи этой пользовательской функции ENVI 5 выполняются различные математические операции с использованием разных источников спектральных данных дистанционного зондирования. Для примера в данном учебном пособии в виде последовательных команд также использовано изображение Landsat-8 OLI 2018 года на территорию Марий Эл.

В строке главное меню **ENVI 5 Toolbox** (Основные инструменты) выбираем команду **Band Math** (Математические операции с каналами). В открывшемся диалоговом окне в поле **«Enter an expression»** (Введите выражение) вводится формула расчета вегетационного индекса NDVI на исследуемую территорию – **$(\text{float}(\text{B4}) - \text{float}(\text{B3})) / (\text{float}(\text{B4}) + \text{float}(\text{B3}))$** . Далее кнопкой **«Add to list»** (добавить в перечень) подтверждаем команду (рисунок 4.10).

После ввода формулы расчета NDVI в ENVI 5 откроется диалоговое окно **Variables to Band Pairings** «Переменные в пары каналов». В окне **Available Band List** (Список доступных каналов) выбираем канал **Near Infrared (NIR** – ближний инфракрасный) (0.8646) сцены Landsat-8 OLI (рисунок 4.11).

Таким же образом в диалоговом окне программы ENVI **Available Band List** выбираем спектральный канал **RED** (0,6546). Далее выводим выходной файл спутникового изображения, введя его название в окне **Enter Output Filename**, командой **ОК** (рисунок 4.12).

В результате всех этих действий получаем итоговое изображение индекса NDVI (рисунок 4.13). Для более наглядной цветовой визуализации итогового изображения NDVI используется функция **«Change Color Table»** (Таблица изменения цвета) (рисунок 4.14).

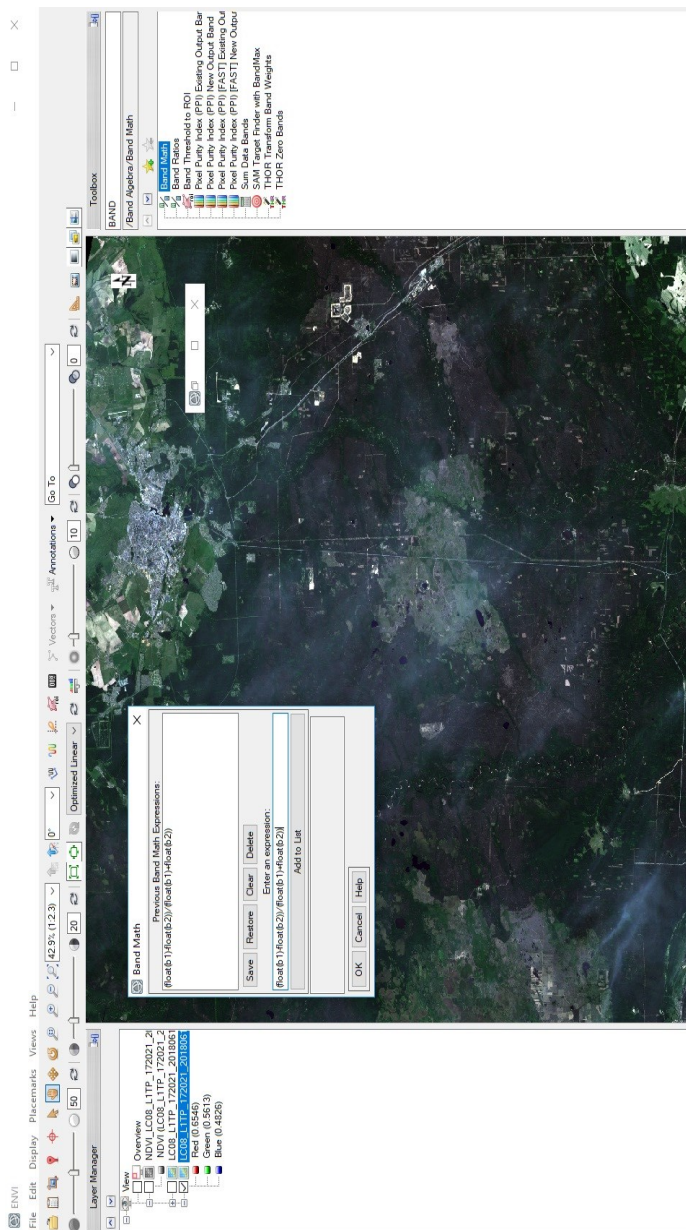


Рисунок 4.10 – Определение индекса NDVI при помощи команды ENVI Band Math

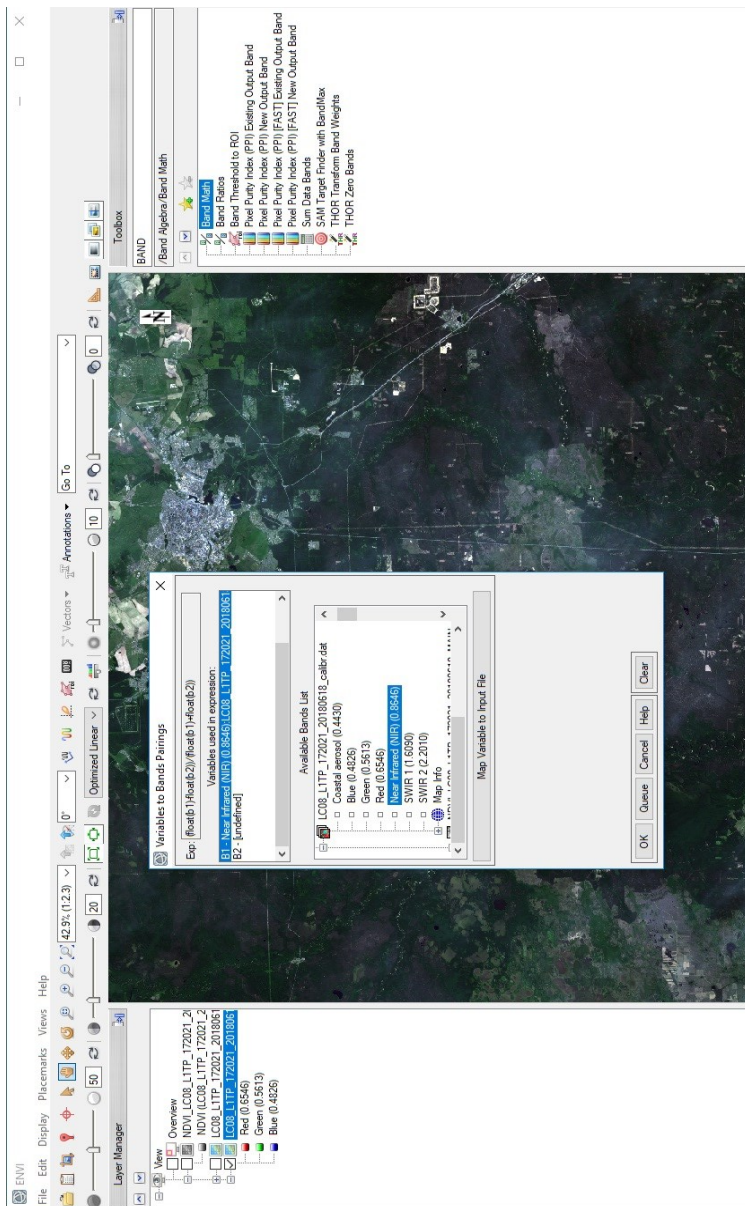


Рисунок 4.11 – Загрузка канала NIR в Band Math

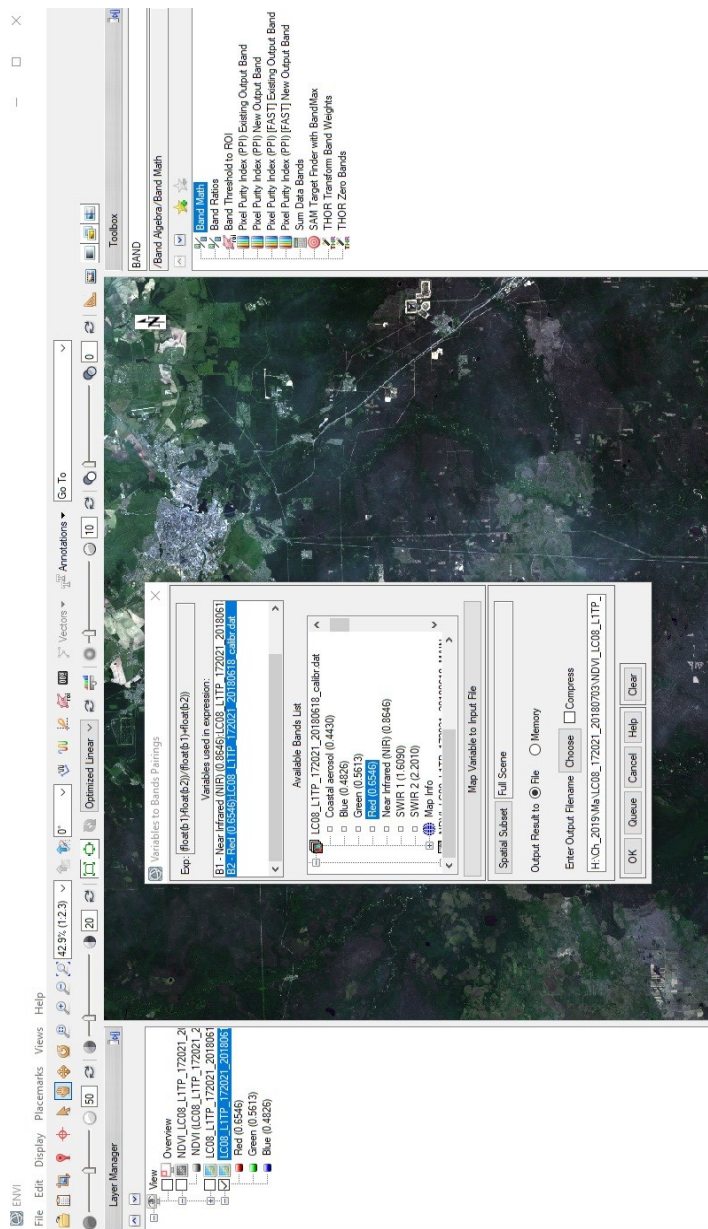


Рисунок 4.12 – Загрузка канала RED в Band Math

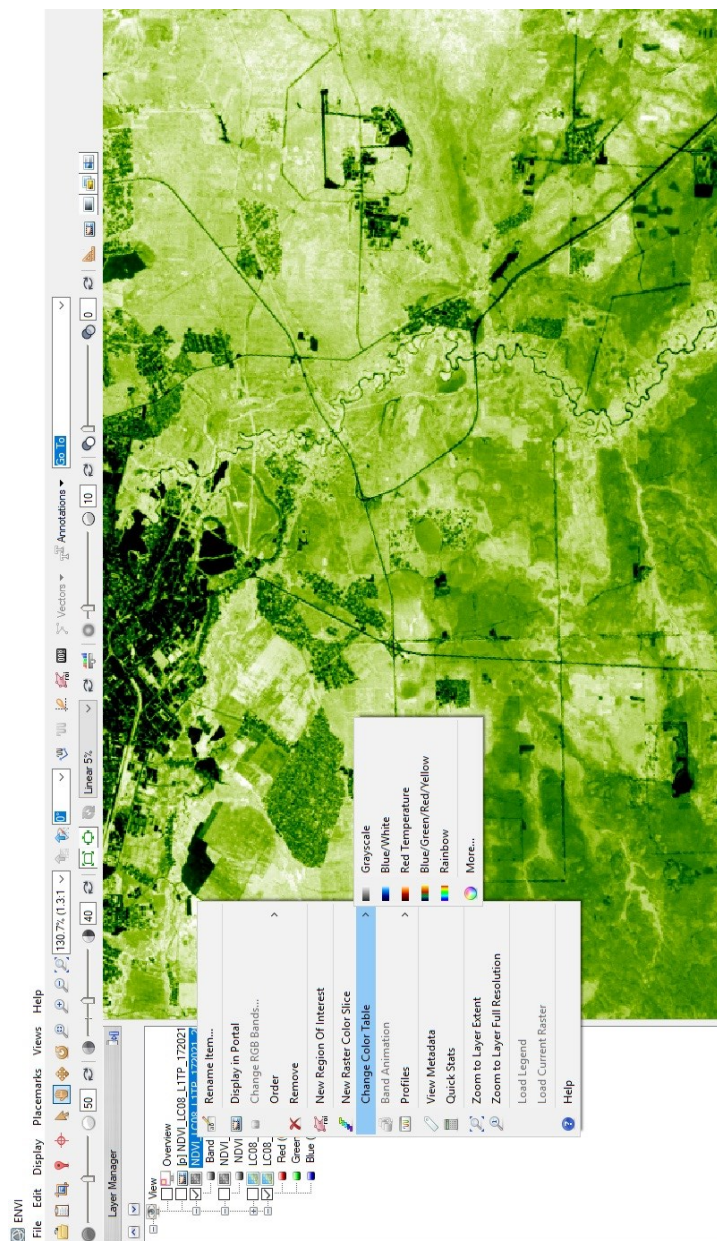


Рисунок 4.14 – Визуализация итогового изображения NDVI в цвете

4.4. Преобразование Tasseled Cap

Преобразование *Tasseled Cap* (Колпачок с кисточкой) является полезным инструментом в пакете ENVI для сжатия спектральных данных до трех основных компонентов: яркость (brightness), уровень зелёного (greenness) и влажность (wetness). Изначально разработанное для исследования и оценки сельскохозяйственных культур в спектральном пространстве признаков, преобразование Tasseled Cap (TC) стало широко использоваться в научных исследованиях по мониторингу и оценке растительного (лесного) покрова (Christ, 1985; Healey et al., 2005; Курбанов и др., 2015a).

Преобразование Tasseled Cap можно рассматривать как обобщенный вариант метода главных компонент, который позволяет выполнять переход из пространства измерений спектральных характеристик объектов в пространство признаков, связанных со свойствами заданного класса объектов. Пространство признаков (brightness, greenness, wetness) при этом не содержит в себе новой информации об объектах, но позволяет наилучшим образом различать классы наземного покрова (Курбанов и др., 2015b).

В преобразованном изображении BGW каждому типу наземных объектов соответствует определенный цвет (рис. 4.15). Например, лиственные породы представлены более светлым тоном «зелёности» (уровень зелености), чем хвойные насаждения. Для не покрытых растительностью земель характерны значения высокой яркости, низкий уровень зелёного и влажности. Класс дерева обычно характеризуется комбинацией средних показателей яркости, высокими значениями уровня зелёного и влажности.

Для проведения процедуры нормализации (выравнивания) значений пикселей на полученных изображениях BGW обычно используются следующие формулы:

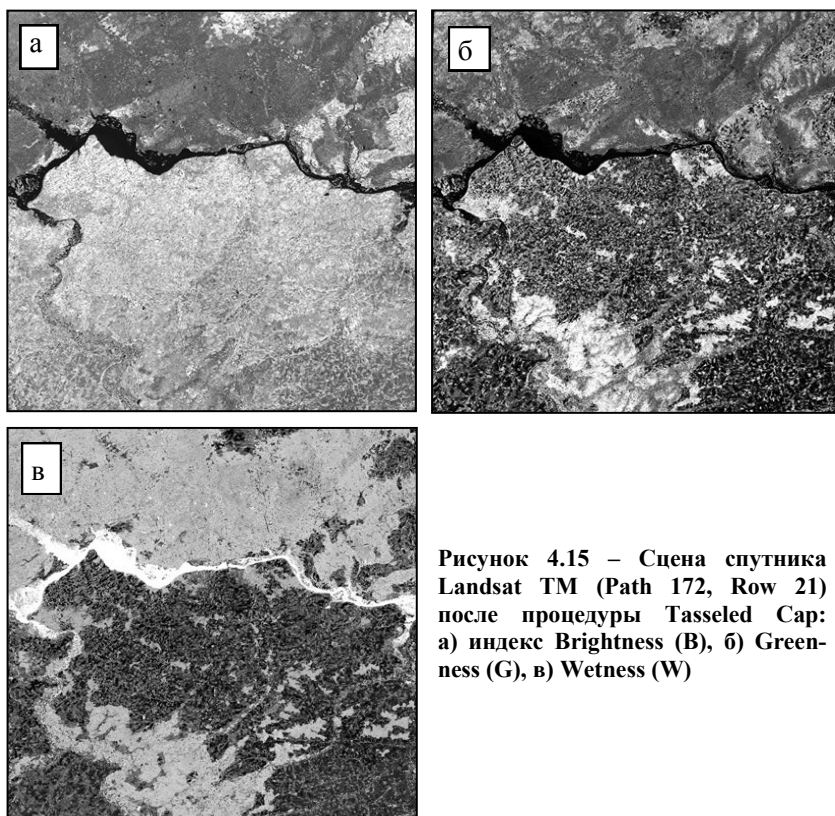


Рисунок 4.15 – Сцена спутника Landsat TM (Path 172, Row 21) после процедуры Tasseled Cap: а) индекс Brightness (B), б) Greenness (G), в) Wetness (W)

$$Br = (B - B_{\mu})/B\sigma;$$

$$Gr = (G - G_{\mu})/G\sigma;$$

$$Wr = (W - W_{\mu})/W\sigma.$$

где Br , Gr , Wr – нормализованные значения индексов BGW; B_{μ} , G_{μ} и W_{μ} – средние значения индексов BGW; $B\sigma$, $G\sigma$, $W\sigma$ – стандартные среднеквадратические отклонения значений показателей BGW.

Далее все три растровые слоя объединяются в одно композитное Tasseled Cap. Преобразование выполняется с использованием соответствующих коэффициентов, которые рассчитываются для каждого сенсора (таблица 4.1).

Таблица 4.1 – Коэффициенты преобразования Tasseled Cap (TCT) для изображений Landsat 8 Oli (Baig et al., 2014)

TCT	(Blue) Канал 2	(Green) Канал 3	(Red) Канал 4	(NIR) Канал 5	(SWIR1) Канал 6	(SWIR2) Канал 7
Brightness	0.3029	0.2786	0.4733	0.5599	0.508	0.1872
Greenness	-0.2941	-0.243	-0.5424	0.7276	0.0713	-0.1608
Wetness	0.1511	0.1973	0.3283	0.3407	-0.7117	-0.4559

На рисунке 4.16 показан пример использования процедуры Tasseled Cap для оценки нарушенности лесного насаждения (Воробьев и др., 2019б). Для этого было получено распределение индекса нарушенности (DI - англ. *Disturbance Index*) в 3-мерном пространстве преобразованного изображения ТС.

Значения пикселей снимка Landsat, расположенные выше определенной плоскости (границы), представляют собой ненарушенные участки, а расположенные ниже – наоборот нарушенные (см. рисунок 4.16). Такое распределение DI свидетельствует о том, что значения индекса яркости на участках с недавно нарушенным лесным покровом имеют более высокие значения, а индексы уровня зелености и влажности соответственно более низкие значения.

4.4.1. Пример преобразования Tasseled Cap в ENVI 5

Перед трансформацией изображение спутника Landsat-8 OLI должно пройти радиометрическую и атмосферную коррекцию. В окне **Toolbox** (Основные инструменты) выберите **File > Open Image File** (Файл> Открыть файл изображения). В появившемся окне выделить нужный файл изображения (в нашем случае *Reflectance.img*) и открыть его.

В диалоговом окне **ENVI Toolbox** выбрать уже известный вам модуль **Band Math**, в котором в поле «Enter an expres-

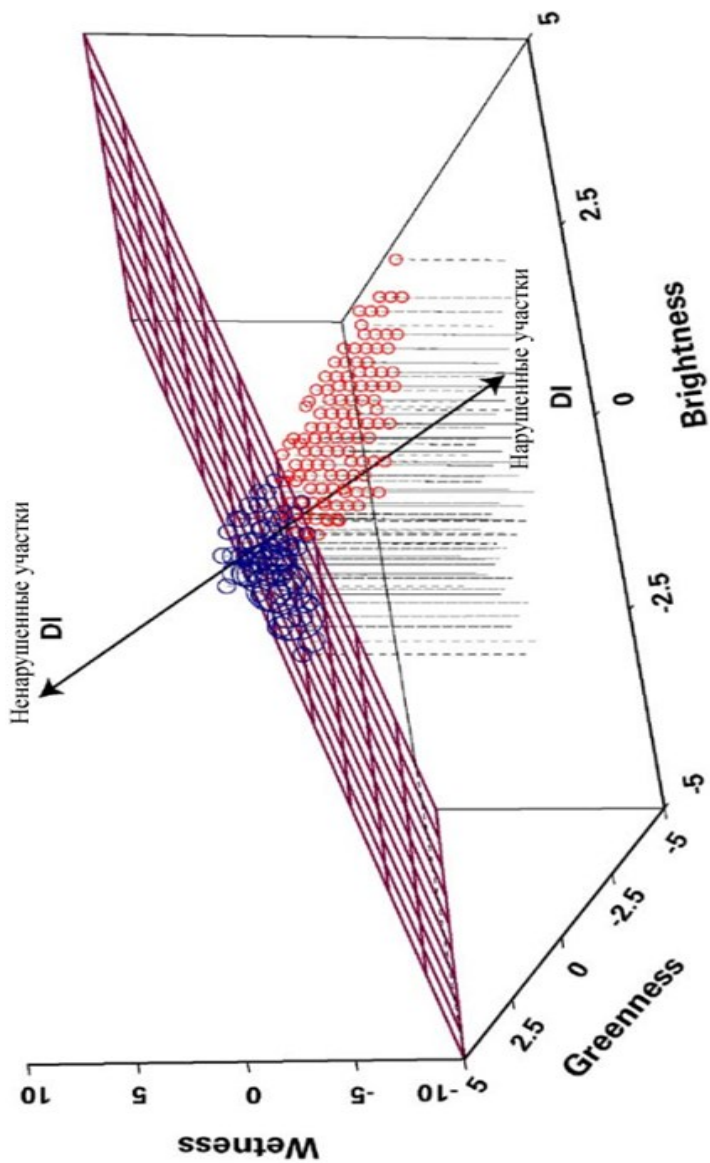


Рисунок 4.16 – Распределение индекса нарушения DI в трехмерном пространстве признаков Tasseled Cap. Пиксели нарушенных участков представлены красным цветом, ненарушенные – синим

sion» (Введите выражение) поочередно вводятся уравнения (выражения) Tasseled Cap с соответствующими коэффициентами, приведенные в таблице 4.2 (рисунок 4.17). После ввода уравнения нажмите **«Ok»**.

В результате этой команды получают три промежуточных растровых слоя, которые будут использованы для проведения последующей процедуры выравнивания (нормализации) мультиспектрального изображения на основе их статистических данных. Работа в ENVI проводится с каждым из этих изображений (рисунок 4.18).

Процедура нормализации трансформированных изображений также проводится в диалоговом окне **Band Math**. Статистики данных этих растровых слоев определяются с помощью функции Statistics в ENVI.

4.5. Нормализованный индекс гарей

Оперативное выявление площадей и степени повреждения древостоев лесными пожарами является важным элементом при принятии решений по их восстановлению и оценке сукцессии растительного покрова на нарушенных территориях. Одним из наиболее распространённых направлений дистанционной оценки площадей гарей и степени повреждения растительного покрова после пожара является использование различных вегетационных индексов, полученных с разновременных спутниковых изображений.

Нормализованный разностный индекс растительности (NDVI) часто используется исследователями при работе как с единовременными снимками, так и разновременными изображениями (до и после пожара) (Hudak et al., 2007; Jose et al., 2012). Значительно реже при оценках гарей применяются индексы гарей BAI (*англ.* Burnt Area Index) и почвенный вегетационный SAVI (*англ.* Soil Adjusted Vegetation Index) (Epting et al., 2005; Wittenberg et al., 2007).

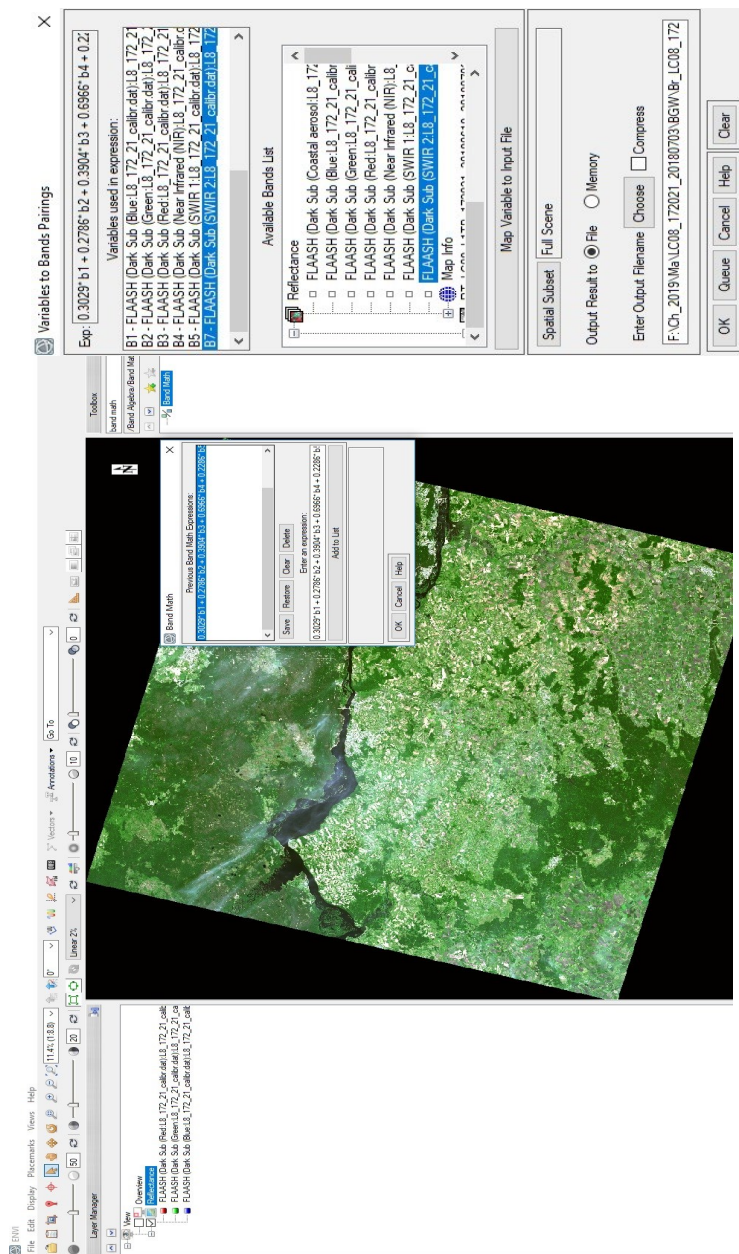


Рисунок 4.17 – Ввод данных и уравнений для Tasseled Cap

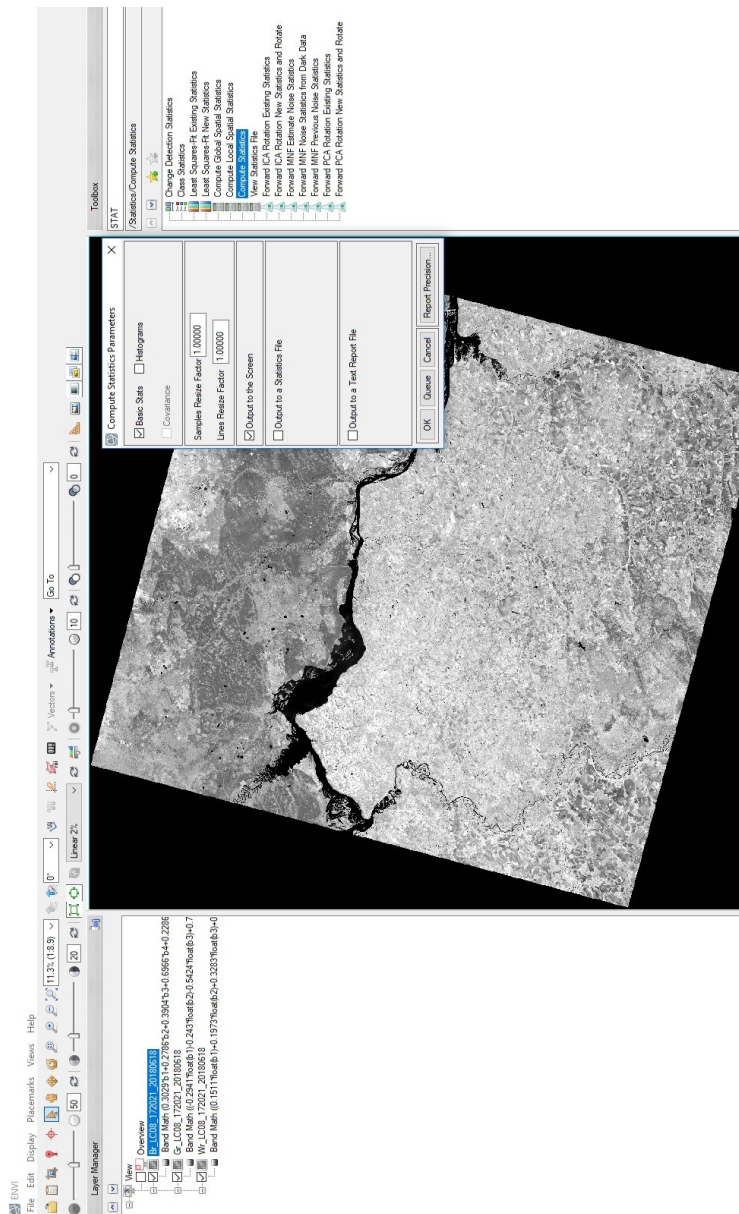


Рисунок 4.18 — Преобразование Tasseled Cap на основе статистики растровых данных

В окне **ENVI Toolbox** выбрать **Statistics** (Статистика) > **Compute Statistics** (Вычислить статистику) (см. рисунок 4.18). Далее в диалоговом окне выбирается файл растрового слоя, для которого необходимо рассчитать статистики (в нашем примере файл Br_LC08_172021_20180618.img), и нажимается **ОК**. В диалоговом окне **Compute Statistics Parameters** (Вычислить параметры статистик) выбираем **Basic Stats** (Базовую статистику), **Histograms** (Гистограммы) и **Output to the screen** (Вывод данных на экран).

В комплексной программе ENVI 5 при проведении преобразования Tasseled Cap также есть опции **Output to the Statistics File** (Вывод в файл статистики) и **Output to a Text Report File** (Вывод файл текстового отчета). После нажатия команды **ОК** в новом диалоговом окне (рисунок 4.19) появляются необходимые для последующей нормализации статистические данные исследуемого растрового слоя изображения Br ТСТ (Яркость): минимальное и максимальное, среднее и среднеквадратическое отклонение.

Нормализация преобразованных изображений Br, Gr и Wг также проводится командой **Band Math** (рисунок 4.20). В поле **Enter an expression** вводится математическое выражение

$$(\text{float}(b1) - 0.023867)/0.018361,$$

где $\text{float}(b1)$ – функция с плавающей точкой для B1, 0.023867 – среднее значения растрового слоя Br (Яркость), а 0,018361 – среднеквадратическое отклонение (см. рисунок 4.20).

После ввода этого выражения в основное окно **Band Math – Previous Band Math Expression** (Предыдущее математическое выражение канала) нажатием команды **Ок** запускается процедура нормализации растрового слоя Br (Яркость).

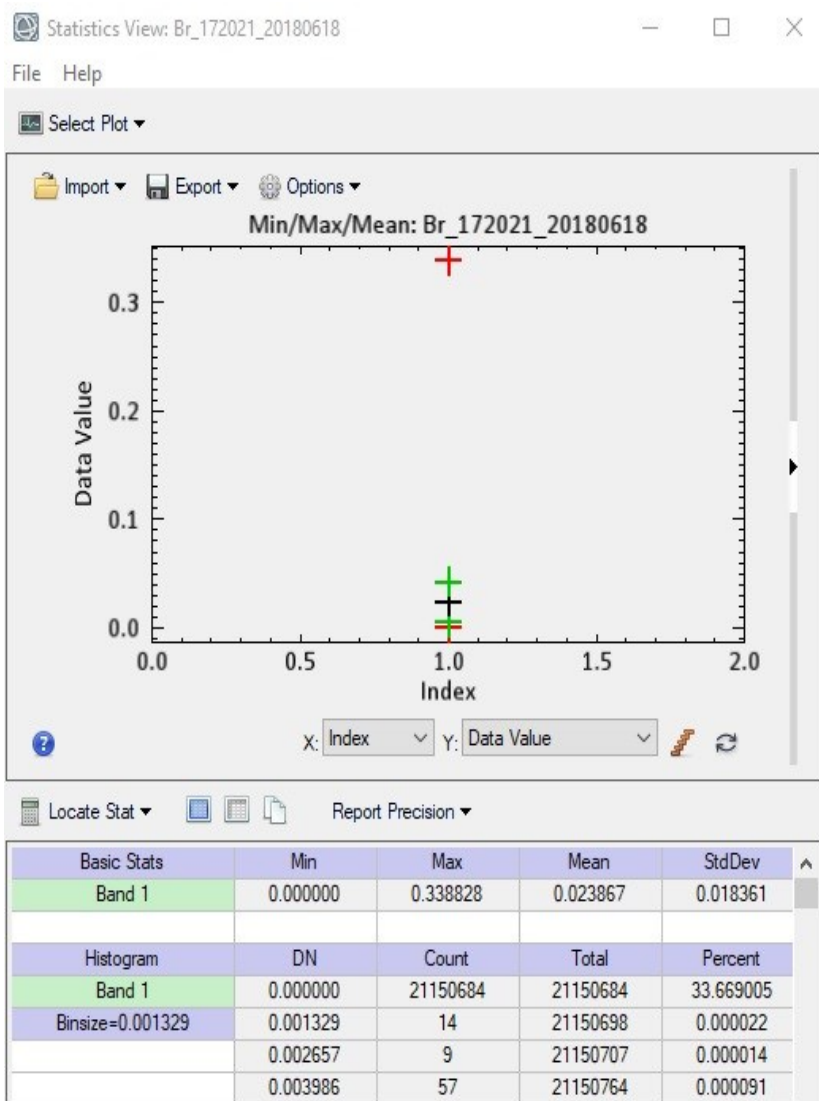


Рисунок 4.19 – Статистики и гистограмма растрового слоя Br (Яркость) после прохождения процедуры Tasseled-Cap

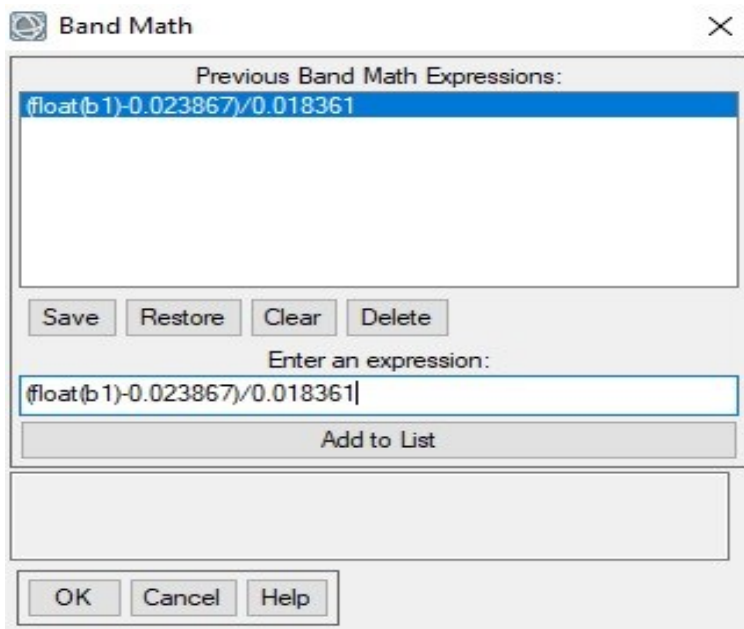


Рисунок 4.20 – Нормализация изображения ТС Вг (Яркость) в диалоговом окне Band Math

Для растровых слоев Gr и Wg процедура нормализации выполняется аналогичным образом. В результате получают нормализованные растровые слои Br, Gr и Wg (рисунок 4.21).

После этого все растровые слои готовы для объединения (синтеза). Этот процесс проводится с помощью функции **ENVI Layer Staking** (Объединения слоев) (рисунок 4.22). Для этого левой кнопкой компьютерной мыши необходимо перейти к диалоговому окну **Layer Stacking Parameters** (Параметры укладки слоев) (см. рисунок 4.22). При этом **Output Map Projection** (Проекция выходной карты) установлена в произвольном порядке. На этом этапе нет необходимости менять настройки, если проекция определяется по умолчанию.

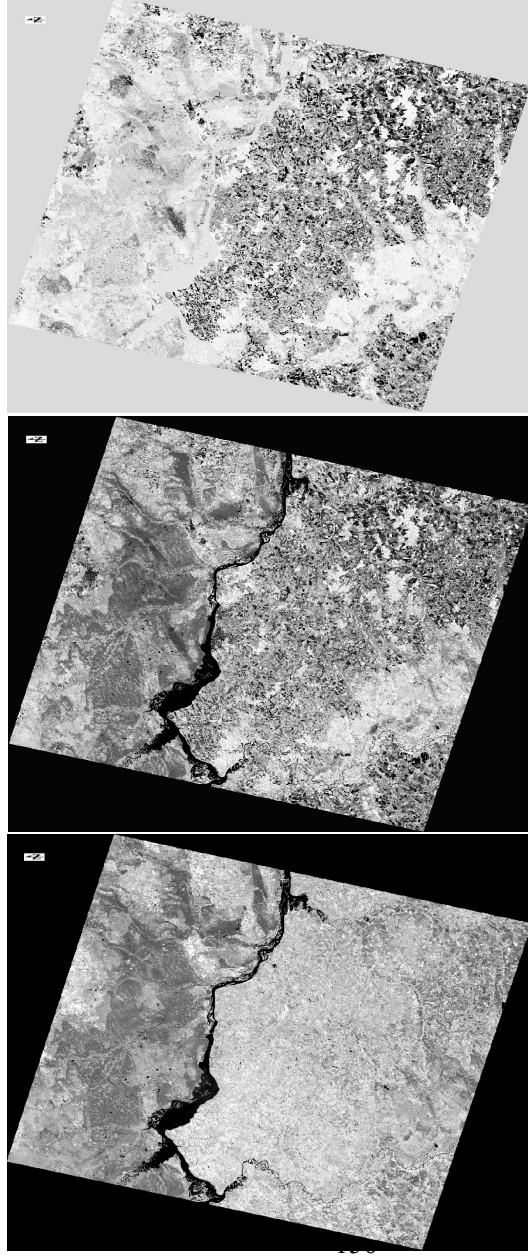


Рисунок 4.21 – Преобразованные растровые слои после процедуры Tasseled-Cap: слева направо Bg Gr и Wg

Левой кнопкой мыши выполняется команда **Import File** (Импорт файла), и далее открываем диалоговое окно **Layer Stacking Input File** (Ввод стека слоев). В следующем окне **Select Input File** (Выбор входного файла) поочередно выделите все три слоя (см. рисунок 4.22). При этом в нашем примере проекция растрового слоя автоматически меняется на UTM (Universal Transverse Mercator – *англ.* Универсальная поперечная проекция Меркатора). После нажатия команды **Ok** начнется запуск процесса преобразования, по завершении которого вновь полученное изображение появится в окне **Layer Manager** (Управления слоями) (рисунок 4.23) и в диалоговом окне **Data Manager** (Управление данными).

В последние годы среди исследователей также широкое применение находит композитный индекс гарей (CBI – *англ.* Composite Burn Index) и нормализованный индекс гарей (NBR – *англ.* Normalized Burn Ratio) (Kasischke et al., 2008; Hoscilo et al., 2013). Оценка степени повреждения лесов пожарами по разновременным спутниковым снимкам MODIS на основе коротковолнового вегетационного индекса SWVI (*англ.* Short-Wave Vegetation Index) предложена учеными института космических исследований РАН (Барталев и др., 2012).

Геологическая служба США (USGS) и Служба национальных парков (*англ.* National Park Service) разработали индекс степени нарушенности сгоревшей территории на основе спектральных каналов Landsat TM / ETM 4 (ближний инфракрасный диапазон) и 7 (средний инфракрасный диапазон), который называется нормализованным коэффициентом гарей (NBR). Он представляет собой разность спектральных отражений в ближнем и коротковолновом инфракрасных каналах, нормализованную на их сумму:

$$NBR = (TM4 - TM7)/(TM4 + TM7),$$

где TM4 и TM7 – спектральные значения двух каналов спутника Landsat в диапазоне (0,75-0,90 мкм) и (2,09-2,35 мкм) соответственно.

Биофизической предпосылкой для применения этого индекса при оценках гарей является сопоставление отражений от неповрежденной и пройденной огнем растительности по двум разным временным изображениям. После пожара в 4-м спектральном канале (инфракрасной зоне спектра) наблюдается снижение отражения светового потока, в то время как 7-й канал показывает более высокие значения и вариацию по сравнению с другими каналами.

Тем самым каналы Landsat 4 и 7 обеспечивают лучший контраст между здоровой и выжженной растительностью. Разница между этими двумя спектральными каналами демонстрирует хорошие статистические оценки лесных пожаров площадью более чем 200 га.

Разностный dNBR вычисляется путем вычитания из PreNBR, полученной до пожара, значения PostNBR, полученной на территорию гари после пожара:

$$\text{dNBR} = \text{PreNBR} - \text{PostNBR}.$$

Обычно высокие значения dNBR свидетельствуют о тяжелых последствиях пожаров на растительность (полное выгорание в результате верховых пожаров). Периметр пожара определяется с помощью классификации (постклассификации) в пакете ENVI. Затем полученный полигон периметра исследуемой гари экспортируется в формат шейп (Shape file) для использования в географической информационной системе ГИС.

4.5.1. Пример расчета NBR и dNBR в ENVI

Данные спутника Landsat, использованные в этом примере, были получены на территорию гарей, возникших в результате лесных пожаров в Марий Эл в 2010 г. В результате пожаров бы-

ло уничтожено около 102 тыс. га лесных земель (Воробьев и др., 2012; Курбанов и др., 2013; Kurbanov et al., 2017).

Разновременные снимки должны быть скорректированы по местности и геометрически выравнены. Также предварительно проводится радиометрическая и атмосферная коррекция.

В программе ENVI 5 необходимо загрузить два разновременных изображения, полученных на территорию Кокшайского лесничества РМЭ до и после пожара. В нашем примере это фрагменты снимков Landsat ETM+ 2009 года и Landsat TM 5 2011 года на исследуемую территорию (рисунок 4.24). Оба файла и изображения будут видны в диалоговом окне **Layer Manager** (Менеджер слоев). Для лучшей визуализации изображений можно применить процедуру контрастного растяжения.

Следующим шагом является вычисление нормализованного коэффициента гарей (NBR) для каждого из изображений спутниковой системы Landsat. На панели инструментов ENVI откройте **Band Ratio** (Соотношение каналов) и дважды щелкните на команду **Band Math**. В диалоговом окне **Band Math** в поле **Enter an expression** (Введите выражение) вводим формулу $(float(b4 - b7) / (b4 + b7))$ (выражение float - операция с плавающей запятой) (рисунок 4.25 а). После нажатия **ОК** откроется диалоговое окно **Variables to Bands Pairings** (Переменные для парных каналов) (рисунок 4.25 б).

В окне Variables used in expression выберите B4, а затем в поле Available Bands List (Список доступных каналов) выберите канал TM Meta Band 4 (0.8250 мкм) (фрагмент изображения Landsat 2009 года). Далее аналогичные действия проводятся для TM Meta Band 7 (2.2200 мкм) из этого же файла. После того, как обе переменные группы будут объединены, появится поле Enter Output Result (Введите готовый результат), в которое введите имя выходного файла (в нашем примере NBR_Landsat_2011) и нажмите ОК. Результат операции отразится в менеджере слоев.

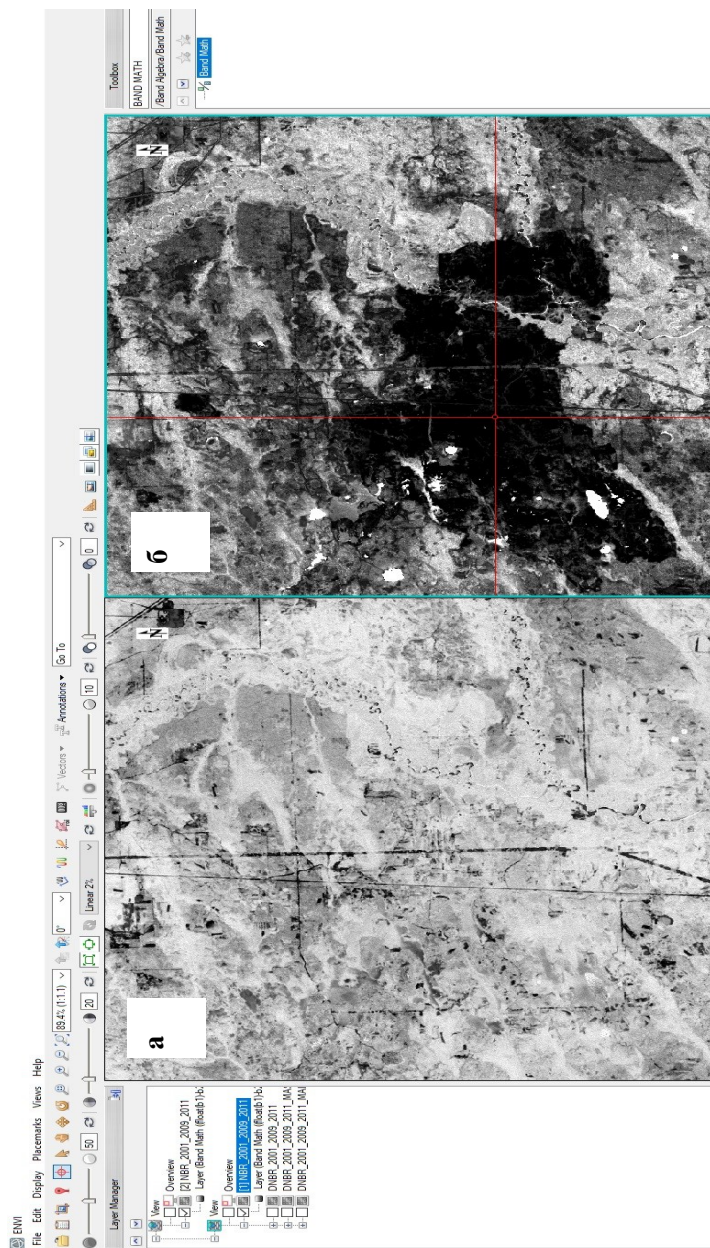


Рисунок 4.24 – Фрагменты изображений: а) Landsat-7 2009 г. до пожара; б) Landsat-5 2011 г. после пожара 2010 г.

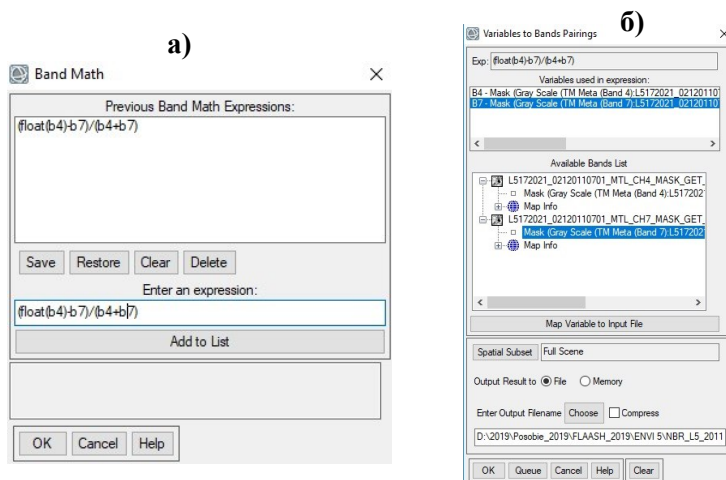


Рисунок 4.25 – Определение NBR для Landsat TM 2011: а) введение формулы расчета NBR, б) работа с парными каналами

В результате проведенных действий в пакте ENVI 5 нами получены два растровых слоя NBR разновременных изображений спутника Landsat 2009 и 2011 гг. На индексном изображении Landsat 2011 г. четко выделяются контуры лесных гарей 2010 г. темного цвета (рисунок 4.26 б). Для дальнейшей работы по оценке гарей можно объединить итоговые слои NBR в один файл путем проведения процедуры **Layer Staking** (Объединение слоев).

Для определения **разностного нормированного коэффициента гарей (dNBR)** дважды щелкните на команду **Band Math** на панели инструментов **Toolbox ENVI**. В открывшемся диалоговом поле **Enter an expression** (Введите выражение) набираете $\text{float}(b1) - \text{float}(b2)$ и переводите это выражение в окно **Previous Band Math Expression** (Предыдущее математическое выражение). Далее нажмите **OK** (рисунок 4.27а).

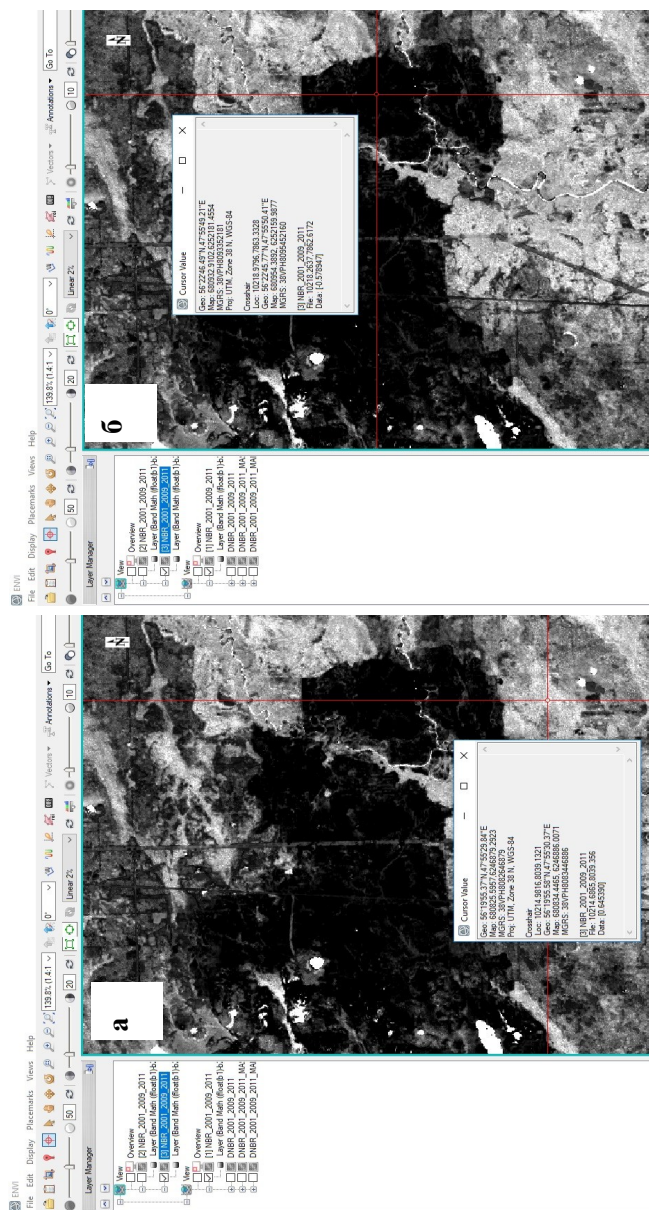
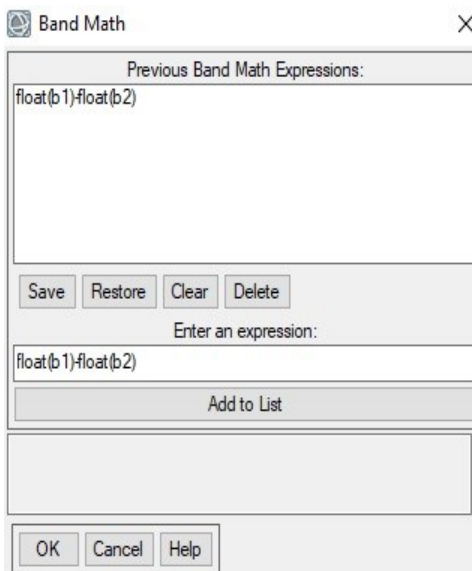


Рисунок 4.26 – Фрагмент растрового изображения NBR для Landsat 5 2011 г.: а) значения NBR для лесных участков, б) для участка гары

а)



б)

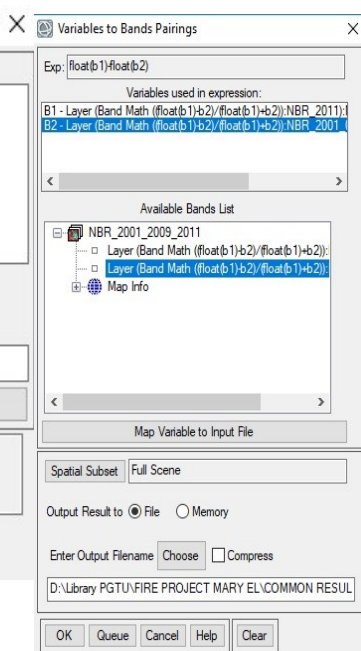


Рисунок 4.27 – Расчет dNBR для Landsat 2009 и 2011 г.:

а) ввод математического выражения, б) работа со слоями

В появившемся диалоговом окне **Variables to Bands Pairings** (Переменные для попарных каналов) в окне **Variables used in expression** (Переменные, используемые в выражении) выделите слой b1. Далее в поле **Available Bands List** (Список доступных каналов) выберите слой NBR за 2011 г. из ранее полученного методом **Layer Stacking** файла. В нашем примере из комбинированного файла NBR_2001_2009_2011.tif выбирается слой 2011 года (рисунок 4.27б). Аналогичное действие проводится для слоя b2.

Для сохранения и последующей визуализации полученных результатов в поле **Enter Output Filename** (Введите имя выходного файла) наберите имя итогового файла. Например: dNBR_2001_2009_2011.tif) (см. рисунок 4.27 б).

Для большей наглядности полученного изображения и его последующего анализа правой кнопкой мыши нажмите на название итогового файла dNBR в **Layer Manager** (Диспетчере слоев) и выберите команду **Change Color Table** «Изменить таблицу цветов» → **Blue/Green/Red/Yellow**. В итоге получается цветное изображение dNBR, которое лучше передает картину границ гарей на участке исследования (рисунок 4.28).

В результате выполнения всех шагов, описанных в данном разделе учебного пособия, мы получаем три важных изображения NBR (рисунок 4.29) до и после лесного пожара, а также их разницу dNBR(рисунок 4.30). Эти данные являются основой для дальнейшей аналитической работы по оценке степени повреждения лесного покрова на исследуемой местности и выработке рекомендаций для производства.

Все дальнейшие шаги по работе с итоговым изображением dNBR (классификация, выделение границ гарей, анализ степени повреждения древостоев, картографирование, статистический анализ данных с применением ковариационных матриц, векторизация изображений и т.п.) в виде отдельных примеров представлены в последующих разделах данного учебного пособия.

Более детальное описание методики работ со снимками разного пространственного разрешения (Landsat, Sentinel, Канопус и Ресурс) для оценки лесных гарей, степени повреждения лесных насаждений пожарами, процессов лесовозобновления приводится в публикациях авторов учебного пособия, приведенных в библиографическом списке.

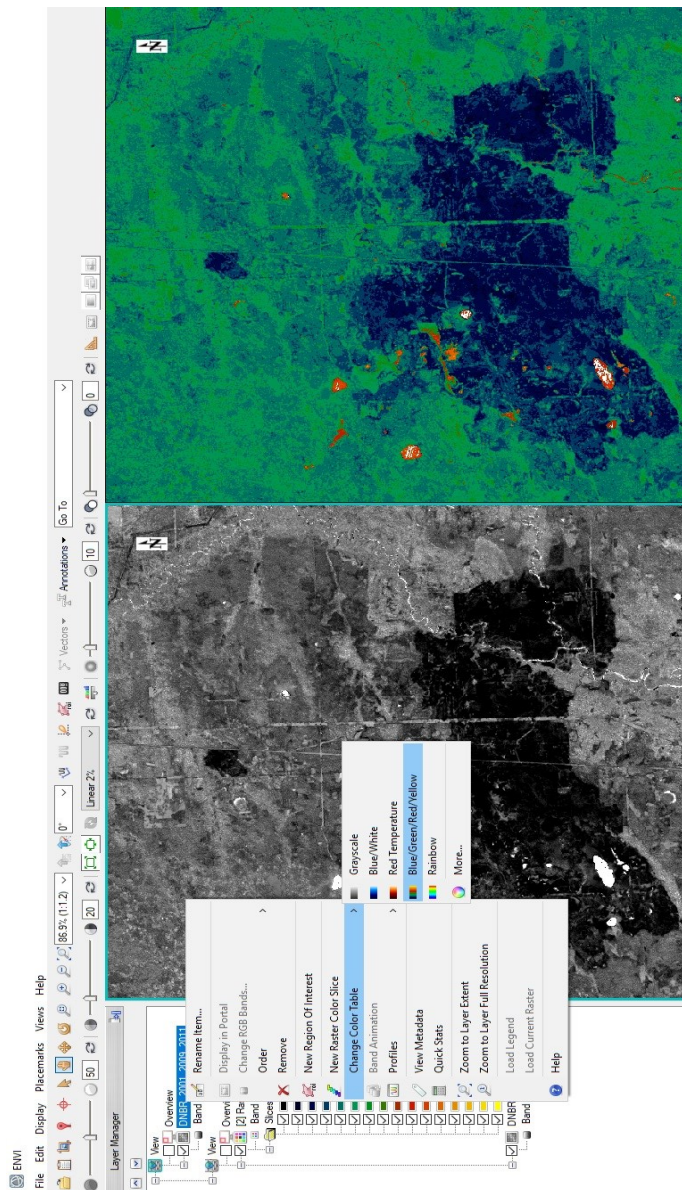


Рисунок 4.28 — Использование таблицы цветов для перевода черно-белого фрагмента изображения dNBR в цветной композит

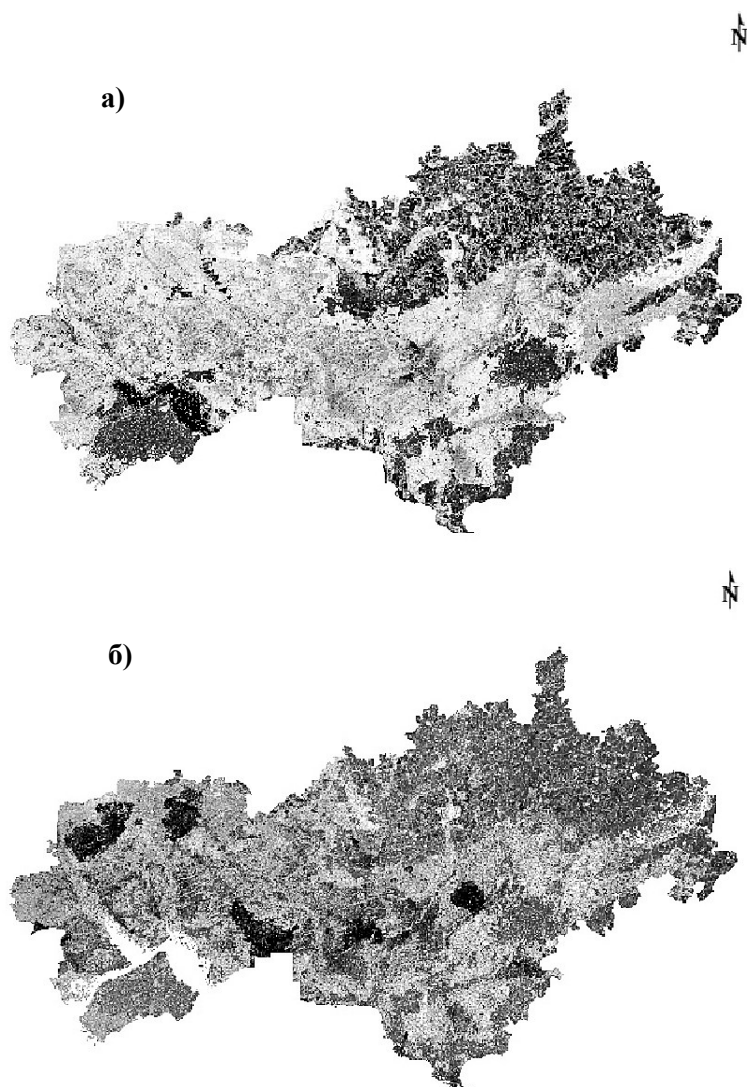


Рисунок 2.29 – Изображения NBR на карте РМЭ, полученной по снимкам Landsat: а) 2009 г., до пожаров; б) 2011 г., после лесных пожаров 2010

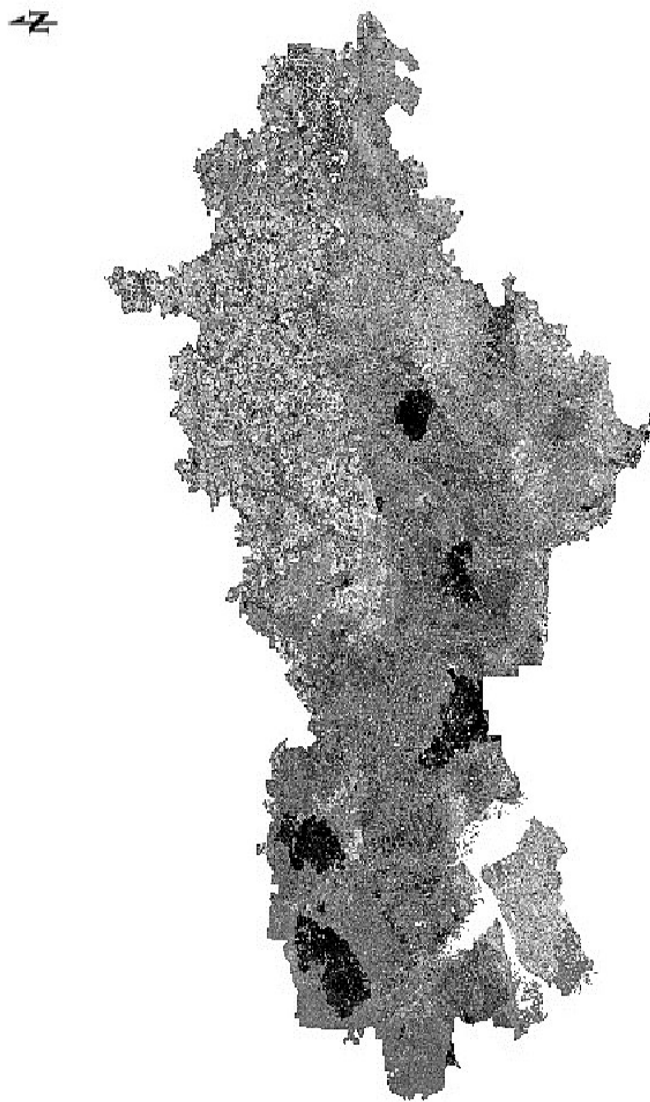


Рисунок 4.30 – Изображение dNBR на карте РМЭ, полученной по снимкам Landsat за 2009 и 2011 г.

|| Контрольные вопросы по разделу 4

1. В какой зоне спектра происходит максимальное поглощение и отражение света растительным покровом?
2. Какая часть электромагнитного спектра используется в ДЗЗ для дешифрирования лесного полога?
3. Приведите описание вегетационного индекса. Какие основные вегетационные индексы используются в ДЗЗ при оценке лесного покрова?
4. Приведите примеры использования вегетационных индексов в лесном хозяйстве и природопользовании при работе с данными ДЗЗ.
5. В каких случаях при работе с изображениями ДЗЗ используется преобразование Tasseled Cap? Как определяются коэффициенты преобразования Tasseled Cap?
6. С какой целью и как определяется нормализованный индекс гарей? Что является биофизической предпосылкой для его применения?
7. Опишите последовательность действий в комплексном пакете ENVI 5 при определении нормализованного индекса гарей по снимкам среднего пространственного разрешения.

5|| КЛАССИФИКАЦИЯ ИЗОБРАЖЕНИЙ

Зрение человека имеет ключевое значение в процессе визуальной интерпретации (дешифрировании) ДЗЗ с целью извлечения информации из анализируемых изображений. Несмотря на то, что значительная работа по визуализации и вычислениям больших массивов данных выполняются компьютерами, сам процесс интерпретации осуществляется непосредственно дешифровщиком (аналитиком). При этом дешифровщик задает определенные требования программе для выполнения соответствующего дешифрирования.

В основе принципа классификации изображения заложены индивидуальные спектральные характеристики различных объектов на поверхности Земли. Классификация является одним из широко используемых методов интерпретации цифровых изображений. Другие технологии интерпретации ДЗЗ включают автоматическое распознавание объектов наземного покрова, реконструкцию сцен на основе трехмерных моделей объектов местности и т.п. Результат классификации (оценка точности) изображения обычно проверяется путем сравнения с данными, полученными непосредственно на исследуемой местности.

5.1. Принцип классификации изображения

Цифровое изображение представляет собой двумерный массив данных (пикселей). В каждом пикселе хранится информация об энергии светового потока, отраженной или излученной из соответствующей области поверхности Земли. ***Классификацией цифрового изображения*** принято называть процесс разбиения пикселей изображения на тематические классы. Обычно каждый пиксель рассматривается как самостоятельная единица, состоящая из значений различных спектральных каналов. Сравнивая пиксели между собой и других известных объектов на местности, можно выделить группы сходных пикселей (кластеров) в

соответствующие классы, представляющие собой практический интерес для специалистов в области ДЗЗ. Такие классы образуют соответствующие области на изображении, которые после его классификации представляют собой мозаику участков, различающихся по цвету или символам (рисунок 5.1).

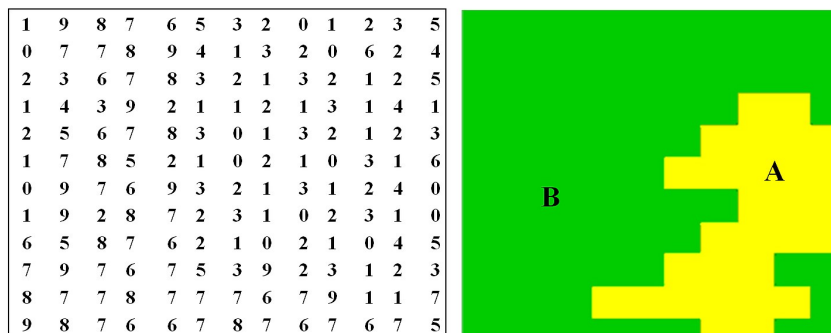


Рисунок 5.1 – Цифровое и классифицированное изображение. Классифицированное изображение (справа) получено на основе цифрового изображения путем группировки пикселей, имеющих сходные спектральные яркости. Класс А сформировался из ярких пикселей (6, 7, 8, 9), а класс В из темных (0, 1, 2, 3, 4). Обычно при классификации снимков ДЗЗ получается больше классов, а также используются несколько их спектральных каналов

В ДЗЗ принято проводить оценку распределения классифицированных пикселей изображений в двумерном евклидова пространстве данных. Как правило, массивы цифровых данных распределяются по спектральным каналам в *пространстве спектральных признаков (объектов)*. Для радиометрического разрешения 8 бит распределение значений пикселей (DN – *англ. Digital numbers*) изображения находится в диапазоне 0-255 единиц (рисунок 5.2).

Такое распределение в пространстве признаков позволяет визуально выделять тематические классы объектов местности

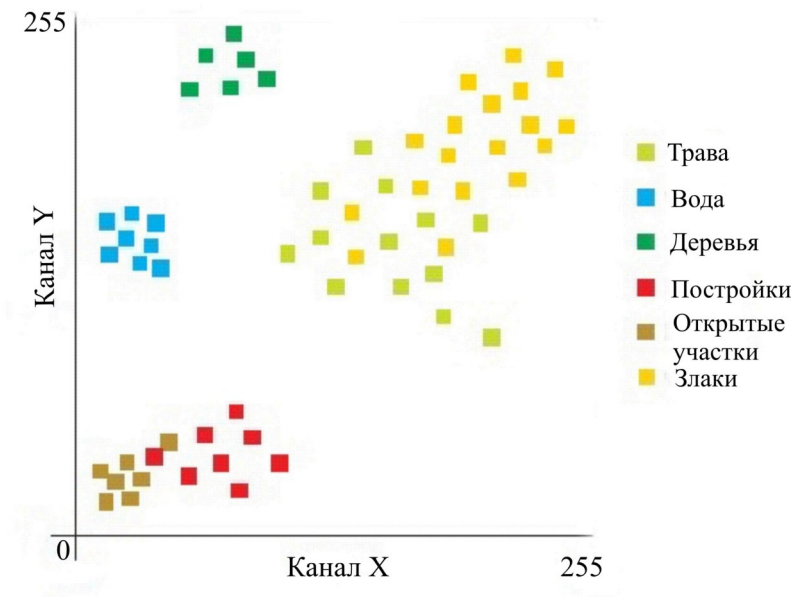


Рисунок 5.2 – Пример распределения 6 тематических классов наземного покрова в пространстве признаков (объектов) после классификации изображения ДЗЗ . Каждый класс занимает определенную область в соответствии со спектральными характеристиками

после классификации изображений. При большем числе используемых спектральных каналов проводится комбинирование всех возможных вариантов их сопоставления в двумерном пространстве.

Каждый пиксель изображения имеет свои координаты в пространстве признаков, которые позволяют определять расстояние между тематическими классами (рисунок 5.3) и закономерности их пространственного распределения. В зависимости от числа используемых спектральных каналов координатная сеть пространства признаков (объектов) может быть двумерной или трехмерной.

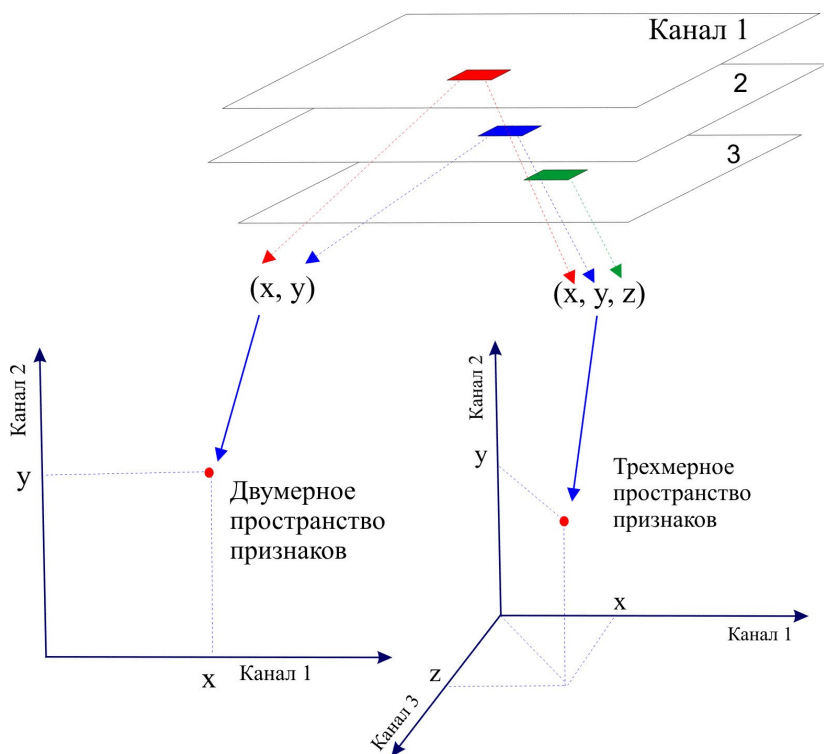


Рисунок 5.3 – Координаты пикселя изображения ДЗЗ в двумерном (по двум спектральным каналам) и трехмерном (по трем каналам) пространстве признаков

Теоретически такие тематические классы объектов местности должны быть однородными, потому что пиксели изображения одного класса имеют схожие спектральные характеристики, отличаясь от пикселей других классов. Тем не менее на практике выделение тематических классов на изображении ДЗЗ осложняется высокой вариацией данных спектральной яркости, которая может иметь место в каждом классе исследуемой сцены.

Классификация изображений является важной частью: дистанционного зондирования, дешифрирования дистанционных изображений и распознавания образов. В некоторых случаях, тематическая классификация сама может быть предметом соответствующего анализа. Например, при классификации землепользования по данным изображений ДЗЗ в качестве конечного продукта получается тематическая карта, которая требует детального анализа. В других случаях классификация может быть только промежуточным шагом анализа, в котором она формирует один из нескольких массивов данных слоев ГИС.

5.2. Типы классификации ДЗЗ

На практике существует несколько методик по классификации изображений ДЗЗ, которые выбираются аналитиком в зависимости от поставленной задачи. На сегодняшний день сложно сказать, что тот или иной метод классификации является «лучшим», потому что характеристики каждого изображения и способы его обработки различаются в каждом конкретном случае. Поэтому важно, чтобы любой аналитик понимал это и был бы способен выбирать альтернативные варианты классификации изображений в соответствии с решаемыми задачами.

Наиболее простой формой классификации цифровых изображений является учет каждого индивидуального пикселя. При этом класс объекта формируется на основании множества пикселей, полученных в различных спектральных каналах (рисунок 5.4). Такая форма классификации также еще называется **точечной** (спектральной), потому что она рассматривает каждый пиксель в качестве отдельной «точки» (не связанной с соседними пикселями). Хотя точечная классификация имеет определенные преимущества (простота, эффективность работ), она не нашла широкого применения в связи с ограниченностью возможности оценки связи между соседними пикселями.

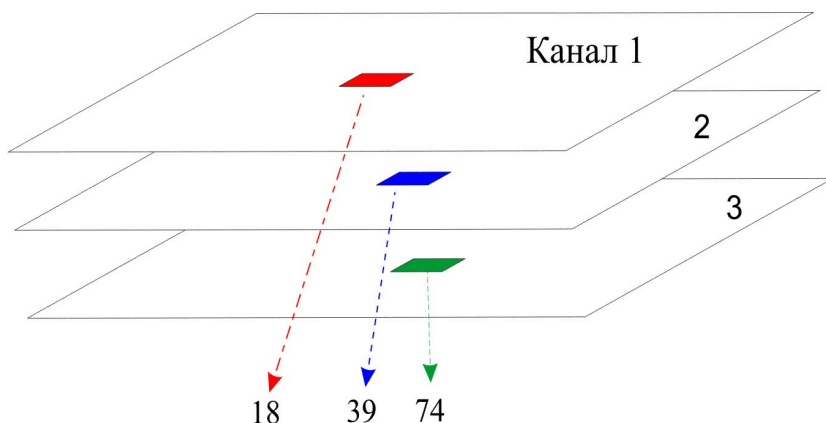


Рисунок 5.4 – Точечная классификация определяет каждый пиксель как отдельный набор спектральных значений, рассматриваемых вне связи с соседними пикселями

При более сложном процессе классификации рассматриваются группы пикселей и их пространственное распределение в массиве данных изображения. Такой способ классификации называется *пространственным* или *соседства* (от англ. neighborhood), позволяющим оценить небольшие участки (например, лесные выделы, вырубки, лесные посадки) на изображении дистанционного зондирования. В этом случае тематическая классификация изображения проводится на основе спектральных и текстурных характеристик групп пикселей, объединенных для дешифрирования соответствующего класса наземного покрова. Пространственная классификация в отдельных случаях показывает большую точность результатов. Тем не менее, она является более трудозатратной, чем точечная, и поэтому тоже не нашла широкого применения при классификации дистанционных изображений.

Процесс классификации изображений обычно состоит из нескольких последовательно выполняемых этапов (рис. 5.5).

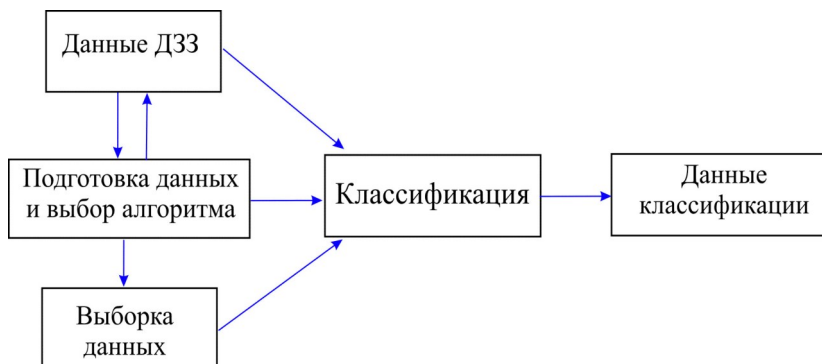


Рисунок 5.5 – Общая схема проведения классификации, в которой большое внимание отводится подготовке данных и выбору алгоритма классификации

На начальном этапе аналитиком проводится подбор исследуемых данных ДЗЗ. В зависимости от поставленных задач классификации выбираются соответствующий спутниковый сенсор, дата съемки и число спектральных каналов изображения ДЗЗ. Дата съемки является определяющим фактором при исследовании раздельного (лесного) покрова. В снежный период изучаются преимущественно только хвойные породы. Основное время изучения лиственных и смешанных насаждений приходится на период их вегетации, который для средней полосы России длится с мая по сентябрь.

Необходимо также принимать во внимание облачный покров на оптическом изображении, который может осложнить видимость исследуемых объектов местности. Для этого обычно проводится подбор снимков безоблачного периода съемки, либо облака удаляются с изображения до процесса классификации.

Следующим шагом подготовки к классификации является оценка возможных кластеров (классов) объектов в пространстве признаков и их разделимость на спектральные классы. Часто при классификации (дополнительной классификации) требуется проводить оценку различия спектральных классов, чтобы выяснить, насколько они отличаются и есть ли смысл их объединения в один большой класс. Предположительно классы, имеющие значительные отличия, должны различаться значениями средней яркости, и наоборот, близкие по спектральным характеристикам тематические классы должны иметь незначительные отличия в средней яркости.

После выделения спектральных классов исследуемых объектов в пространстве признаков аналитику необходимо определиться с тем, каким образом пиксели (на основе векторных характеристик) изображения ДЗЗ должны быть присвоены (назначены) соответствующим тематическим классам. Такое присвоение пикселей в процессе классификации проводится на основе различных критериев, которые будут рассмотрены в последующих разделах учебного пособия.

На основании заданной обучающей выборки (см. рисунок 5.5) и выбранному алгоритму проводится классификация изображения ДЗЗ. При этом происходит процесс назначения (присвоения) каждого пикселя (его значения DN) многоканального изображения соответствующему заранее заданному тематическому классу.

После процесса классификации изображения ДЗЗ проводится валидация его результатов. Для этого применяется оценка точности классификации путем сравнения полученных данных с данными наземных (полевых) исследований. При этом используется матрица ошибок и несколько коэффициентов (критериев), показывающих точность проведённых работ (Курбанов и др., 2015б).

5.3. Управляемая классификация

Одной из ключевых задач в классификации изображений ДЗЗ является выделение тематических классов в пространстве спектральных признаков. В алгоритме *управляемой классификации* этот момент выполняется непосредственно оператором (аналитиком), который задает спектральные характеристики программе на основе заранее подготовленных эталонных (полевых, экспериментальных) данных.

Эталон известных фрагментов (*обучающая выборка*) представляет собой набор пикселей, расположенных в пределах обучающей выборки, которая обычно основана на материалах наземных пробных площадей или хорошо опознаваемых участков на местности. Аналитик создает обучающую выборку путем идентификации участков на изображении, которые будут точно соответствовать участкам эталонных фрагментов на местности.

Обычно формирование обучающей выборки начинается с подбора и изучения карт (аэрофотоснимков, спутниковых данных высокого разрешения) местности, которая будет классифицирована на цифровом изображении, а также выезда на отдельные участки с целью дополнительного обследования. Обучающие выборки создаются для всех классов наземного покрова исследуемого участка.

5.3.1. Основные характеристики обучающей выборки

Участки обучающих выборок должны иметь близкие спектральные свойства и быть однородными по всей площади исследуемой сцены спутникового изображения. Как правило, их *количество* для каждого тематического класса должно составлять не менее 30 штук, чтобы обеспечить репрезентативность их спектральных свойств

Размер обучающей выборки должен быть достаточным для обеспечения выделения и точной оценки классификации каждо-

го класса. Одна обучающая выборка на изображении ДЗЗ должна составлять не менее 10 пикселей по снимкам среднего разрешения и не менее 40 – высокого (Congalton, Green, 2008). Тем не менее, количество обучающих выборок для каждого тематического класса может быть скорректировано с учетом его практической важности для целей картографирования.

Обучающие выборки не должны быть больших размеров, так как такие участки имеют тенденцию увеличивать нежелательную вариацию значений спектральной яркости. Средний рекомендуемый размер обучающей выборки может составлять от 2 до 10 га, максимальное значение не должно превышать 50 га (для снимков среднего и низкого пространственного разрешения). Выбор размера обучающей выборки в первую очередь зависит от пространственного разрешения оцениваемого изображения ДЗЗ. Небольшие участки достаточно сложно позиционировать на изображении, а большие могут привести к появлению эффекта спектральной неоднородности.

Форма обучающих выборок не является ключевым условием при их выделении на цифровом изображении. Обычно форма обучающей выборки делается в виде квадрата или прямоугольника, что облегчает работу аналитика.

Местоположение является важным признаком при выборе обучающей выборки, так как каждый тематический класс (объект местности) должен быть представлен несколькими выборками, равномерно расположенными на изображении ДЗЗ. Обучающие выборки должны располагаться таким образом, чтобы это способствовало точному и удобному выделению их границ на изображениях (рисунок 5.6). В связи с тем, что данные обучающих выборок отражают все характеристики тематических классов, их расположение должно иметь равномерный характер по всей площади исследуемого изображения ДЗЗ, включая нетипичные труднодоступные участки.

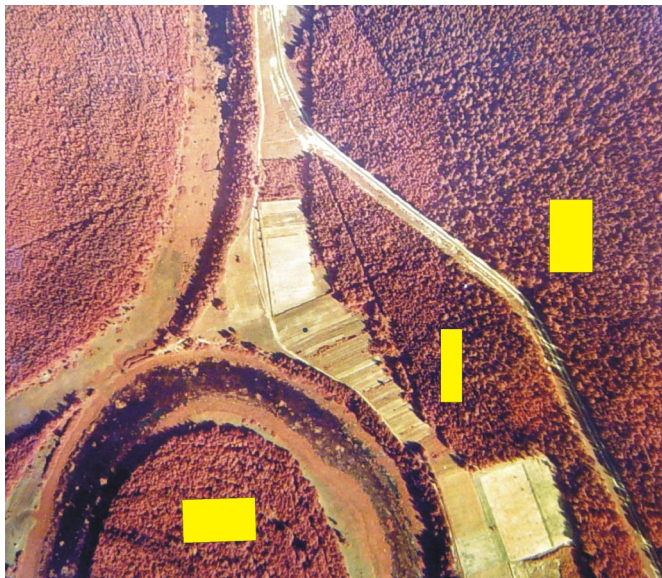


Рисунок 5.6 – Местоположение обучающих выборок по отношению к характерным объектам местности. Они должны располагаться на точно определяемых участках местности, карте, аэрофотоснимке и на спутниковом изображении

Однородность. Во время предварительной обработки данных для группы пикселей обучающих выборок получают значения статистик среднего, вариации и ковариации спектральных данных, измеренных в нескольких спектральных каналах. В идеальном случае эти значения должны быть единообразными во всех выборках соответствующих тематических классов, формируя базу для классификации пикселей каждой сцены ДЗЗ, не входящих в обучающую выборку.

Такие данные должны показывать одновершинное (близкое к равномерному) распределение яркости каждого используемого спектрального канала и средние показатели всех статистик. Тем не менее, на практике изображения ДЗЗ могут значительно отличаться, что приводит к сложности подбора однородных

обучающих выборок. Возникающие при этом отклонения (например, двухвершинное распределение спектральных характеристик) в данных для обучающих выборок обычно не рекомендуются аналитикам к использованию при управляемой классификации. Поэтому дешифровщик должен знать все особенности исследуемого региона, что позволит сформировать обучающую выборку, которая будет точно соответствовать спектральным свойствам тематического класса.

5.3.2. Преимущества и недостатки

Преимуществами управляемой классификации являются следующие моменты. Во-первых, дешифровщик имеет возможность самостоятельно выделять тематические классы объектов местности, что особенно важно при проведении специальных исследований (сложный рельеф, географический район и т.п.). В свою очередь, это может быть очень важным при необходимости проведения сравнения (мониторинга) с результатами другой классификации изображения ДЗЗ той же самой территории. Во-вторых, управляемая классификация проводится дешифровщиком, который знает исследуемую местность, что позволяет получить качественные данные для обучающей выборки. В-третьих, дешифровщик, используя управляемую классификацию, не сталкивается с проблемой приведения в соответствие спектральные характеристики на конечной карте с данными тематических классов (этот процесс проводится для обучающей выборки). В-четвертых, дешифровщик может выявить ошибки классификации на основе оценки точности и внести исправления (уточнения) в обучающую выборку.

Существует также несколько *недостатков* управляемой классификации. Во-первых, аналитик субъективно формирует классификационную структуру для изображения ДЗЗ. Такое назначение классов не всегда может привести к точному выявлению тематических (естественных) классов, характерных для

массива данных пикселей исследуемого изображения, что приводит к неточности классификации.

Во-вторых, обучающая выборка обычно определяется в первую очередь в соответствии с предполагаемыми тематическими классами и только потом в связи со спектральными свойствами соответствующей группы пикселей. Например, обучающая выборка, состоящая на 100% из лесной территории, может быть отнесена к категории «лес». Тем не менее, она будет различаться по полноте, возрасту, затененности, высотам, условиям местопроизрастания и т.п. Все это приводит к снижению качества и приемлемости данной обучающей выборки.

В-третьих, качественный подбор обучающей выборки занимает много времени и достаточно трудоемок даже при наличии всех необходимых вспомогательных ресурсов. Наконец, управляемая классификация не способна определить и выделить специфические или уникальные тематические классы, которые не представлены в обучающей выборке. Аналитик может не обратить на них внимание, либо такие участки занимают слишком незначительные площади на изображении ДЗЗ.

5.3.3. Методы управляемой классификации

Метод параллелепипеда, иногда также называемый «правилом ящика (бокса)», является одним из самых простых в управляемой классификации. Он основан на использовании максимальных и минимальных значений каждого тематического класса на исследуемом изображении, определяемых методами вариационной статистики. Число таких боксов зависит от числа разработанных тематических классов. Например, максимальные и минимальные значения спектрального канала 5 спутника Landsat распределяются по горизонтальной оси (рис. 5.6). Максимальные и минимальные значения 7 канала обучающей выборки откладываются на вертикальной оси с последующим проектированием лучей на пересечение с данными области зна-

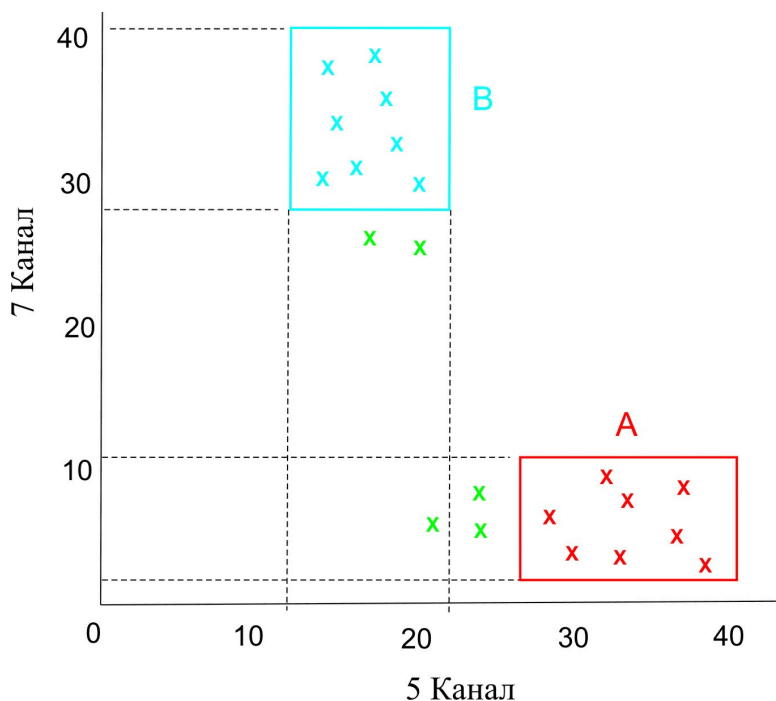


Рисунок 5.6 – Метод параллелепипеда на примере данных двух каналов Landsat. Минимальные и максимальные значения яркости пикселей обучающей выборки формируют границы каждого тематического класса. Пиксели (зеленым цветом), не попавшие в прямоугольники А и В, считаются неклассифицированными

чений канала 5. Предельные значения каждого класса позволяют выявить положение границ параллелепипедов (А и В), которые формируют (ограничивают) группу пикселей, относящихся к соответствующему тематическому классу (Richards, 2012). Пиксели, расположенные за пределами границ параллелепипедов (на рисунке 5.6 зеленого цвета), относятся к неизвестной области, и им присваивается нулевое значение. Недостатком такого метода является наложение тематических классов и нерепрезентативность данных по всему изображению, что приводит к низкой точности классификации.

Метод минимальных расстояний. Такой подход к классификации основан на использовании центральных значений кластеров спектральных данных, формирующих обучающую выборку.

При классификации по методу минимальных расстояний программой рассчитываются евклидовы расстояния от рассматриваемого пикселя до всех центров кластеров. В конечном итоге, этому пикселю присваивается класс, который квалифицируется как ближайший (рисунок 5.7).

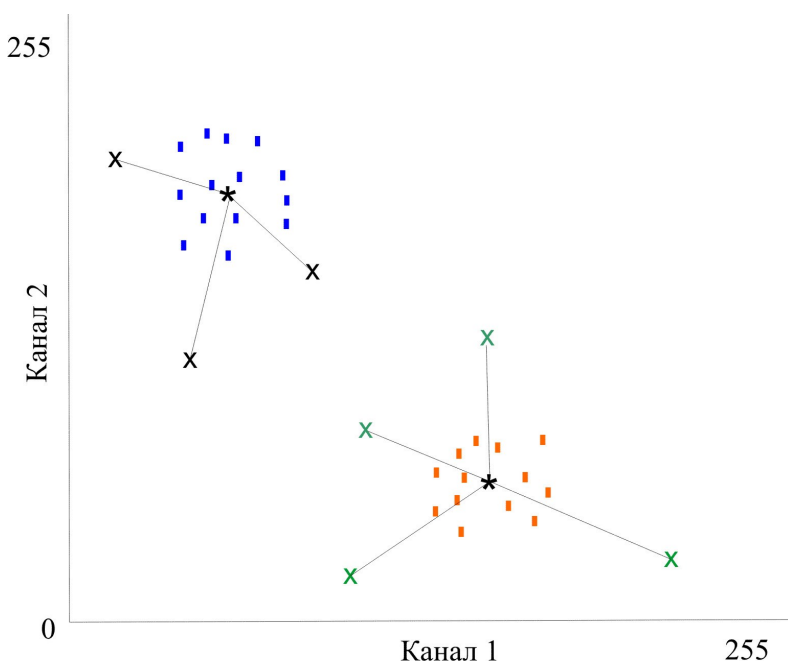


Рисунок 5.7 – Классификация по методу минимальных расстояний. В двумерном пространстве признаков точки (синие и красные) изображают пиксели обучающих выборок, а крестики – неклассифицированные пиксели, расположенные за их пределами по всему изображению. Каждый из таких пикселей (крестик) включается в класс, имеющий до него минимальное расстояние

Метод максимального правдоподобия является наиболее распространенным методом, который используется при работе с данными ДЗЗ, что делает его мощным инструментом управляемой классификации. В этом случае классификация предполагает последовательное выполнение количественного анализа для всех тематических классов в нескольких спектральных каналах. При этом оцениваются форма, размер и положение класса в пространстве признаков.

Данный вид классификации очень требователен к качеству обучающей выборки. Максимальное правдоподобие предполагает, что статистики исследуемых кластеров (обучающих выборок) соответствуют нормальному распределению Гаусса. Не все данные ДЗЗ могут иметь такое распределение. Поэтому, чтобы избежать ошибок при использовании метода максимального правдоподобия, требуется предварительный отбор классифицируемых данных.

Этот метод также позволяет аналитику определять пороговое значение для каждого класса путем определения максимального значения вероятности. Для каждого центра кластера тематического класса формируются так называемые контуры равной вероятности (обычно в виде эллипсов). Небольшой эллипс, центрированный по среднему значению класса, формирует группу пикселей со значениями имеющими наибольшую вероятность принадлежности к этому классу. Постепенно нарастают большие эллипсы, окружающие центры классов, которые увеличивают (корректируют) множество пикселей, принадлежащих к тому или иному тематическому классу. Все это приводит к тому, что результаты классификации изображений дистанционного зондирования методом максимального правдоподобия приближаются к реальным данным по наземному покрову на местности. Для получения большей информации по этому вопросу рекомендуем ознакомиться с классификацией Байеса.

Алгоритм ISODATA (итеративный самоорганизующийся метод анализа Данных – от *англ.* Iterative Self-Organizing Data Analyses Techniques) представляет собой разновидность метода минимального расстояния (Duda et al., 2001). Тем не менее, в профессиональном сообществе принято считать, что получаемые результаты по этому методу классификации имеют более точные показатели.

Часто ISODATA рассматривается как вариант управляемой классификации, хотя она отличается от этой классической модели. Алгоритм ISODATA является хорошим примером гибридного метода, имеющего характеристики как управляемой, так и неуправляемой классификации. Он также показывает, что различия между этими двумя типами классификации, в конечном итоге, не столь существенны.

Алгоритм ISODATA многошаговой классификации начинается с подбора обучающих выборок, которые могут быть представлены в виде тематических классов в мультиспектральном пространстве данных. В процессе классификации все неопределенные пиксели начинают относиться к ближайшим центрам классов, что делает этот метод схожим с методом минимального расстояния.

После этого находятся новые центры для каждой группы, и начинается новый процесс перераспределения пикселей с притяжением их к новым центрам тематических классов. При этом, если среднее расстояние между объектами класса больше заданного максимального порога, класс разбивается на два новых класса. Если же расстояние между центрами двух тематических классов меньше заданного минимального порога, то такие классы объединяются.

Этот процесс продолжается до тех пор, пока между итерациями не будет изменений (либо они незначительны) по отношению к центрам исследуемых классов.

5.3.4. Формирование обучающей выборки в ENVI

Программный пакет ENVI 5 предоставляет широкий спектр различных методов классификации, включая метод параллелепипеда, минимального расстояния, расстояния Махаланобиса, максимального правдоподобия, отображения спектральных углов, двоичного кодирования, нейронную сеть, дерево целей. Кроме того, имеется возможность применения специализированного модуля Classification Workflow (Рабочий процесс классификации), позволяющего упростить сам процесс классификации изображений ДЗЗ.

Управляемая классификация изображений ДЗЗ основана на использовании обучающей выборки (см. раздел 5.3). Поэтому в работе необходимо подготовить несколько таких выборок, которые должны пройти различные методы сравнения (например, статистический анализ растровых данных). Этот шаг важен для последующего назначения соответствующего пикселя заранее заданному тематическому классу.

Формирование обучающей выборки с использованием функции область интереса (ROI)

Вначале в командной строке программы ENVI открываем спутниковое изображение Sentinel 2 на территорию Марий Эл, сделанное 27.07.2018. Далее в командной строке программы ENVI выбирается **Region of Interest (ROI) Tool** (Инструмент область интересов). При этом на дисплее откроется диалоговое окно **ROI Tool** (рисунок 5.8 а). Для выделения соответствующей выборки на спутниковом изображении командой **ROI Type** выбирается форма геометрии ROI, которая может быть отображена в виде полигона, линии, набора точек, прямоугольника или эллипса (рисунок 5.8 б). В нашем примере мы выбираем ROI в виде прямоугольника (Rectangle) на лесном покрове исследуемого изображения. Для этого, удерживая левую клавишу мыши, прописываем его на участке леса. После принятия команды **Ac-**

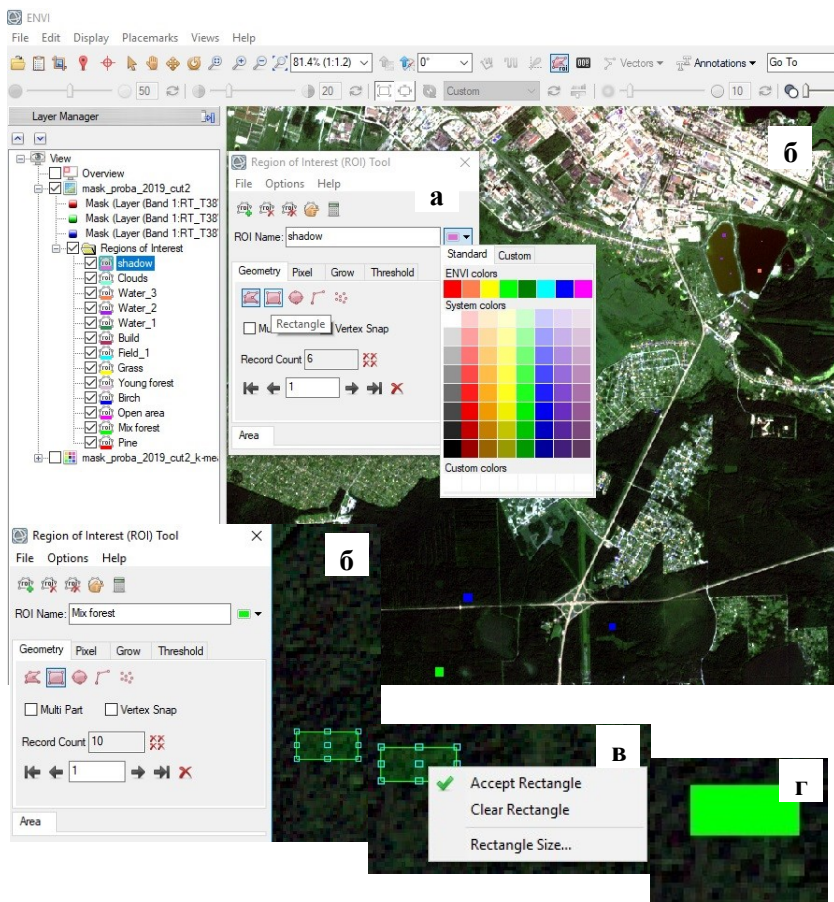


Рисунок 5.8 – Формирование ROI (обучающей выборки) в ENVI: а) командная строка ROI; б) выбор геометрической формы ROI; в) фиксирование ROI на снимке; г) полигон ROI «Смешанные насаждения»

cept Rectangle (правой клавишей) обучающая выборка в виде прямоугольника фиксируется на поверхности изображения (рисунок 5.8б). В результате последовательности этих действий получается полигон обучающей выборки для тематического класса «Смешанные насаждения» (рисунок 5.8 г).

В командной строке **ROI Name** (наименование класса) вписываем имя созданного тематического класса «Mix forest» (Смешанный лес) наземного покрова (см. рисунок 5.8 а). Таким же образом проводим выделение ROI на других участках изучаемого изображения. В конечном итоге после проведения вышеприведённых шагов все выделенные «области интереса» ROI отобразятся в окне **ENVI Layer Manager** (управление слоями). Каждый ROI должен обладать информацией с названия каждого природного объекта и его цвета на изучаемом изображении (рисунок 5.9).

Количество пикселей изображения ДЗЗ и другие характеристики каждой «области интереса» можно проанализировать с помощью команды **Options** (Опции) рабочего окна ROI, в которой появляется подкоманда **Report Area of ROI** (Отчет о площади ROI) (см. рисунок 5.9). Например, в нашем случае на выбранный ROI «Mix forest» приходится 748 пикселей.

Для статистического сравнения подобранных ROI используется другая команда. Для этого в диалоговом окне **Region of Interest (ROI) Tool** (Область интересов ROI) выбираются **Options – Compute Statistics from ROIs** (Параметры - Вычислить статистики по ROI) (рисунок 5.10 а).

В появившемся окне **Choose ROIs** (Выбор ROI) с помощью меток необходимо выбрать изучаемые ROI (см. рисунок 5.10 б). Далее в диалоговом окне **ROI Statistics View** (Просмотр статистик ROI) можно оценить и сравнить статистики для выбранных ROI. На рисунке 5.11 показаны основные статистики (среднее, минимальное и максимальное значения, среднеквадратическая ошибка) и их распределение в виде линейных графиков для ROI «Сосна» (от *англ.* Pine). По оси X показано распределение ROI по спектральным каналам изображения, по Y – их значения в мкм.

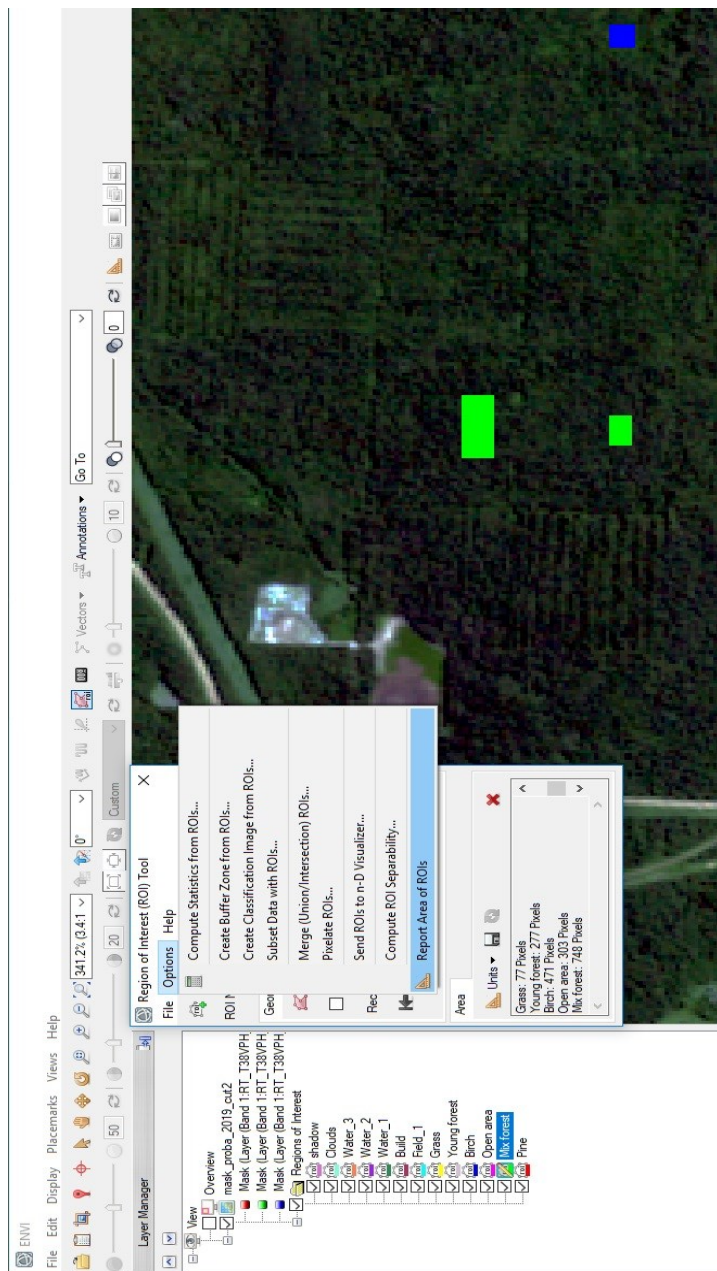


Рисунок 5.9 – Итоговый набор ROI в ENVI 5 для спутникового изображения

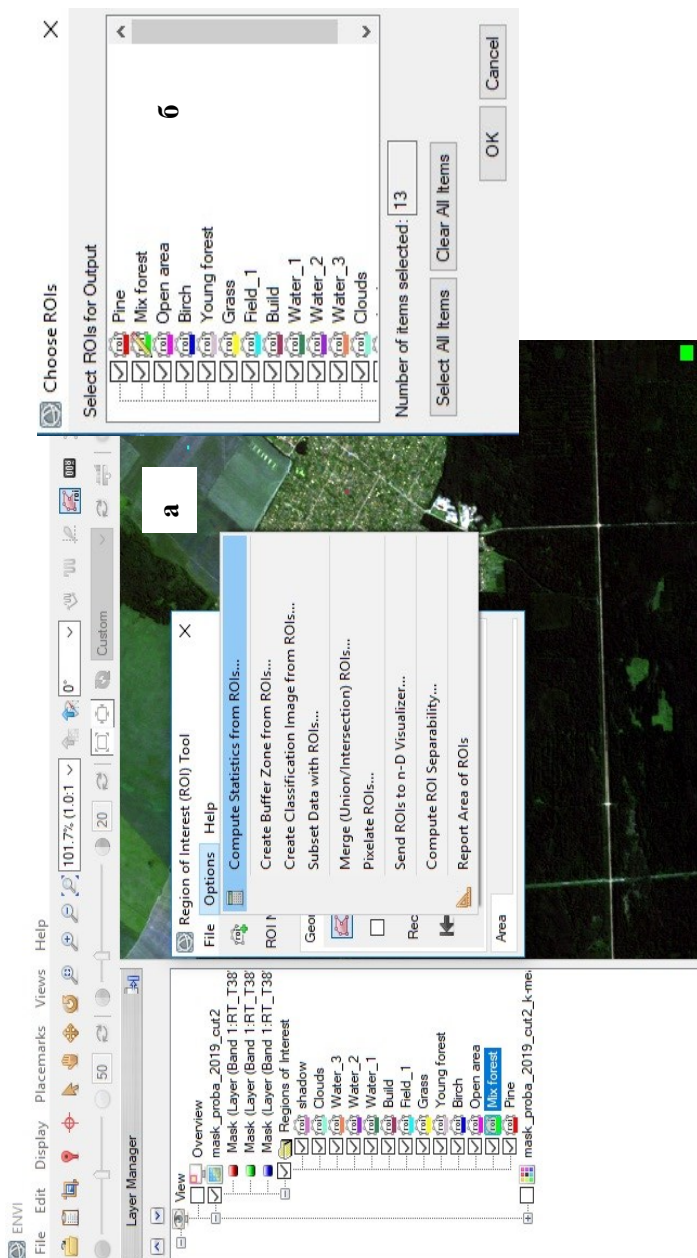


Рисунок 5.10 – Оценка статистик ROI в ENVI: а) команда вычисление статистик по ROI; б) диалоговое окно выбора ROI

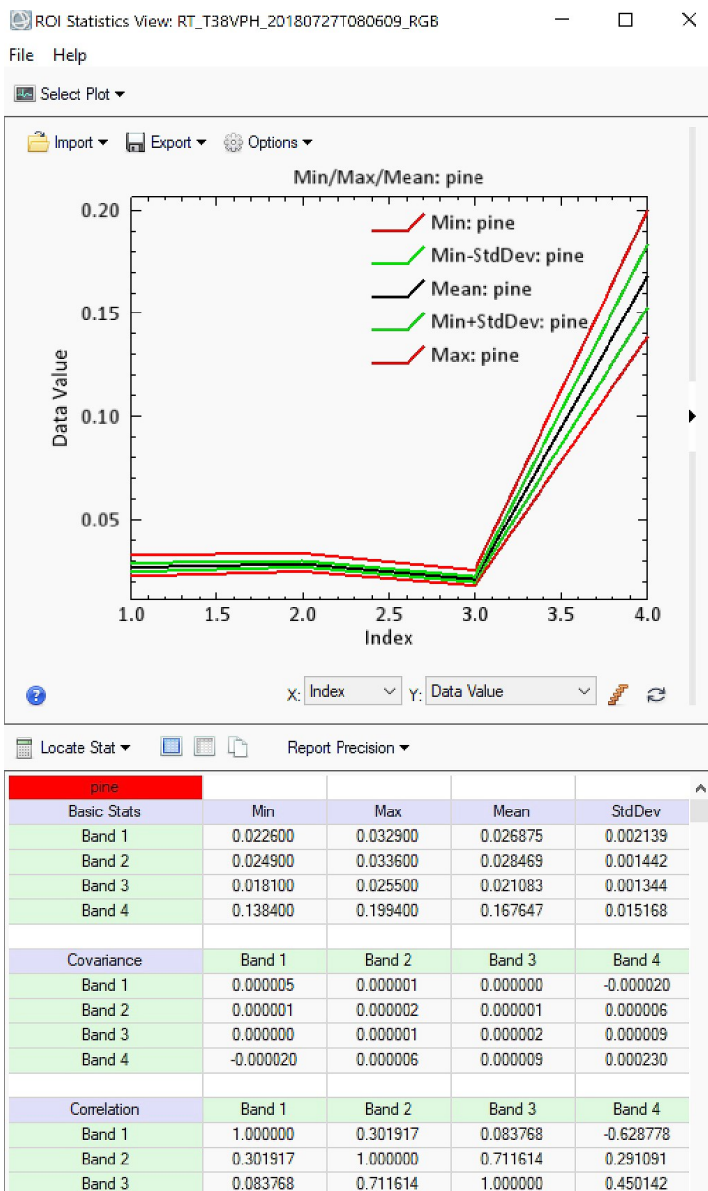


Рисунок 5.11 – Статистики для ROI Сосна (Pine) в пакете ENVI 5

5.3.5. Оценка разделимости классов обучающей выборки

Прежде чем начать классификацию объектов наземного покрова на спутниковом снимке в программном пакете ENVI, аналитику (дешифровщику) необходимо провести предварительную оценку спектральной разделимости полигонов обучающей выборки (ROI). Для решения этой задачи обычно определяют спектральное расстояние (или разделимость) между обучающими сигнатурами или группами (кластерами) пикселей исследуемых ROI. Такой подход позволяет на подготовительном этапе избежать ошибок классификации классов наземного покрова на спутниковом изображении, имеющим близкие значения спектральных характеристик (Huang et al, 2016).

Для выполнения данной процедуры существует несколько решений (алгоритмов). В учебном пособии подробно рассмотрены примеры использования следующих алгоритмов: статистическая оценка на основе вычисления расстояния по методике «Джефрис-Матусита» (мера межкластерного анализа) и трансформированной дивергенции, а также визуализации спектральных признаков в n-D пространстве.

Алгоритмы *расстояние «Джефрис-Матусита»* (JM – от *англ.* Jeffries-Matusita) и *трансформированная дивергенция* (от *англ.* Transformed Divergence) позволяют количественно оценить разделимость каждой пары исследуемых классов наземного покрова (объектов местности) на спутниковом снимке (Chuvieco, 2016). Это может быть особенно важно для повышения точности результатов классификации (картографирование), проводимой для растительного покрова методом максимального правдоподобия.

Оба эти алгоритма в комплексной программе ENVI показывают значения (критерии), которые варьируют от 0 до 2. Значения критерия ниже 1 свидетельствуют о слабой разделимости исследуемой пары классов. В этом случае такие классы следует

объединять в один либо более тщательно подходить к выборке соответствующих ROI на спутниковом изображении. Значения критерия выше 1.4 свидетельствуют о приемлемой, а 1.9 – о высокой спектральной разделимости исследуемых классов наземного покрова (Richards, 2006).

Данные дистанционного зондирования можно также представить на графике *n-D* пространства (*n* – количество используемых спектральных каналов) в виде облака точек (рассеяния) спектральных значений изображения объектов местности. **Визуализатор *n-D*** (от *англ.* Dimensional Visualizer) в пакете ENVI создает распределение облака таких данных в пространстве спектральных признаков (иногда называемом спектральным пространством).

Визуализатор *n-D* обычно используется для проверки и оценки распределения группы пикселей в пространстве спектральных признаков на их принадлежность к тому или иному тематическому классу наземного покрова. Этот инструмент комплексного пакета ENVI можно также использовать для визуальной оценки разделимости ROI в качестве входных данных при управляемой классификации.

Dimensional Visualizer в программе ENVI 5 представляет собой интерактивный инструмент для выбора тематических классов (группы пикселей) в *n*-пространстве спектральных значений. При анализе многомерного пространства спектральных значений аналитиком принимается во внимание относительное положение облаков различных групп пикселей. Чем дальше они расположены друг от друга, тем надежнее дифференциация (разделимость) соответствующих им объектов наземного покрова в процессе классификации. Перекрытие (наложение) облаков обычно свидетельствует о вероятном перемешивании пикселей различных тематических классов, что приводит к ошибкам при последующей классификации.

5.3.6. Пример оценки разделимости классов в ENVI

В программу ENVI загружаем спутниковое изображение Sentinel-2, для которого предварительно созданы 13 ROI. В окне инструментов **Region of Interest (ROI) Tools** выбирается функция **Options** → **Compute ROI Separability** (Параметры → Вычислить разделимость ROI) (рисунок 5.12). При подтверждении этой команды появится окно **ROI Separability Report** (Отчет по разделимости ROI), в котором содержится информация о спектральной разделимости выбранных тематических классов (рисунок 5.13).

Как видно из отчета по разделимости (см. рисунок 5.13), для каждого исследуемого класса наземного покрова рассчитаны критерии JM и трансформированной дивергенции. Тематический класс «Сосна» (от *англ.* Pine) имеет высокую спектральную разделимость со всеми другими исследуемыми классами наземного покрова, потому что расстояние «Джефрис-Матусита» и трансформированная дивергенция показывают значения выше 1.9 (рисунок 5.13).

Тематический класс «Смешанный лес» (от *англ.* Mix forest) показывает слабую разделимость с классом «Береза» (от *англ.* Birch), что требует дополнительных действий для повышения этого показателя.

Оценка разделимости ROI в ENVI 5 с помощью команды Dimensional Visualizer

В меню инструментов модуля **Region of Interest (ROI) Tool** (Область интересов ROI) выбираем функцию **Options** (Параметры) - **Send ROIs to n-D Visualiser** (Отправить ROI в n-D визуализатор) (рисунок 5.14 а). В открывшемся диалоговом окне **Choose ROIs** (Выберите ROI) выбираем ROI для анализа (рисунок 5.14 б). При подтверждении команды (ОК) в программе ENVI 5 открываются еще два диалоговых окна. В первом

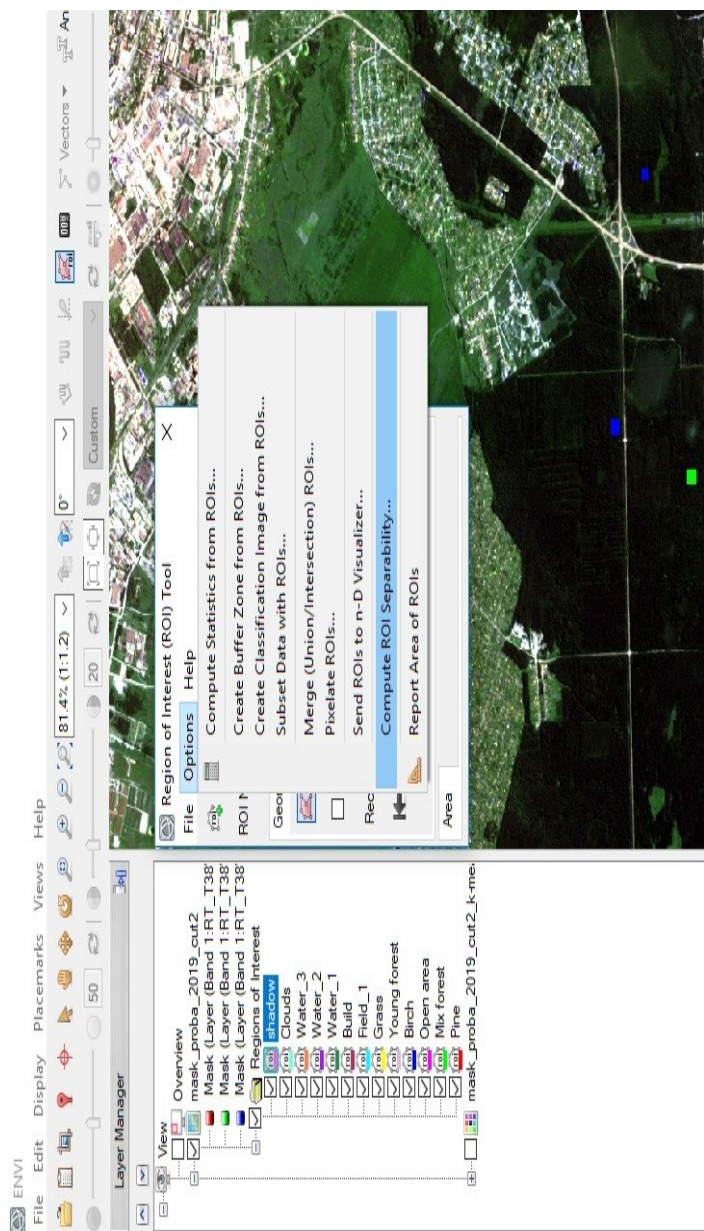


Рисунок 5.12 – Оценка спектральной разделимости ROI в ENVI

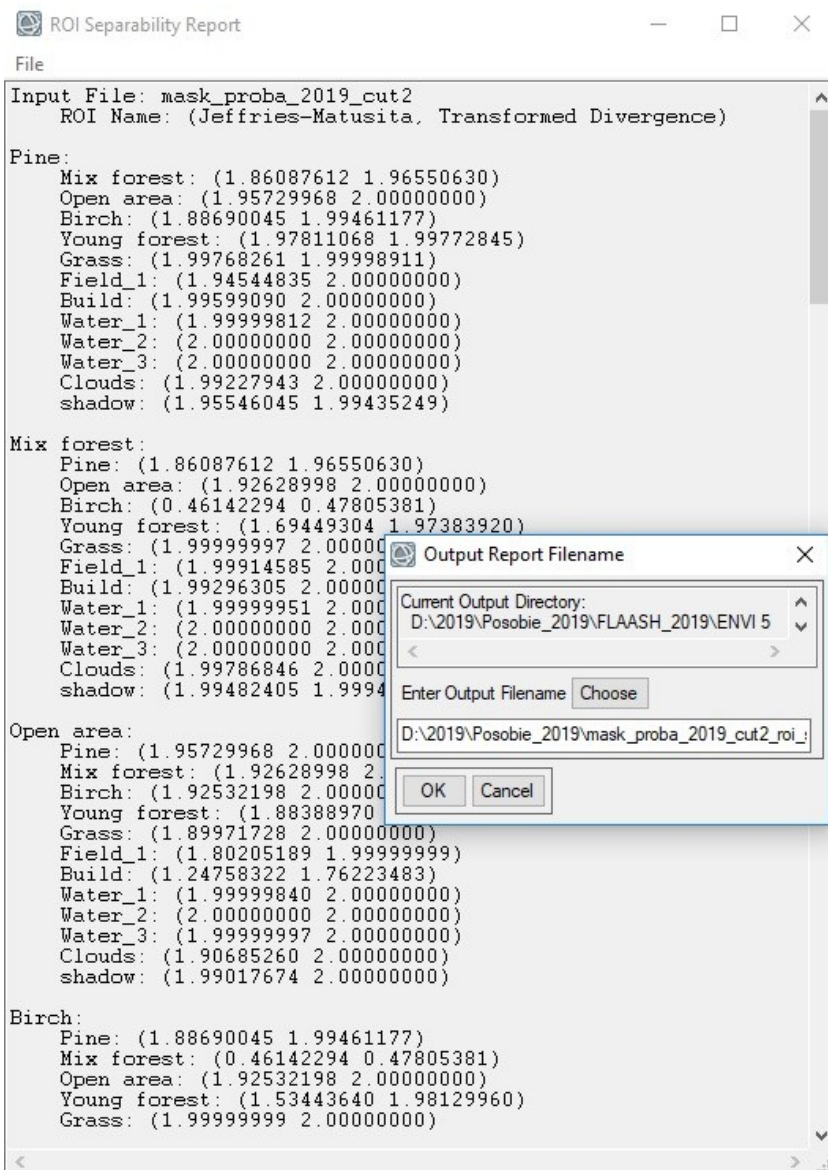


Рисунок 5.13 – Итоговая таблица спектральной разделимости ROI

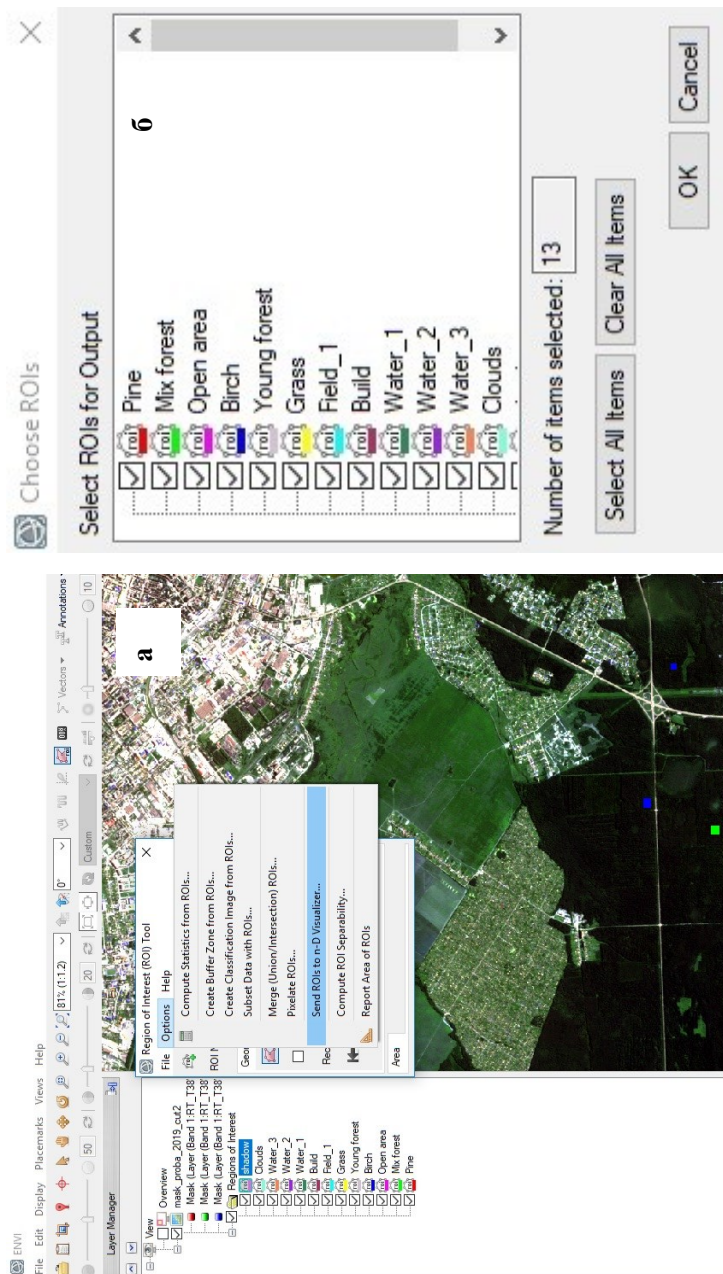


Рисунок 5.14 – Диалоговое окно для оценки ROI в ENVI 5

окне **n-D Controls** (Контроль данных) выбираем спектральные каналы 1, 2 и 3 (RGB) для 4-канального композита Sentinel-2 (рисунок 5.15). При этом в окне визуализатора n-D Visualizer показывается относительное положение облаков спектральных значений выбранных ранее ROI (рисунок 5.15 а).

Оси графика рассеяния трехмерного пространства спектральных признаков изображены в виде линий белого цвета. Эти оси представляют собой спектральные каналы (RGB) спутникового изображения Sentinel-2, выбранные ранее в окне **n-D Controls**.

На рисунке 5.15 представлены три варианта пространственного распределения спектральных характеристик различных ROI (тематических классов). В первом (рисунок 5.15 а) облака различных цветов в **n-D Visualizer** показывают распределение всех 13 ROI (Обучающей выборки) по осям спектральных признаков. Во втором варианте (рисунок 5.15 б) показано пространственное распределение только двух ROI, относящихся к наиболее распространённым классам хвойные и лиственные породы. На этом примере хорошо видна высокая делимость этих двух ROI. Группы исследуемых пикселей (облака точек) красного и синего цветов не смешиваются в пространстве признаков, что позволит в последующем провести классификацию с высокой точностью.

В третьем варианте визуализации ROI в n-d пространстве (рисунок 5.15 в) показано распределение спектральных признаков для двух лиственных классов наземного покрова, которые изображены в синем и зеленый цвет. При этом наблюдается их почти полное перемешивание в пространстве признаков. На основании данного рисунка можно сделать вывод, что для этих двух ROI требуется дополнительная работа либо по их выделению на спутниковом снимке, либо по объединению в один обобщённый тематический класс.

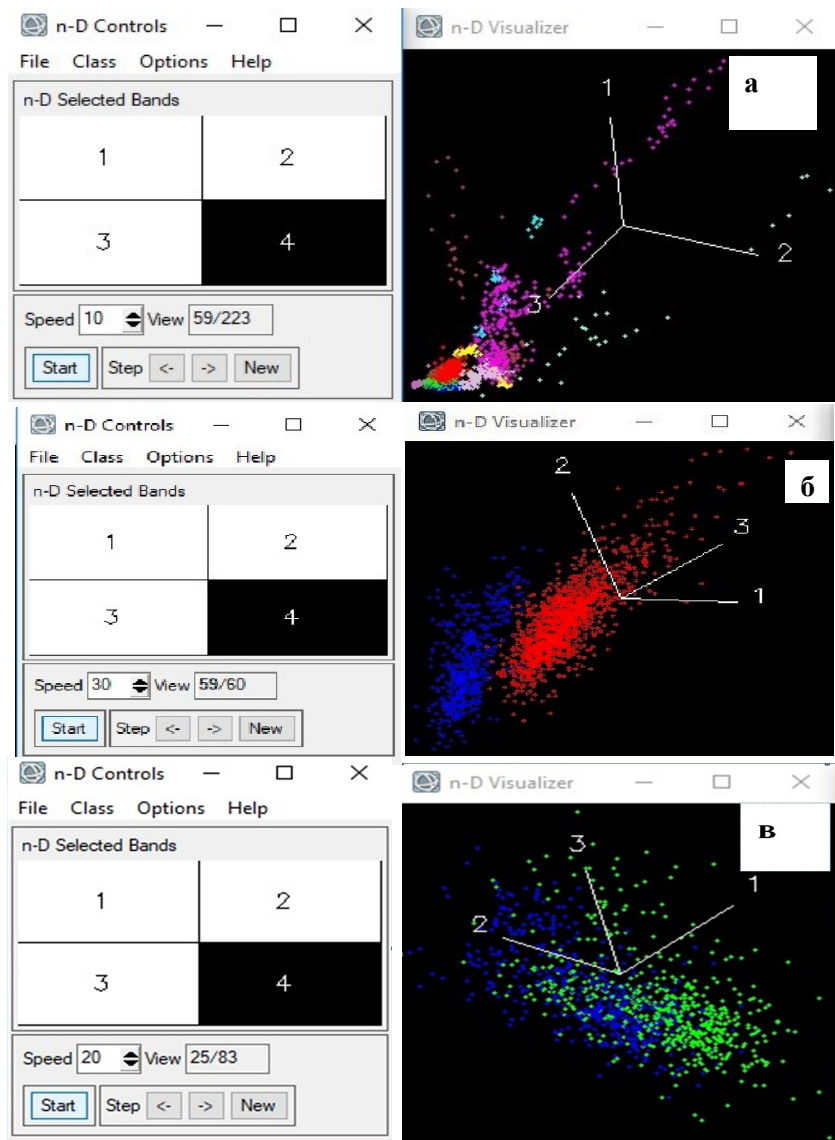


Рисунок 5.15 – Оценка разделимости классов в n-D пространстве спектральных признаков: а) для всех ROI, б) для хвойных и лиственных классов (ROI), в) для двух лиственных классов (ROI)

5.3.7. Примеры управляемой классификации в ENVI

Классификация методом максимального правдоподобия

В ENVI реализован метод классификации максимального правдоподобия на основе дискриминантных функций, которые анализируют спектральные характеристики каждого пикселя изображения (Richards, 1999).

В окне главного меню ENVI 5 Toolbox выбираем **Classification – Maximum likelihood** (Классификация – максимальное правдоподобие) (рисунок 5.16 а). В окне **Classification Input File** (Ввести исходный файл) выбрать файл с изображением ДДЗ для классификации (рисунок 5.16 б).

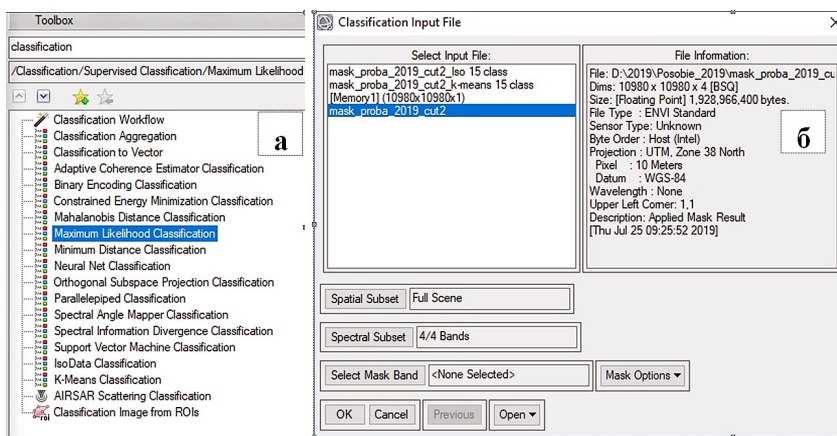


Рисунок 5.16 – Выбор классификации методом максимального правдоподобия в ENVI 5: а) функции Maximum likelihood, б) файла ДДЗ

При нажатии клавиши ОК открывается диалоговое окно **Maximum likelihood Parameters** («Параметры максимального правдоподобия») (рисунок 5.17). Нажатием кнопки **Select All Items** (Выбрать все элементы) выбираем все ранее созданные 13 ROI для процесса классификации.

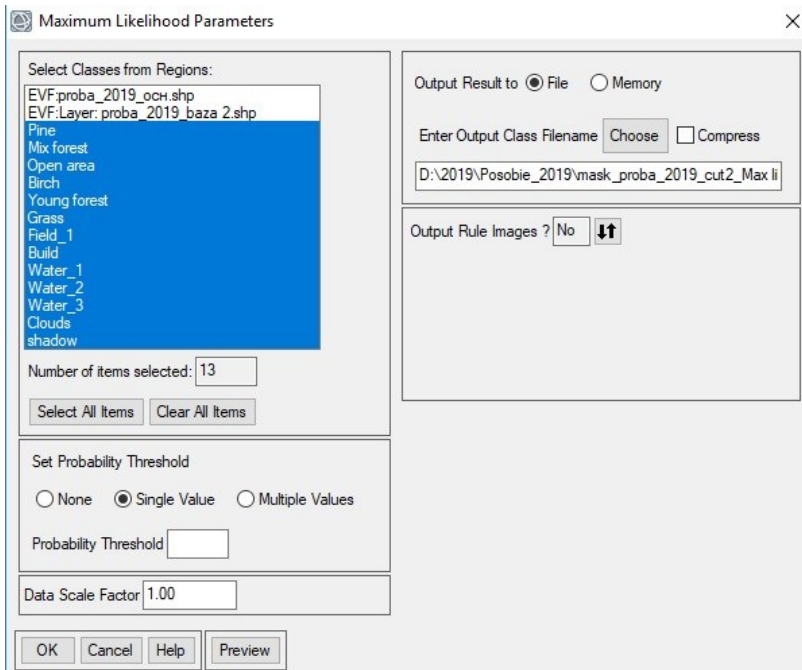


Рисунок 5.17 – Выбор классов (ROI) для классификации методом максимального правдоподобия

При выборе функции **Output the result to (Вывод результата)** выбираем опцию в итоговый файл (см. рисунок 5.17). В команде **Output Rule Images** (Правило для готового изображения), выбирается команда **No** (Нет). Далее в строке **Enter Output Class Filename** (Введите имя выходного класса) указываем путь на диске компьютера для сохранения изображения, прошедшего классификацию методом максимального правдоподобия. При нажатии «OK» новое тематическое изображение загружается в **Layer Manager** (Управление слоями) (рисунок 5.18). В программе ENVI на дисплей экрана можно вывести оба изображения: снимка Sentinel 2 и тематической карты, полученной методом максимального правдоподобия.

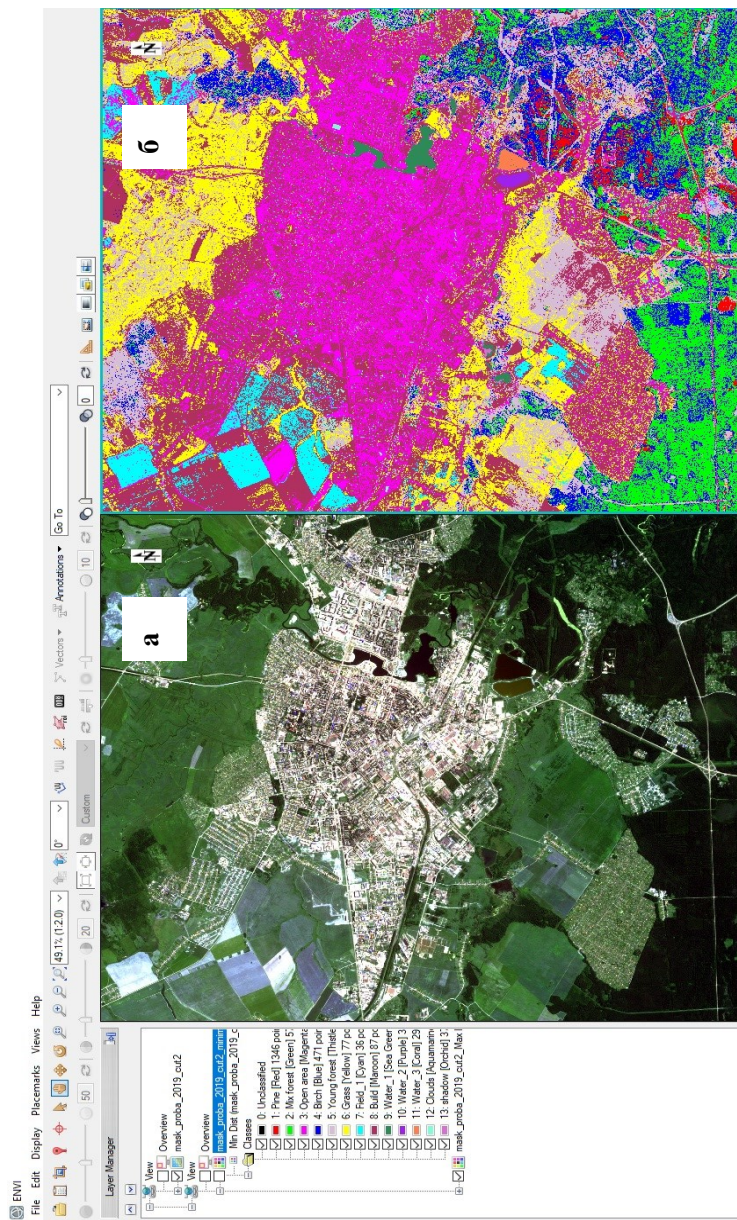


Рисунок 5.18 — Классификация методом максимального правдоподобия: а) исходное изображение, фрагмент сцены Sentinel-2, б) тематическая карта

Классификация методом параллелепипедов в ENVI

В окне главного меню ENVI 5 Toolbox выберите команду **Classification – Parallelepiped Classification** (Классификация – методом параллелепипеда) (рисунок 5.19 а).

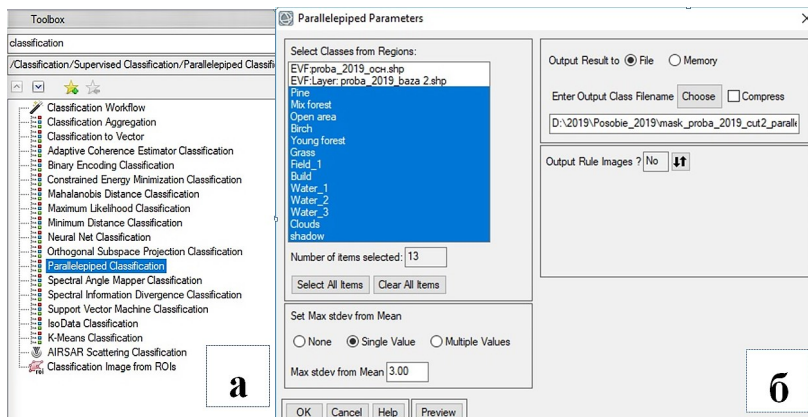


Рисунок 5.19 – Выбор классификация методом параллелепипеда:
а) функции Parallelepiped Classification, б) классов ROI

После открытия файла снимка Sentinel-2 для классификации (аналогично предыдущему примеру) в появившемся диалоговом окне **Parallelepiped Parameters** (Параметры метода параллелепипедов) с помощью команды **Select All Items** (Выбрать все элементы) выбираем все 13 ROI (см. рисунок 5.19 б). Далее в команде **Output Results to** (Вывод результата) отмечаем в **File** (Файл) и указываем путь на диске компьютера для сохранения конечного результата классификации командой **Enter Output Class Filename** (Введите имя выходного класса). Нажатием «OK» новое тематическое изображение загружается в **Layer Manager** (Управление слоями) (рисунок 5.20). При этом в ENVI можно вывести оба изображения: снимка Sentinel 2 и тематической карты, полученной методом параллелепипедов .

Классификация методом минимального расстояния в ENVI

Выполнение данного типа классификации в комплексном пакете ENVI 5 аналогично приведенным выше примерам. Для этого последовательно проводится выполнение команд, подробно рассмотренных в примерах по осуществлению классификации методом максимального правдоподобия и параллелепипедов. Рисунок 5.21 показывает последовательность этих действий для снимка Sentinel-2 в программе ENVI 5.

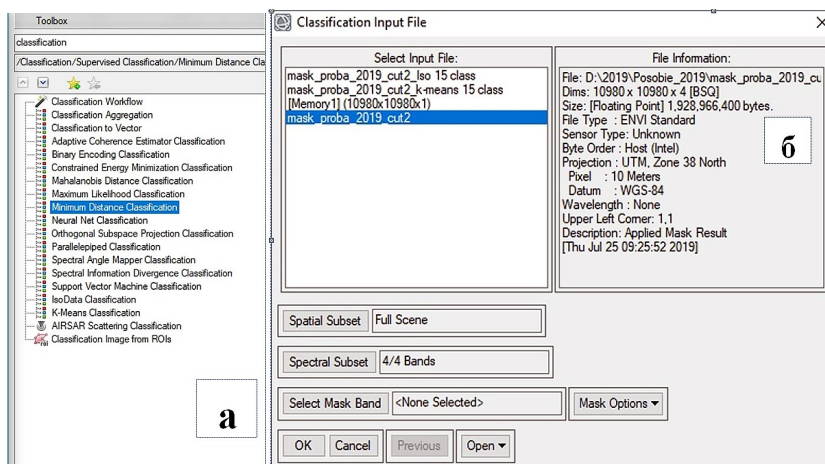


Рисунок 5.21 – Выбор классов (ROI) для классификации методом минимального расстояния

Полученные результаты тематического картографирования после процесса классификации методом минимальных расстояний загружаются в диалоговое окно **Layer Manager** (Управление слоями) (рисунок 5.22). Одновременно с тематической картой на 13 классов наземного покрова в программе ENVI также выводится исходный снимок.

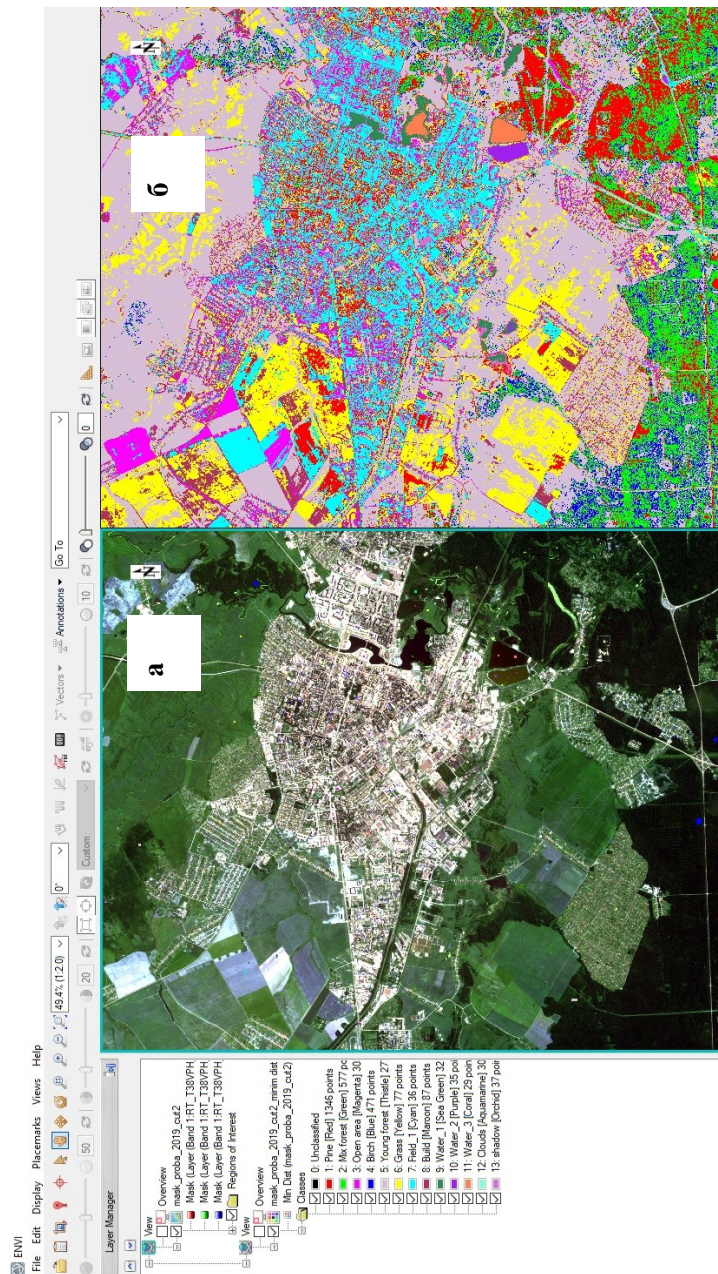


Рисунок 5.22 – Классификация методом минимального расстояния: а) исходное изображение сцены Sentinel-2, б) тематическая карта

Все три тематические карты, полученные разными методами управляемой классификации, могут быть визуально сравнены в ENVI 5. Такая визуальная оценка в окне **Layer Manager** (Управление слоями) при сравнительном анализе трех методов классификации позволяет на этом этапе выбрать наиболее подходящие варианты для дальнейшей работы (рисунок 5.23).

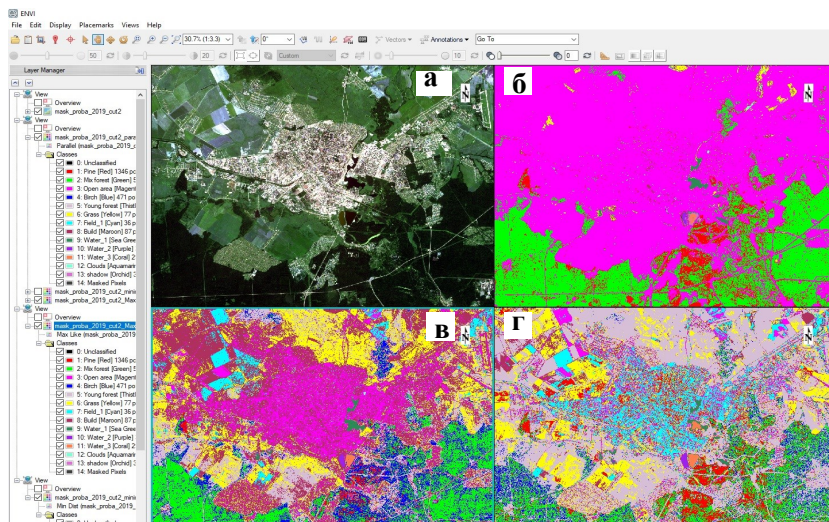


Рисунок 5.23 – Сравнительный анализ результатов классификации разными методами: а) исходное изображение, б) параллелепипедов, в) максимального правдоподобия, г) минимального расстояния

Самым предпочтительным будет являться метод, который продемонстрирует наибольшую точность по итогам классификации. В нашем случае визуальный анализ показывает, что методы максимального правдоподобия и минимального расстояния наиболее оптимальны для работы. Степень детализации объектов на тематических картах в этих двух вариантах гораздо выше, чем при использовании метода параллелепипедов (см. рисунок 5.23).

5.4. Неуправляемая классификация

Выявление характерных групп спектральных значений на сцене дистанционного изображения необязательно является интуитивным. Изображения ДЗЗ обычно состоят из спектральных классов, имеющих сходные характеристики яркости в различных спектральных каналах. Управляемая классификация ДЗЗ основана на использовании исходных данных об изучаемой местности для формирования обучающей выборки. Если этих эмпирических данных недостаточно или интересующие исследователя классы наземного покрова не поддаются определению, то используется неуправляемая классификация. В этом случае применяется классификационный алгоритм, разделяющий пространство спектральных признаков исходного изображения на заданное количество кластеров (ROI). Другими словами, такая процедура предусматривает идентификацию групп природных объектов или их совокупностей на основе анализа мультиспектральных данных дистанционного зондирования.

Неуправляемая классификация – это процесс выделения природных групп или объектов на изображении ДЗЗ, при котором распределение пикселей происходит автоматически на основе анализа статистического распределения их спектральных значений.

Преимущества такого способа классификации:

- *Не требуются* предварительные данные об исследуемой местности. Тем не менее, для управляемой классификации необходимо иметь общее представление о регионе для интерпретации ее результатов.
- *Исключается* возможность субъективной ошибки исследователя. При проведении неуправляемой классификации исследователь, возможно, будет задавать только необходимое количество классов, а в некоторых случаях объединять их в более крупные. Многие детальные решения и опера-

ции, используемые при управляемой классификации, не требуются при неуправляемой классификации. Поверхностное представление дешифровщика о регионе не отразится на результате управляемой классификации. Классы наземного покрова, получаемые при неуправляемой классификации, обычно более однородны по спектральным характеристикам, чем полученные при управляемой классификации.

- *Возможность выделения редких классов наземного покрова* при неуправляемой классификации. Такие классы (обычно небольших размеров по площади) могут быть не определены при управляемой классификации и случайно могут быть включены в другие классы, вызывая ошибки и неточности всего процесса классификации.

Ограничения и недостатки:

- Неуправляемая классификация идентифицирует *спектрально однородные классы* для данных, которые не обязательно соответствуют классам наземного покрова, которые требуются дешифровщику. Вследствие этого дешифровщик сталкивается с проблемой совмещения спектральных классов, полученных в процессе управляемой классификации, с существующими данными для изучаемой территории. Не всегда существует прямое соответствие между этими двумя классами.
- *Спектральные свойства специфических классов* могут меняться с течением времени (например, в зависимости от сезона года). Это приводит к тому, что полученные при управляемой классификации спектральные характеристики классов наземного покрова на спутниковом изображении являются непостоянными, а закономерности, полученные для одного изображения, не могут быть распространены на другие.

5.4.1. Порядок проведения неуправляемой классификации

Обычная последовательность работ при неуправляемой классификации начинается с определения минимума и максимума классов, выделяемых соответствующим алгоритмом классификации. Эти данные могут основываться на знании дешифровщиком сцены или на требовании к точности тематического картографирования и количеству объектов наземного покрова.

Классификация начинается с произвольного выбора пикселей в качестве центров кластеров. Этот процесс обычно проводится случайным образом, чтобы устранить субъективный подход дешифровщика к классификации и обеспечить репрезентативность значений выбранных пикселей по всей сцене исследуемого изображения ДЗЗ. Соответствующий алгоритм классификации оценивает расстояние между пикселями и дает первоначальную характеристику центров кластеров пикселей (классов). Класс может быть представлен отдельной точкой (центроид класса), которая рассматривается как центр кластера пикселей определенного класса. Таким образом, на этом этапе классы состоят только из произвольных пикселей, выбранных на основе их первоначальной оценки в качестве центров классов.

На следующем этапе неуправляемой классификации все оставшиеся пиксели сцены ДЗЗ назначаются (распределяются) между ближайшими центрами классов. После этого процесса вся сцена считается классифицированной. При этом маловероятно, что классы, сформированные таким образом, могут служить оптимальным набором и будут соответствовать требованиям дешифрирования.

Во время следующего шага алгоритм классификации определяет новые центроиды для каждого класса (кластера), тем самым делая первоначальные центры неактуальными и менее точными. После этого вся сцена подвергается повторной классификации с распределением пикселей вокруг новых центров. Если

новые центроиды будут отличаться от предыдущих, то этот процесс может продолжаться несколько раз до тех пор, пока алгоритм классификации не убедится в отсутствии значительных изменений в положении центроидов и в том, что классы соответствуют требованиям, установленным для дешифрирования изображения ДЗЗ.

В процессе этого автоматического подбора программой (алгоритмом) дешифровщик не влияет на ход классификации. Поэтому такой тип классификации принято считать «оптимальным» в рамках установленных требований к изучаемым объектам местности. Кроме того, при неуправляемой классификации сохраняется «естественная» структура изображения в том смысле, что алгоритм определяет однородные группы пикселей, формирующие индивидуальные классы без влияния субъективного подхода об их единстве и распределении.

Тем не менее, весь процесс неуправляемой классификации не может полностью считаться «объективным», потому что в конечном итоге дешифровщик определяет: использование того или иного алгоритма, данных, количество исследуемых классов и даже их распределение. Каждое из этих принимаемых решений влияет на качество и точность конечного продукта дешифрирования, поэтому такую классификацию следует рассматривать с учетом всех вышеназванных обстоятельств.

Другой проблемой при неуправляемой классификации является точное соответствие выделенных классов наземным объектам. В некоторых случаях классы (кластеры пикселей) могут иметь сложные комбинации. Например, лесные насаждения могут размещаться на небольших участках в отличие от сплошных по структуре полей и сельскохозяйственных угодий. Если такие лесные участки достаточно малы для пространственного разрешения сенсора спутника, тогда общая спектральная чувствительность на эту территорию в связи с эффектом смещения пик-

селей будет различаться от «леса» до «сельскохозяйственных угодий» (рисунок 5.24).

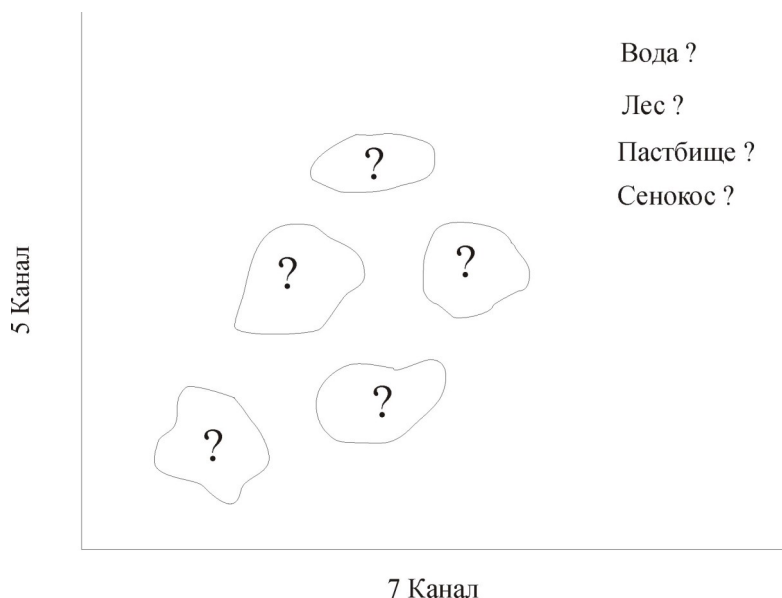


Рисунок 5.24 – Назначение спектральных кластеров объектам спутникового изображения. Неконтролируемая классификация выделяет кластеры, которые распределяются схематически на диаграмме по спектральным каналам. Дешифровщик должен решить, какой из них соответствует тому или иному классу наземного покрова

В связи со спектральной вариацией даже относительно однородные классы могут проявляться в виде набора разных классов. Например, лесные насаждения могут быть дешифрованы в виде нескольких спектральных кластеров, на формирование которых влияют различия в возрасте, полноте, местопроизрастании, тени и другие факторы, влияющие на спектральные свойства лесного насаждения. В таких случаях дешифровщик дол-

жен на основе знаний об исследуемой территории и свойствах сенсора ДЗЗ определять характер проблемы соответствующей классификации и уметь применять соответствующие меры при работе с изображением.

5.4.2. Примеры неуправляемой классификации в ENVI

Классификация алгоритмом ISODATA основана на определении средних значений кластеров пикселей (класса), равномерно распределенных в пространстве данных, с последующей повторяющейся итерацией и группировкой оставшихся пикселей на основе минимального расстояния. Каждая итерация пересчитывает средние значения и проводит переклассификацию пикселей по отношению к новым средним значениям.

Этот процесс продолжается до тех пор, пока число пикселей в каждом классе не изменится меньше, чем выбранный порог изменения пикселей, или пока не будет достигнуто максимальное количество итераций.

В качестве примера приведена классификация фрагмента мультиспектрального изображения спутника Sentinel-2 на территорию Марий Эл, сделанную в 2018 г. с пространственным разрешением 10 м.

В окне главного меню ENVI 5 Toolbox запускаем команду **Classification** → **IsoData** → **Classification** (Неуправляемая классификация IsoData) (рисунок 5.25). В открывшемся диалоговом окне **Classification Input File** (Входной файл классификации) выбирается файл исследуемого изображения. Если классификация проводится не со всем изображением, а только с его частью, то выбирается команда **Select Spatial Subset** (Выберите пространственное подмножество). В этом случае выбираются возможные варианты отграничений по площади: **Image, Map, File, ROI/EVF** (*англ.* изображение, карта, файл, регион по интересам/векторный файл ENVI). После нажатия ОК откроется диалоговое окно **ISODATA Parameters** (Параметры) (рисунок 5.26), в

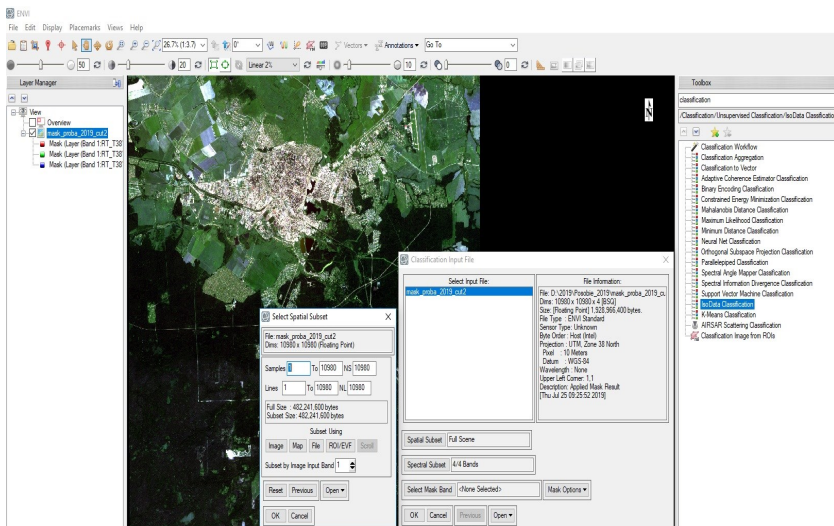


Рисунок 5.25 – Порядок классификации методом ISODATA

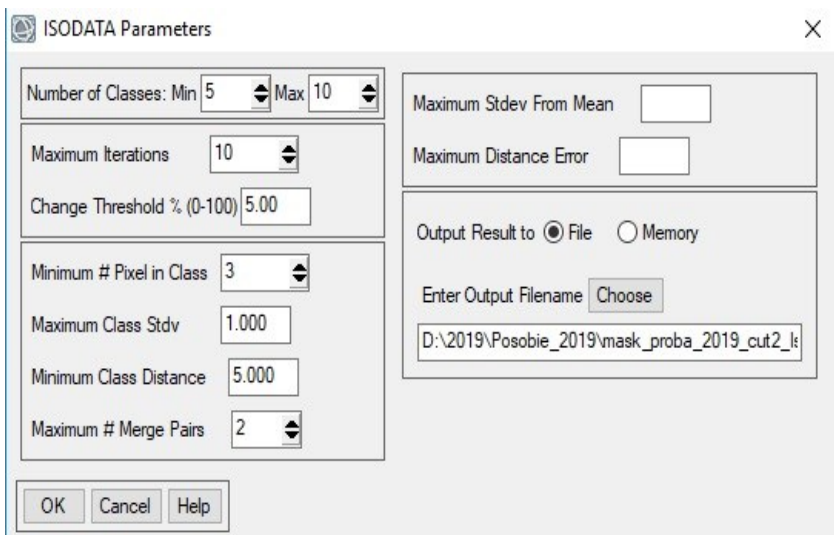


Рисунок 5.26 – Выбор параметров для ISODATA

котором по умолчанию программой предложены параметры классификации: количество классов (*англ.* Number of Classes), максимальное число итераций (*англ.* Maximum Iterations), смена порога (*англ.* Change Threshold), минимальное количество пикселей в классе (*англ.* Minimum # Pixel in Class), максимальная ошибка среднего для класса (*англ.* Maximum Class Stdv), максимальное расстояние класса (*англ.* Maximum Class Distance), максимальное число объединяемых пар (*англ.* Maximum # Merge Pairs) и др. Эти параметры могут быть изменены пользователем в связи с выполняемыми задачами.

4. Результаты классификации ISODATA можно сохранить в память (*англ.* Memory) или в файл (*англ.* File). После проведения процесса классификации новый файл с тематической картой загружается в диалоговое окно управление слоями (*англ.* Layer Manager) и появляется в виде изображения на рабочем столе ENVI 5 (рисунок 5.27).

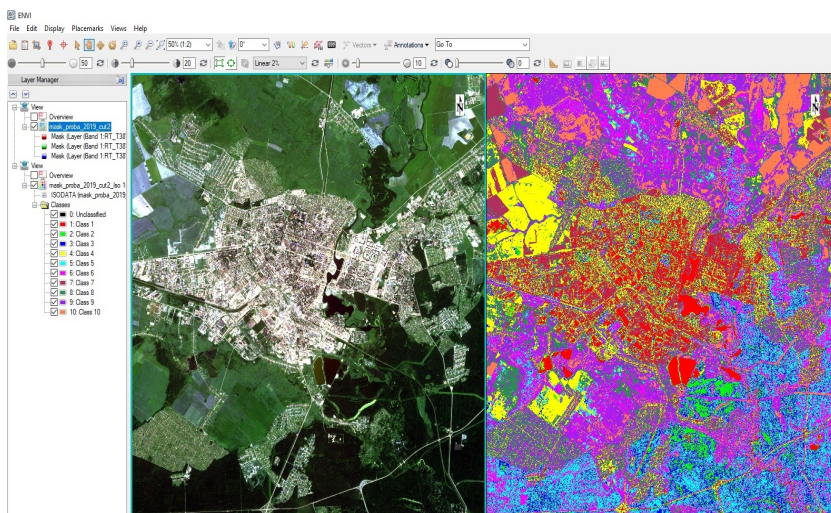


Рисунок 5.27 – Спутниковый снимок Sentinel 2 и тематическая карта после классификации ISODATA в пакете ENVI

Классификация K-Means

Неуправляемая классификация по методу K-Means (метод к-средних основан на алгоритме, который стремится минимизировать суммарное квадратичное отклонение точек кластеров от центров (центроидов) этих классов. При этом происходит разбиение множества пикселей на заранее заданное число кластеров k . Далее происходит последовательная итерация процесса классификации с целью группирования (кластеризации) оставшихся пикселей в ближайшие классы на основе метода минимального расстояния. Каждая итерация пересчитывает средние значения класса и переклассифицирует пиксели относительно новых средних.

Все оставшиеся пиксели относятся к ближайшему классу, если не указано стандартное отклонение или пороговое значение расстояния. Процесс продолжается до тех пор, пока изменение числа пикселей в каждом классе не будет выше установленного порога или пока не будет достигнуто максимальное количество итераций (L3Harris Geospatial. K-means ...). Обычно этот метод используют для изображений ДЗЗ, на которых объекты наземного покрова хорошо различимы.

В окне главного меню ENVI 5 Toolbox выбирается функция **Classification → K-Means** (Классификация K-Means). Открываем тот же файл изображения Sentinel-2, что и в предыдущем примере с классификацией методом **ISDODATA**. После нажатия команды ОК откроется диалоговое окно **K-Means Parameters** (параметры K-Means) (рисунок 5.28), в котором значения параметров классификации, так же как и в предыдущем примере, можно принять по умолчанию или ввести изменения в зависимости от поставленной задачи (рисунок 5.29).

Результаты классификации методом K-means тоже можно сохранить в виртуальной памяти компьютера или в файл. Вновь полученная тематическая карта загружается в диалоговое окно «управление слоями» (рисунок 5.30).

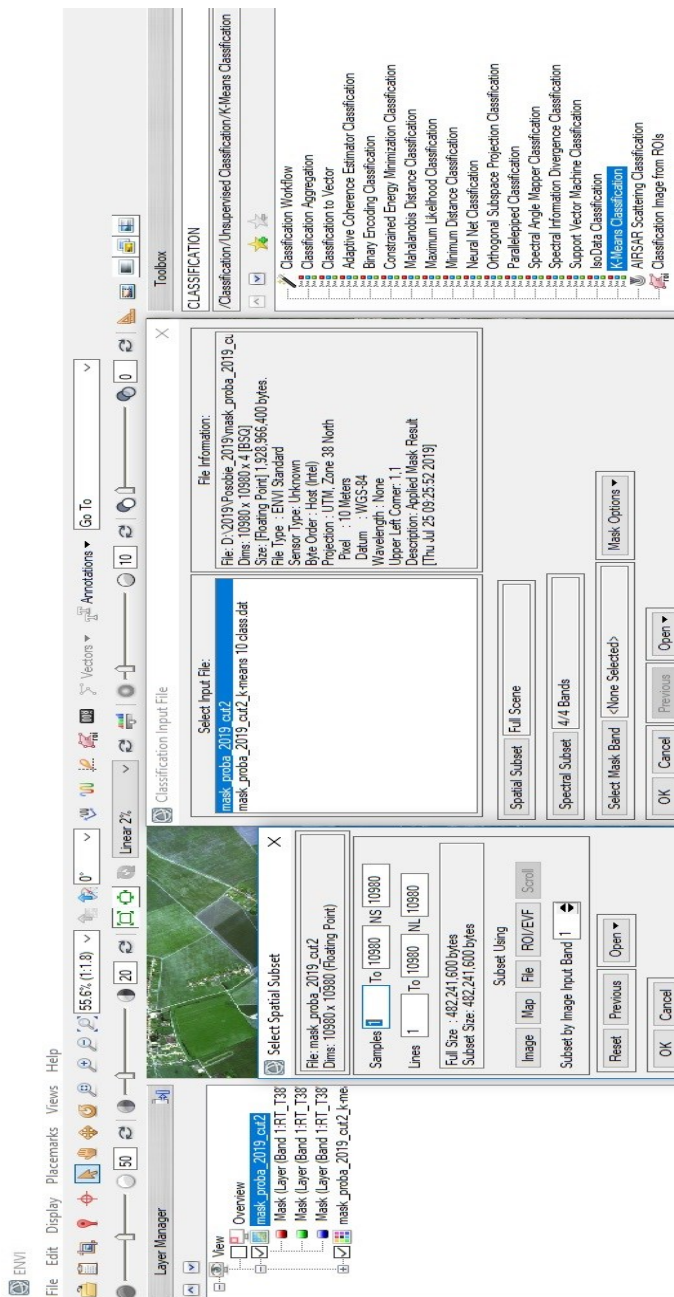


Рисунок 5.28 – Порядок классификации методом K-Means

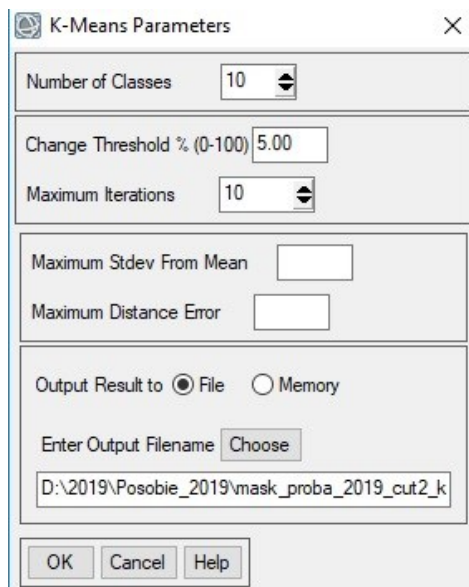


Рисунок 5.29 – Параметры классификации методом K-Means

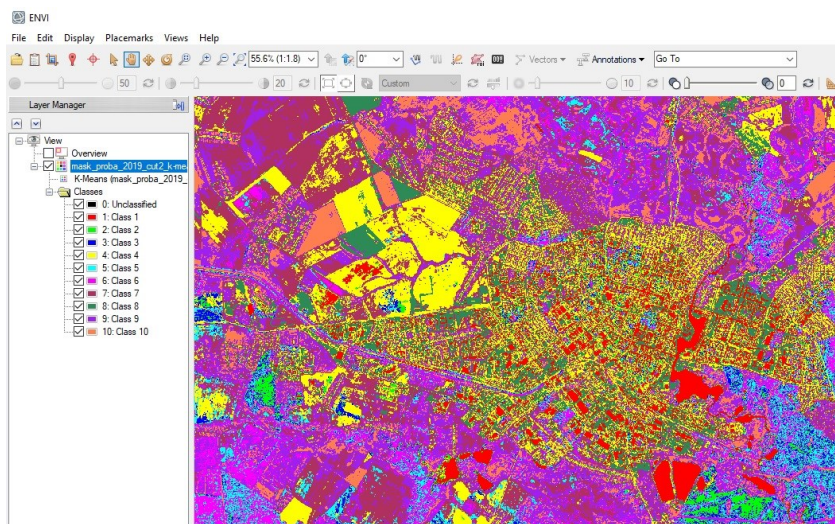


Рисунок 5.30 – Тематическая карта, полученная классификацией методом K-Means

В программе ENVI можно статистически оценить тематические классы, полученные в результате неуправляемой классификации. Для этого мы используем функцию Class Statistics (Статистика классов) (рисунок 5.31) в диалоговом окне Toolbox.

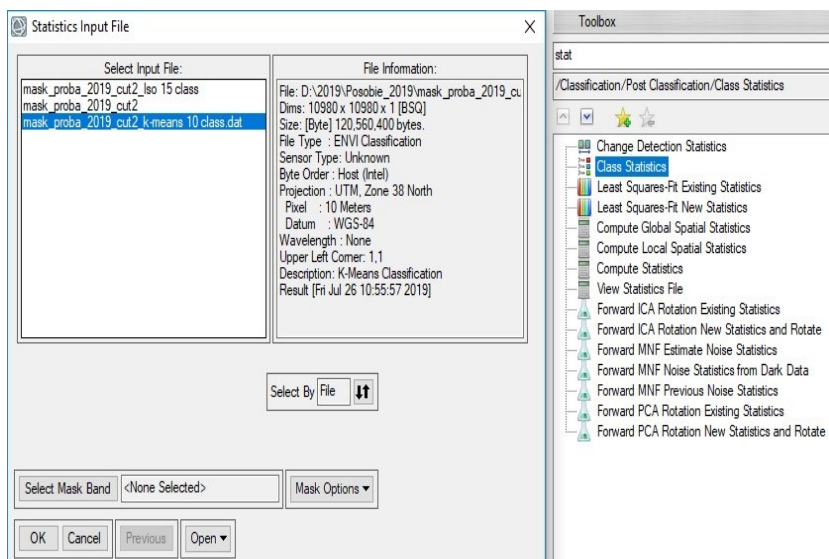


Рисунок 5.31 – Порядок оценки статистических показателей результатов классификации K-Means

После нажатия команды ОК открывается диалоговое окно, в котором мы выбираем все вновь полученные тематические классы. В нашем примере в диалоговом окне **Class Selection** (Выбор классов) выбираем все 10 классов (рисунок 5.32 а). Далее в окне **Compute Statistics Parameters** (Расчет статистических параметров) выбираем команды **Basic Stats** (Базовые статистики), **Output to the Screen** (Вывод на экран), **Output to a Statistic File** (Вывод в файл статистики) и указываем путь для его сохранения (рисунок 5.32 б).

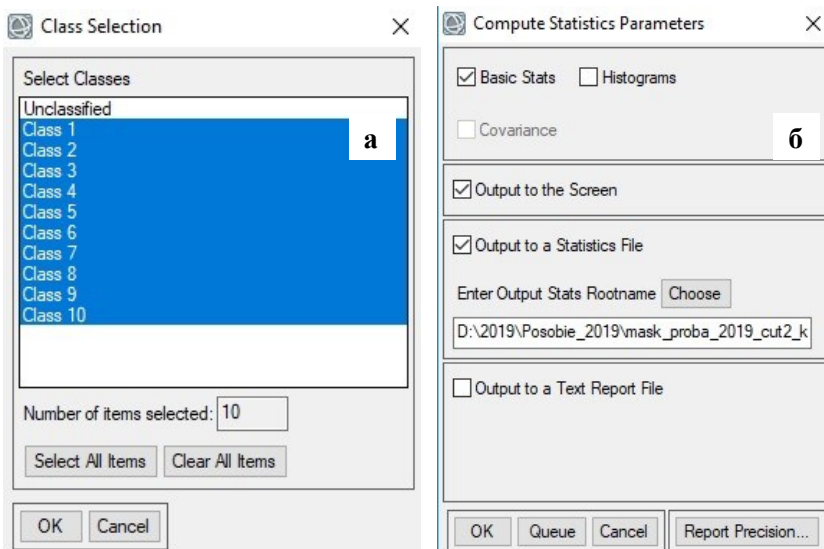


Рисунок 5.32 – Порядок выбора данных для оценки классов: а) классы для оценки ; б) статистические показатели

После нажатия команды ОК открывается новое диалоговое окно, в котором графически представлено распределение средних значений по каждому из 10 тематических классов (рисунок 5.33 а), а также распределение пикселей этих классов на тематическом изображении (рисунок 5.33 б).

В ENVI есть возможность визуального сравнения вновь полученных классифицированных изображений. Для выполнения этой команды в меню группы **View** (просмотр) выберите команду **Link Views** и оба классифицированных изображения методами ISODATA и K-means (рисунок 5.34 а). Далее с помощью команды **Link All** (связать все) проводится вывод обоих изображений на дисплей (рисунок 5.34 б). Такой визуальный анализ и наличие статистических данных в пакете ENVI позволяет выбрать наиболее оптимальный метод классификации изображений ДЗЗ.

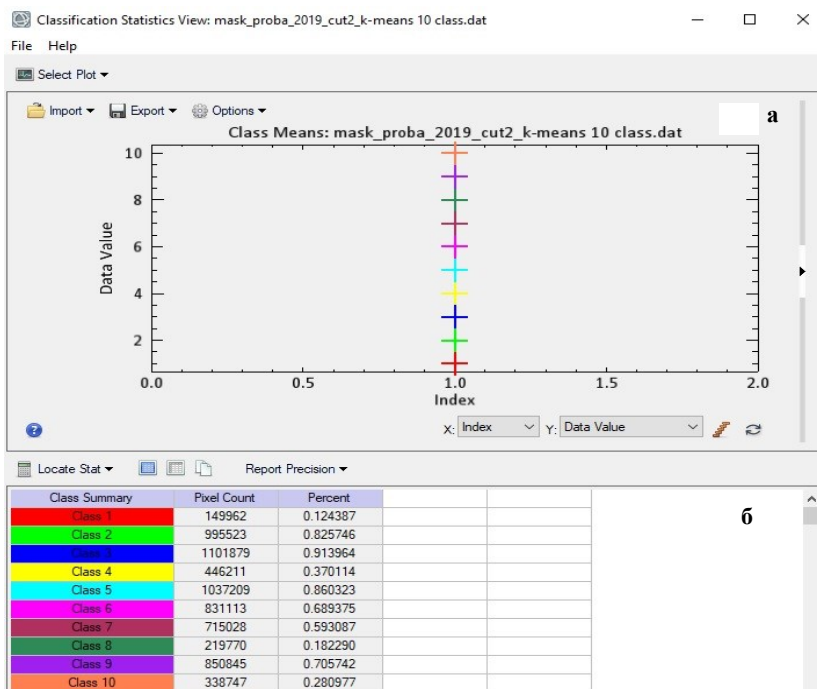


Рисунок 5.33 – Статистики результатов классификации методом K-means: а) распределение средних значений классов; б) распределение пикселей по тематическим классам

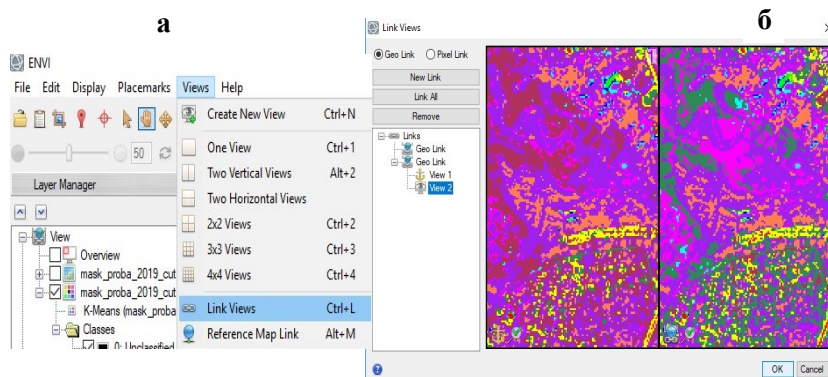


Рисунок 5.34 – Визуальное сравнение карт, полученных методами ISODATA и K-Means: а) команда связать; б) связанные изображения

5.5. Постклассификационная обработка изображений

Классифицированные изображения ДЗЗ (тематические карты) должны пройти последующую детальную обработку для оценки точности классификации и обобщения (генерализации) классов наземного покрова с целью экспорта в тематические карты и векторные ГИС. При этом попиксельная классификация растрового изображения ДЗЗ, проводимая на основе многочисленных классов наземных объектов (например, растительного покрова), может приводить к ошибкам в связи с их пространственной неоднородностью.

Для устранения таких ошибок и повышения точности создаваемой тематической продукции необходимо проведение постклассификационной обработки полученных данных. Этот процесс включает в себя несколько функций и инструментов, которые представлены в комплексном пакете ENVI.

5.5.1. Генерализация тематических изображений в ENVI

Для начала рассмотрим несколько команд ENVI 5, которые можно использовать для решения задач постклассификационной обработки изображений (тематических карт). **Extracting Class Statistics** (Выделение статистик класса) – функция (команда) позволяет получить статистики для изображения, используемого для соответствующей классификации. Кроме того, в этом варианте есть возможность рассчитать базовые статистики и построить гистограммы распределения спектральных характеристик для каждого выбранного класса наземного покрова.

Команды «Группировка» и «Просеивание» (от *англ.* **Clump и Sieving**) используются для объединения (группировки) смежных классифицированных областей изображения. Команда «Просеивание» в ENVI обычно запускается для фильтрации отдельных пикселей, которые были изолированы в процессе

классификации. Затем запускается команда **Clump**, которая приводит к пространственной согласованности существующие тематические классы путем объединения смежных классифицированных областей.

Команда ENVI «Объединение классов» (от *англ.* **Combine Classes**) используется для выборочного объединения тематических классов после процесса классификации изображения ДЗЗ. Эта команда эффективно оптимизирует (объединяет) не проклассифицированные классы наземного покрова в более крупные.

Команда **Overlaying Classes** (Наложение классов) позволяет визуализировать основные элементы классифицированного изображения в виде цветовых решений на шкале серого или RGB-изображения. Редактирование цветов класса (**Editing Class Colors**) позволяет изменить цвет, связанный с определенным классом наземного покрова.

Команда комплексной программы ENVI «Анализ большинства/меньшинства» (**Majority/Minority Analysis**) используется при применении одноименного правила к классифицированному изображению ДЗЗ. Мажоритарный анализ (анализ большинства) применяется при объединении отдельных пикселей классифицированного изображения в более агрегированный тематический класс.

При этом аналитиком задается размер группы пикселей (**Kernel Size**) соответствующего тематического класса для проведения процедуры анализа. Центальному пикселю такой группы присваивается наименование класса наземного покрова, к которому относятся большинство пикселей в этой группе. Для функции ENVI **Minority Analysis** (Анализ меньшинства) центральный пиксель будет отнесен (назначен) к тематическому классу, который представлен меньшим числом пикселей соответствующей группы.

5.5.2. Пример Majority Analysis в ENVI

В приведенном примере используется тематическая карта, полученная на основе метода управляемой классификации «максимальное правдоподобие».

На панели инструментов программы ENVI 5 выбираем **Toolbox**, в командной строке которой набираем ключевое слово **majority**. Далее пошагово переходим непосредственно к самой команде: **Classification – Post Classification – Majority/Minority Analysis** (Классификация – Постклассификация – Анализ большинства/меньшинства) (рисунок 5.35 а). После подтверждения команды откроется диалоговое окно **Classification Input File** (Входной файл классификации), в командной строке **Select Input File** (Выберите входной файл) которого вводим рабочий файл тематической карты, полученной по методу максимального правдоподобия (рисунок 5.35 б).

После подтверждения команды **OK** откроется диалоговое окно **Majority/Minority Parameters** (Параметры большинства/меньшинства). В списке классов выбираем все классы наземного покрова (Select Classes), к которым будет применен этот анализ. Далее в **Analyses Method** (Метод анализа) выбираем команду **Majority**. Ниже для команды **Kernel Size** (Размер группы) вводим 3x3. Чем выше значения размера центральной группы пикселей, тем выше степень генерализации классифицированного изображения.

Для опции **ENVI Center Pixel Weight** (Вес центрального пикселя) вводим значение 1, которое показывает число обращений программы к этому показателю при пересчете большинства (Majority) пикселей в соответствующий класс наземного покрова. Следующим шагом является выбор способа сохранения результатов процедуры **Majority**.

В команде **Output result to** (Вывод результата в) выбираем **File** (файл) и ниже указываем путь расположения его хранения.

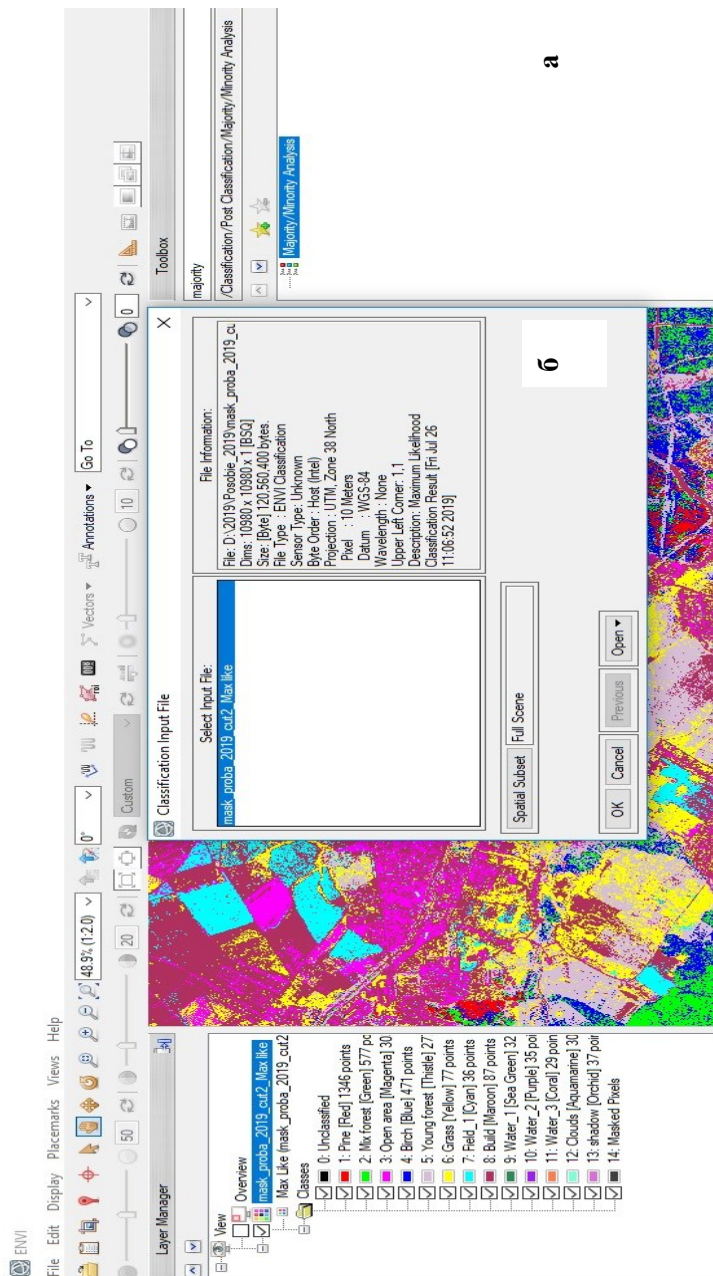


Рисунок 5.35 – Процедура Majority в ENVI 5: а) выбор команды Majority, б) выбор исходной тематической карты

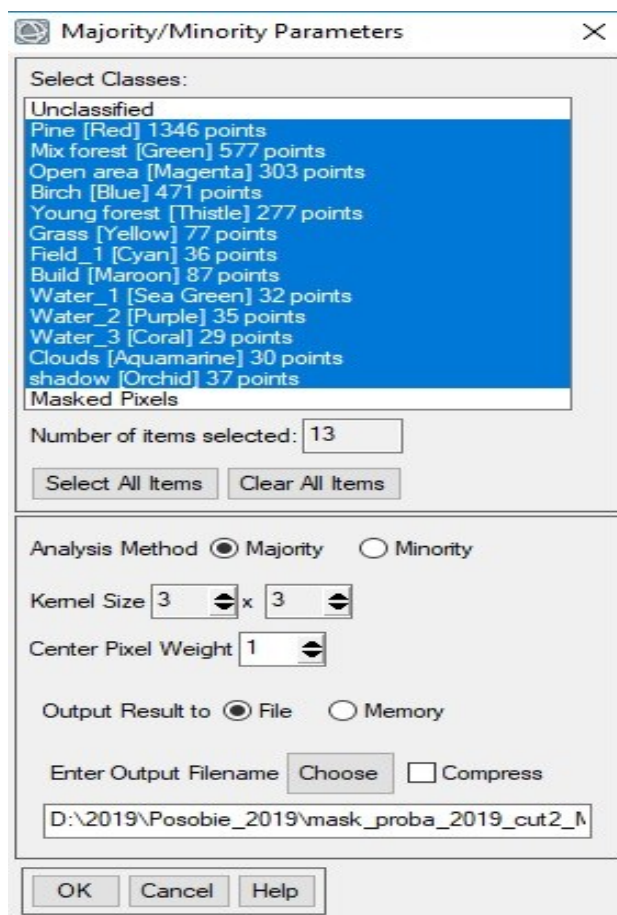


Рисунок 5.36 – Выбор тематических классов для процедуры Majority

После нажатия **OK** ENVI 5 добавляет полученный результат генерализации в виде новой карты в окно **Layer Manager** (управление слоями) (рисунок 5.37). При этом в пакете ENVI есть опция визуального сравнения исходной тематической карты изображения ДЗЗ (рисунок 5.37 а) и преобразованной после процесса генерализации (рисунок 5.37 б).

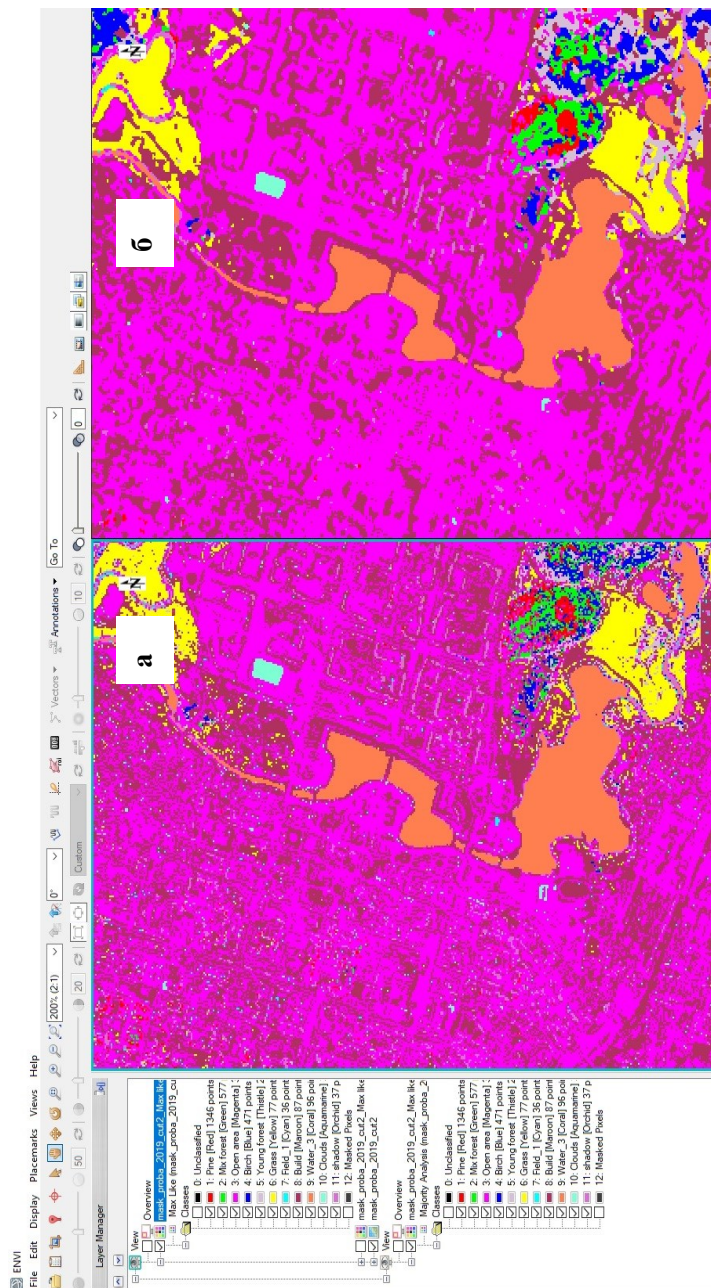


Рисунок 5.37 – Сравнение процедуры Majority analyses: а) исходная тематическая карта, б) карта после генерализации методом Majority

5.5. Оценка точности классификации изображений

Тематические карты наземного покрова представляют важную практическую информацию для специалистов лесного хозяйства и экологов. Точность тематической карты, полученной в результате классификации изображения ДЗЗ, свидетельствует о её детальности и соответствии существующим требованиям (стандартам). Поэтому разрабатываемые карты на основе данных ДЗЗ должны иметь соответствующую точность. В противном случае они не будут представлять практический интерес для пользователей.

Оценка точности может быть качественной или количественной, быстрой или трудоемкой, эффективной или случайной. Целью количественной оценки точности является выявление и измерение ошибок на тематической карте.

В некоторых случаях есть возможность повысить точность тематической карты за счет снижения ее детальности, что непосредственно связано с методикой классификации. Например, есть разные уровни детализации при дешифрировании лесного насаждения: на хвойные и лиственные, по породному составу, по возрасту (молодняки, средневозрастные, спелые и перестойные), по относительной полноте (средне- и высокополнотные) и т.п. С каждым таким уровнем возрастает детализация, что в свою очередь ведет к ошибкам и снижению точности классификации (Курбанов и др., 2018).

Степень точности классификации тоже зависит от поставленной при дешифрировании задачи. Точность 95% при разделении водных объектов и лесных насаждений вряд ли будет целесообразна, но она будет актуальна при выделении классов хвойных и смешанных насаждений. Статистически высокая точность классификации означает, что отклонение (ошибка) является минимальным, а полученные тематические классы близки к принятым эталонным значениям.

Практическая ценность карты связана не только с точностью ее классификации по изображению ДЗЗ, но также и с уровнем детализации распределения объектов наземного покрова на тематической карте, которые будут полезны аналитику (пользователю).

Существуют два типа оценки точности классификационной карты: позиционная и тематическая. *Позиционная* отражает точность расположения объектов местности на карте, а также оценивает насколько пространственное расположение объектов на карте соответствует истинному положению их на местности (Congalton, Green, 2019). *Тематическая* точность картографирования показывает соответствие или различие характеристик классов, полученных в процессе классификации дистанционного изображения с природными объектами на исследуемой местности.

Точность любой тематической карты (набора пространственных данных) в большой степени зависит от точности позиционирования. Тем не менее, тематическая точность картографирования – более сложный процесс, чем точность позиционирования. Поэтому в пособии основное внимание уделено тематической точности классификации.

В тематическом картографировании оценку точности классификации изображения ДЗЗ обычно проводят в три этапа:

1. Формирование выборки тестовых участков.
2. Сбор данных для каждого образца выборки.
3. Анализ результатов.

Для оценки точности тематического картографирования важно понимать, что тематическая карта имеет дискретный характер распределения данных и пространственной взаимосвязи (автокорреляции) этой информации. Размер (площадь) выборки для оценки точности являются важной частью процесса подготовки данных.

Существует четыре возможных варианта для определения размера выборки: (1) один пиксель, (2) кластер (часто 3×3 пикселя), квадрат пикселей, (3) многоугольник (или объект) и (4) кластер многоугольников (Congalton, Green, 2008). Для получения статистически достоверной оценки точности тематической картографирования требуется достаточное количество образцов выборки для каждого исследуемого тематического класса.

Размер выборки может и должен быть рассчитан для каждой поставленной задачи с использованием полиномиального распределения. Тем не менее, обычно руководствуются рекомендациями по набору 30-40 выборок для каждого тематического класса карт для карт площадью менее 0,5 млн га.

Сбор эталонных данных (тестовых участков) для оценки точности тематического картографирования требует выполнения некоторых правил. Расположение тестовых участков на местности должно точно соответствовать их положению на изображении ДЗЗ (тематической карте), что обычно обеспечивается точной геопривязкой на местности. Тестовый участок должен быть четко отграничен. Маркировка тестовых (эталонных) участков и тематических классов на разрабатываемой карте должна проводиться для каждой исследуемой выборки на основе схемы классификации.

Чаше всего справочные исходные данные для оценки точности представляют собой вновь собранную информацию, которая как минимум на один уровень выше и точнее, чем данные дистанционного зондирования. Для этих целей обычно используют аэрофотосъемку, лазерное сканирование, изображения более высокого разрешения, сделанные со спутников среднего и высокого пространственного разрешения (например, SPOT, Landsat, Sentinel, Ресурс). Главным и самым надежным источником информации для подготовки ТУ при оценке точности тематического картографирования являются данные полевых исследований.

Анализ результатов

Собранные справочные данные (тестовые участки) преобразуются в таблицу, которую принято называть «матрицей неточностей» (от *англ.* Confusion matrix) или «таблицей сопряженности» (таблица 5.1). Ошибки этой матрицы являются очень эффективными индикаторами при оценке точности карт. Обычно при оценке точности тематического картографирования используют следующие показатели: **общая точность классификации**, **коэффициент Кappa**, а также коэффициенты **«точность производителя»** (от *англ.* producer's accuracy) и **«точность пользователя»** (от *англ.* user's accuracy), которые характеризуют отдельную степень точности (например, конкретного класса).

Таблица 5.1 – Математический пример матрицы неточностей

j = Столбцы таблицы (опорные данные)

i = строки таблицы (данные классификации)

	1	2	3	4	5	Всего n_{i+}
1	n_{11}	n_{12}	n_{13}	n_{14}	n_{15}	n_{1+}
2	n_{21}	n_{22}	n_{23}	n_{24}	n_{25}	n_{2+}
3	n_{31}	n_{32}	n_{33}	n_{34}	n_{35}	n_{3+}
4	n_{41}	n_{42}	n_{43}	n_{44}	n_{45}	n_{4+}
5	n_{51}	n_{52}	n_{53}	n_{54}	n_{55}	n_{5+}
Всего n_{+j}	n_{+1}	n_{+2}	n_{+3}	n_{+4}	n_{+5}	N

Горизонтальные ряды матрицы неточностей (см. таблицу 5.1) представляют классы наземного покрова, полученные после классификации изображения ДЗЗ, а вертикальные столбцы – эталонные данные (тестовые участки, данные полевых исследований, другие карты, спутниковые снимки и т.п.). Значения по диагонали матрицы (серым цветом) представляют собой

число совпавших пикселей исследуемых тематических классов и реальных (эталонных) данных. Сумма по диагонали (N) показывает общее количество правильно классифицированных пикселей, а отношение этого числа к общему количеству пикселей в матрице неточностей называется общей точностью классификации (от *англ.* overall accuracy), выражаемой в процентах:

$$P = \frac{n_{11} + n_{22} + n_{33} + n_{44} + n_{55}}{N} ,$$

где n_{11} , n_{22} , n_{33} , n_{44} , n_{55} – общее количество правильно классифицированных пикселей в пределах одного класса.

Процедура оценки точности вновь разработанной тематической карты состоит из наложения всех полигональных тестовых слоев на классифицированное изображение. В результате такого наложения (сравнения) получается «матрица неточностей», которая дает оценку картографированию на основе сравнения совпавших классов.

При оценке точности классификации данных ДЗЗ значение показателя общей точности не всегда бывает достаточно, чтобы понять характер распределения и степень дешифрирования тематических классов (природных объектов на местности). Для более глубокого понимания качественной оценки разделимости классов наземного покрова важно рассматривать все другие ошибки матрицы.

Для определения точности классификации для конкретного тематического класса необходимо разделить количество правильно классифицированных пикселей этого класса на общее количество пикселей в этом классе согласно данным тестовых участков. Этот показатель также принято называть **точностью производителя** (от *англ.* producer's accuracy), поскольку он показывает соответствие (совпадение) результата классификации

соответствующего класса тестовым (опорным) данным. **Показатель точности производителя** оценивает точность полученной карты с точки зрения ее создателя (производителя) и выражается формулой

$$PU = \frac{n_{jj}}{n_{+j}},$$

где n_{jj} - количество правильно классифицированных пикселей соответствующего класса в матрице неточностей; n_{+j} - общее количество пикселей в этом классе согласно проверочным (опорным) данным.

Другим показателем классификации является **точность пользователя**, которая характеризует ее с точки зрения *пользователя карты*, а не создателя. Точность пользователя показывает вероятность совпадения соответствующего (данного) класса с результатами классификации изображений ДЗЗ.

Точность пользователя рассчитывается путем деления количества правильно классифицированных пикселей соответствующего класса на общее количество пикселей в этом классе согласно проверяемым (опорным) данным.

$$|UA = \frac{n_{ii}}{n_{i+}},$$

где n_{ii} - количество правильно классифицированных пикселей класса в матрице неточностей; n_{i+} - общее количество пикселей в этом классе согласно проверочным (опорным) данным.

Чем выше значение показателя *точности производителя*, тем меньше «ошибка пропуска» (от *англ.* omission error), которая показывает ошибочно классифицированные пиксели при сравнении с опорными (полевыми) данными. Иначе говоря, показатель ошибки пропуска (ОЕ) представляет собой долю пик-

селей, ошибочно не отнесенных (пропущенных) к изучаемому классу. То же самое касается показателя точности пользователя. Низкое значение показателя UA свидетельствует о том, что в исследуемой тематической карте выше показатель «ошибка допуска» (CE от *англ.* commission error), который определяет долю пикселей, ошибочно отнесенных (допущенных) к оцениваемому классу.

Матрица неточностей, представляя собой уникальный набор статистических данных и мощный аналитический инструмент, служит обязательным элементом (методом) оценки точности классификации любых изображений ДЗЗ. Одним из таких подходов является *анализ Каппа*, представляющий собой дискретный многовариантный метод, используемый при статистической оценке точности схожести (отличия) одного набора эмпирических данных (матрицы) от другого. Результатом анализа Каппа является одноименная статистика $\hat{k}$ (оценка Каппа), которая является еще одной мерой согласия или точности (Cohen, 1960). Коэффициент Каппа оценивает, насколько хорошо выполняется классификация изображений по сравнению с просто случайным присвоением значений.

Для оценки точности классификации на основе ее результатов и независимого (тестового) набора эмпирических данных проводится расчет коэффициента Каппа по формуле

$$\hat{k} = \frac{P - P_c}{1 - P_c},$$

где (P) – общая точностью классификации; (P_c) – точность возможной классификации, которая представляет собой предполагаемую точность случайных значений классов, присвоенных каждому пикселю (производится автоматически в программном комплексе ENVI-5 или ArGIS 10.3).

При оценке изображений ДЗЗ Каппа-коэффициент может иметь значения от -1 до + 1. Если $\hat{k} = 1$, то согласованность между исследуемыми данными является абсолютной; $\hat{k} = 0$ свидетельствует об отсутствии согласованности. Считается, что при значении $\hat{k} > 0,75$ можно говорить о значительной и высокой надежности согласованности данных, а об отсутствии надежности – при $\hat{k} < 0,40$ (таблица 5.2).

Таблица 5.2 – **Критерии согласованности данных классификации по Каппа коэффициенту** (Czaplewski, 1994)

Каппа коэффициент	Степень согласованности
< 0	нет согласованности
0.0 — 0.20	незначительная
0.21 — 0.40	слабая
0.41 — 0.60	умеренная
0.61 — 0.80	значительная
0.81 — 1.00	высокая

В связи с тем, что тематические карты грубого разрешения (низкого пространственного разрешения) обычно состоят из разного числа классов наземного покрова, общая оценка соответствия (коэффициент Каппа) обычно получается ниже единицы даже при «идеальной» классификации.

Данный метод анализа начал активно использоваться в дистанционном зондировании в начале 80-х годов прошлого столетия (Congalton et al., 1983). С тех пор было опубликовано множество статей, рекомендующих этот метод. В дистанционном зондировании анализ Каппа считается обязательным компонентом пакетов программного обеспечения для анализа, которые включают процедуры оценки точности классификации спутниковых изображений.

5.5.1. Пример оценки точности классификации классов наземного покрова

Для примера используем матрицу неточностей, составленную по результатам классификации спутникового изображения радиометра MODIS для пяти классов наземного покрова: деревья (Т – от *англ.* Trees), кустарник (S от *англ.* Shrubs), трава (Н – от *англ.* Herb), не покрытые растительностью (В – от *англ.* Bare land) и водные объекты (W – от *англ.* Water) (Курбанов и др., 2015). Значения пикселей по диагонали матрицы неточностей (табл. 5.3) показывают количество правильно классифицированных пикселей: деревья как деревья, кустарник как кустарник, трава как трава и т.п.

Таблица 5.3 – Пример матрицы неточностей для оценки тематической классификации наземного покрова

		Опорные данные							
		T	S	H	B	W	Итого	UA%	CE%
Landsat	T	140	36	15	14	9	214	65,4	34,6
	S	18	356	21	13	7	415	85,8	14,2
	H	10	36	313	8	11	378	82,8	17,2
	B	7	15	12	119	8	161	73,9	26,1
	W	7	10	7	6	64	94	68,1	31,9
Итого		182	453	368	160	99	1262		
РА%		76,9	78,6	85,1	74,4	64,6			
ОЕ%		23,1	21,4	14,9	25,6	35,4			
Сумма по диагонали		992							
Общая точность, Р		0,79							
Коэффициент Каппа, $\hat{\kappa}$		0,71							

Значения пикселей классифицированного изображения MODIS в рядах таблицы неточностей, которые не попадают на главную диагональ матрицы неточностей, показывают количество несовпадений пикселей (ошибка пропуска), выявленных по тематической карте и по наземным (независимым) данным. Например, значения пикселей первого ряда для класса «деревья» (см. таблица 5.3) расположены в других категориях: 36 – в кустарнике, 15 – в траве, 14 – в не покрытых растительностью и 9 – в воде. По этим значениям пикселей определяется ошибка пропуска (CE).

С другой стороны, значения пикселей изображения, расположенные в столбцах матрицы неточностей ниже диагонали, определяют значения ошибок допущения. Продолжая аналогию с классом «деревья», можно говорить о том, что ошибка UA вызвана неверным присвоением других категорий пикселей этому классу. Эти ошибки видны в таблице 5.3 в первом столбце: 18 пикселей классифицированного изображения отнесены к кустарнику, 10 пикселей – к траве, 7 – к не покрытой растительностью и 7 – к водным объектам. В целом можно констатировать, что из 182 пикселей «деревьев» правильно классифицированы 140 значений, что составляет 76,9 % точности классификации этого тематического класса. Остальные 42 пикселя (23,1 %) представляют собой неверно классифицированные, в основном как класс «кустарник».

Ошибка допущения (CE) для класса «травы» (17,2 %), расположенная в третьем ряду матрицы ошибок, в основном вызвана отнесением значений пикселей «травы» к категории «кустарник» (36) и другим классам. Оценка статистик матрицы неточностей позволяет выявить основные недостатки проведенной работы, что дает возможность правильно интерпретировать используемую тематическую карту и повысить точность будущей классификации.

5.5.2. Пример оценки точности в ENVI 5

В данном примере проводится сравнительный анализ классификационного изображения на базе ранее разработанной тематической карты методом «максимального правдоподобия» и набора тестовых участков (Ground Truth ROI), полученных на основе данных полевых исследований. Для точности оценки сравниваемые изображения (данные) должны иметь одинаковые размеры в двухмерном пространстве X и Y, размеры пикселей и пространственную привязку.

Порядок действий в ENVI

В окне главное меню ENVI 5 Toolbox набираем команды **Classification – Post Classification – Confusion Matrix Using Ground Truth ROIs** (Классификация – Постклассификация – Матрица неточностей с использованием ROI (участки наземного контроля)) (рисунок 5.38 а). После ввода этой команды откроется диалоговое окно **Classification Input File** (Классификация входного файла), в котором выбираем наш рабочий файл для дальнейшей оценки (рисунок 5.38 б).

Далее в открывшемся диалоговом окне **Match Classes Parameters** (Параметры соответствия классов) необходимо сопоставить контрольные участки ROI с тематическими классами, полученными в результате классификации. Для этого выбираем соответствующие классы в двух списках (Ground Truth ROI и Classification image) и подтверждаем командой **Add Combination** (Добавить комбинацию) (рисунок 5.39 а). В нашем примере были выбраны два класса **Grass** (Трава). Комбинации всех добавленных классов классифицированного изображения ДЗЗ и ROI отражаются в списке **Matched Classes** (Подобранные классы). Для перехода на следующий уровень используется команда ОК (см. рисунок 5.39 а).

В открывшемся диалоговом окне программы ENVI **Confusion Matrix Parameters** «Параметры матрицы неточностей»

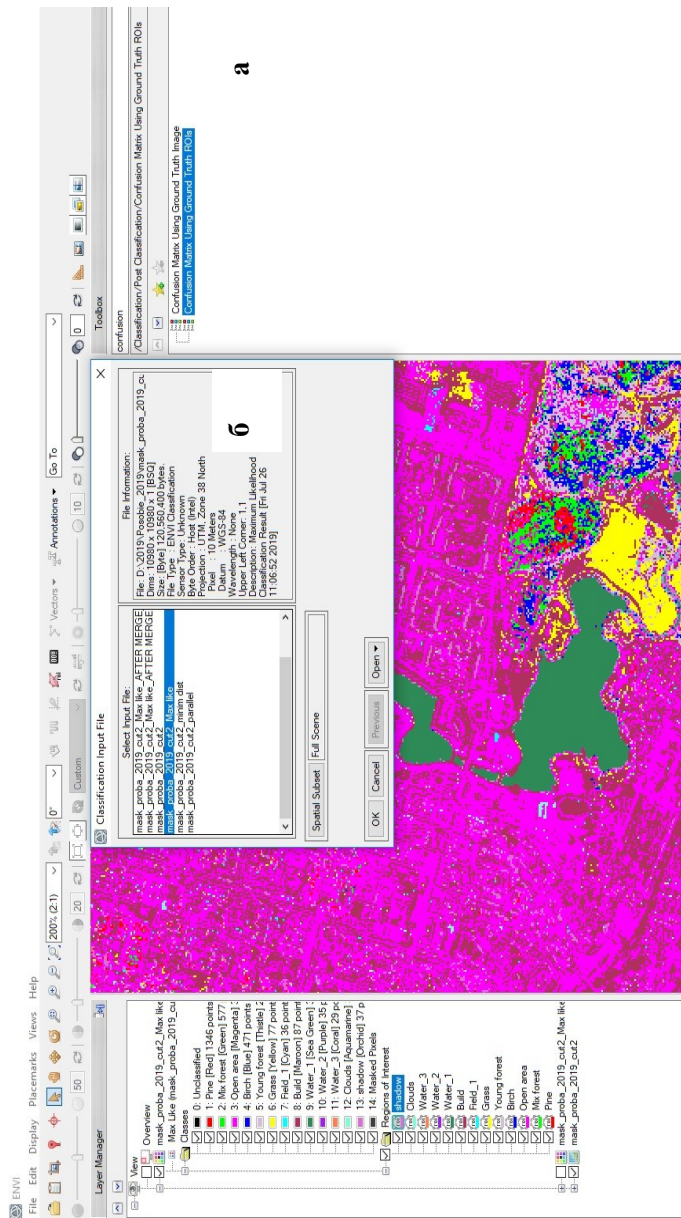


Рисунок 5.38 – Запуск матрицы неточностей в ENVI: а) выбор функции в меню Toolbox, б) выбор тематической карты

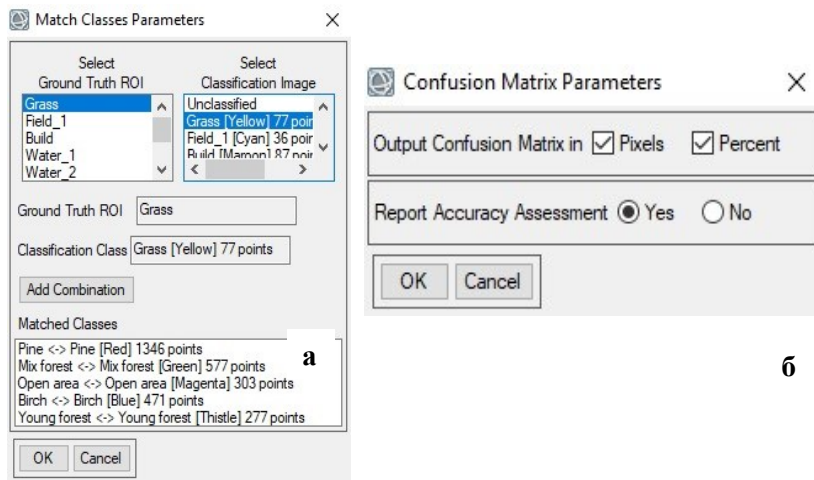


Рисунок 5.39 – Анализ результатов тематического картографирования: а) по классам и данным полевых исследований (ROI), б) выбор параметров матрицы

устанавливаются флажки **Pixels** (Пиксели) и/или **Percent** (Процент). В разделе **Report accuracy assessment** (Отчет оценки точности) выбираем **Yes** (Да) и нажимаем **ОК** (рисунок 5.39 б).

Результаты оценки точности классифицированного изображения формируются в новой таблице, которая представляет собой попарный анализ тематических данных (рисунок 5.40 а,б). В программе ENVI таблицу матрицы неточностей можно сохранить в текстовом формате ASCII на диске компьютера, воспользовавшись функцией **Output Report Filename** (Имя выходного отчета) (рисунок 5.40 в).

В полученной таблице матрицы неточностей приведены все необходимые статистики и критерии, по которым можно судить о качестве выделения каждого класса растительного покрова на тематической карте и точности классификации в целом. Общая точность классификации в данном примере составила 80,13%, а коэффициент Каппа - 0.74.

Class Confusion Matrix

File

Confusion Matrix: D:\2019\Fosobie_2019\mask_proba_2019_cut2_Max like

Overall Accuracy = (2674/3337) 80.1319%
Kappa Coefficient = 0.7452

Ground Truth (Pixels)									
Class	Pine	Mix forest	Open area	Birch	Young forest				
Unclassified	0	0	0	0	0				
Pine [Red] 13	1279	0	0	0	0	Class	Ground Truth (Percent)	Pine	Mix forest
Mix forest [G	43	391	0	98	4	Unclassified	0.00	0.00	0.00
Open area [Ma	8	0	101	0	1	Pine [Red] 13	95.02	1.39	0.00
Birch [Blue]	4	169	0	359	0	Mix forest [G	1.19	67.76	0.00
Young forest	2	9	2	14	204	Open area [Ma	0.59	0.00	33.33
Grass [Yellow	5	0	23	0	20	Birch [Blue]	0.15	1.56	0.65
Field_1 [Cyan	0	0	32	0	0	Young forest	0.00	29.20	0.00
Build [Maroon	0	0	144	0	0	Grass [Yellow	0.07	0.00	75.90
Water_1 [Sea	0	0	0	0	0	Field_1 [Cyan	0.00	0.00	12.50
Water_2 [Purp	0	0	0	0	0	Build [Maroon	0.00	0.00	47.52
Water_3 [Cora	0	0	0	0	0	Water_1 [Sea	0.00	0.00	0.00
Clouds [Aqua	0	0	1	0	0	Water_2 [Purp	0.00	0.00	0.00
shadow [Orchi	1	0	0	0	0	Water_3 [Cora	0.00	0.00	0.00
Total	1346	577	303	471	277	Clouds [Aqua	0.00	0.00	0.00
						shadow [Orchi	0.07	0.00	0.00
						Total	100.00	100.00	100.00

Ground Truth (Pixels)									
Class	Grass	Field_1	Build	Water_1	Water_2				
Unclassified	0	0	0	0	0	Class <td>Ground Truth (Percent)<td>Grass<th>Field_1</th></td></td>	Ground Truth (Percent) <td>Grass<th>Field_1</th></td>	Grass <th>Field_1</th>	Field_1
Pine [Red] 13	0	0	0	0	0	Grass <td>0.00</td> <td>0.00</td> <td>0.00</td>	0.00	0.00	0.00
Mix forest [G	0	0	0	0	0	Unclassified	0.00	0.00	0.00
Open area [Ma	0	0	7	0	0	Pine [Red] 13	0.00	0.00	0.00
Birch [Blue]	0	0	0	0	0	Mix forest [G	0.00	0.00	0.00
Young forest	4	0	0	0	0	Open area [Ma	0.00	0.00	0.00
Grass [Yellow	69	0	7	0	0	Birch [Blue]	0.00	0.00	0.00
Field_1 [Cyan	0	0	32	0	0	Young forest	0.00	0.00	0.00
Build [Maroon	0	0	73	0	0	Grass [Yellow	89.61	0.00	8.05
Water_1 [Sea	0	0	0	32	0	Field_1 [Cyan	0.00	0.00	0.00
Water_2 [Purp	0	0	0	0	35	Build [Maroon	0.00	0.00	81.91
Water_3 [Cora	0	0	0	0	0	Water_1 [Sea	0.00	0.00	180.00
Clouds [Aqua	0	0	0	0	0	Water_2 [Purp	0.00	0.00	0.00
shadow [Orchi	0	0	0	0	0	Water_3 [Cora	0.00	0.00	0.00
Total	77	36	87	32	35	Clouds [Aqua	0.00	0.00	0.00
						shadow [Orchi	0.00	0.00	0.00
						Total	100.00	100.00	100.00

Ground Truth (Pixels)									
Class	Water_1	Clouds	shadow	Total	Class	Ground Truth (Percent)	Clouds	shadow	Total
Unclassified	0	0	0	0	Unclassified	0.00	0.00	0.00	0.00
Pine [Red] 13	0	0	1	1280	Pine [Red] 13	0.00	0.00	2.00	38.40
Mix forest [G	0	0	0	536	Mix forest [G	0.00	0.00	0.00	14.06
Open area [Ma	0	0	0	117	Open area [Ma	0.00	0.00	0.00	3.51
Birch [Blue]	0	0	0	500	Birch [Blue]	0.00	0.00	0.00	17.39
Young forest	0	0	0	235	Young forest	0.00	0.00	0.00	7.84
Grass [Yellow	0	0	0	124	Grass [Yellow	0.00	0.00	0.00	7.72
Field_1 [Cyan	0	0	0	76	Field_1 [Cyan	0.00	0.00	0.00	2.28
Build [Maroon	0	0	0	217	Build [Maroon	0.00	0.00	0.00	6.50
Water_1 [Sea	0	0	0	32	Water_1 [Sea	0.00	0.00	0.00	9.46
Water_2 [Purp	0	0	0	35	Water_2 [Purp	0.00	0.00	0.00	1.05
Water_3 [Cora	29	0	0	29	Water_3 [Cora	0.00	0.00	0.00	8.87
Clouds [Aqua	0	30	51	81	Clouds [Aqua	0.00	100.00	0.00	9.93
shadow [Orchi	0	0	36	37	shadow [Orchi	0.00	0.00	97.30	6.11
Total	29	30	37	337	Total	100.00	100.00	100.00	100.00

6

Class	Commission (Percent)	Omission (Percent)	Commission (Pixels)	Omission (Pixels)
Pine [Red] 13	0.70	4.98	9/1288	67/1346
Mix forest [G	27.05	32.24	145/536	186/577
Open area [Ma	13.68	66.67	16/117	202/303
Birch [Blue]	38.10	23.78	221/580	112/471
Young forest	13.19	26.35	31/235	73/277
Grass [Yellow	44.35	10.39	55/124	8/77
Field_1 [Cyan	52.63	0.00	40/76	0/36
Build [Maroon	66.36	16.09	144/217	14/87
Water_1 [Sea	0.00	0.00	0/32	0/32
Water_2 [Purp	0.00	0.00	0/35	0/35
Water_3 [Cora	0.00	0.00	0/29	0/29
Clouds [Aquam	3.23	0.00	1/31	0/30
shadow [Orchi	2.70	2.70	1/37	1/37

Output Report Filename

B

Current Output Directory:
D:\2019\Possible_2019

Enter Output Filename

D:\2019\Possible_2019\mask_proba_2019_out2.N

Class	Prod. Acc. (Percent)	User Acc. (Percent)	Prod. Acc. (Pixels)	User Acc. (Pixels)
Pine [Red] 13	95.02	99.30	1279/1346	1279/1288
Mix forest [G	67.76	72.95	391/577	391/536
Open area [Ma	33.33	86.32	101/303	101/117
Birch [Blue]	76.22	61.90	359/471	359/580
Young forest	73.65	86.81	204/277	204/235
Grass [Yellow	89.61	55.65	63/77	63/124
Field_1 [Cyan	100.00	47.37	36/36	36/76
Build [Maroon	83.91	33.64	73/87	73/217
Water_1 [Sea	100.00	100.00	32/32	32/32
Water_2 [Purp	100.00	100.00	35/35	35/35
Water_3 [Cora	100.00	100.00	29/29	29/29
Clouds [Aquam	100.00	96.77	30/30	30/31
shadow [Orchi	97.30	97.30	36/37	36/37

Рисунок 5.40 – Матрица неточностей в программе ENVI: а) сопоставляемые классы, б) статистики оценки точности, в) сохранение итогового текстового файла

Class		Commission (Percent)		Omission (Percent)		Commission (Pixels)		Omission (Pixels)	
Class	Commission (Percent)	Omission (Percent)							
Pine [Red] 13	0.70	4.98			9/1288	67/1346			
Mix forest [G	27.05	32.24			145/536	186/577			
Open area [Ma	13.68	66.67			16/117	202/303			
Birch [Blue]	38.10	23.78			221/580	112/471			
Young forest	13.19	26.35			31/235	73/277			
Grass [Yellow	44.95	10.39			55/124	8/77			
Field_1 [Cyan	52.63	0.00			40/76	0/36			
Build [Maroon	66.36	16.09			144/217	14/87			
Water_1 [Sea	0.00	0.00			0/32	0/32			
Water_2 [Purp	0.00	0.00			0/35	0/35			
Water_3 [Cora	0.00	0.00			0/29	0/29			
Clouds [Aquam	3.23	0.00			1/31	0/30			
shadow [Orchi	2.70	2.70			1/37	1/37			

Class		Prod. Acc. (Percent)		User Acc. (Percent)		Prod. Acc. (Pixels)		User Acc. (Pixels)	
Class	Prod. Acc. (Percent)	User Acc. (Percent)							
Pine [Red] 13	95.02	99.30			1279/1346	1279/1288			
Mix forest [G	67.76	72.95			391/577	391/536			
Open area [Ma	33.33	86.32			101/303	101/117			
Birch [Blue]	76.22	61.90			359/471	359/580			
Young forest	73.65	86.81			204/277	204/235			
Grass [Yellow	89.61	55.65			69/77	63/124			
Field_1 [Cyan	100.00	47.37			36/36	36/76			
Build [Maroon	83.91	33.64			73/87	73/217			
Water_1 [Sea	100.00	100.00			32/32	32/32			
Water_2 [Purp	100.00	100.00			35/35	35/35			
Water_3 [Cora	100.00	100.00			29/29	29/29			
Clouds [Aquam	100.00	96.77			30/30	30/31			
shadow [Orchi	97.30	97.30			36/37	36/37			

Output Report Filename **B**

Current Output Directory:
D:\2019\Fosobie_2019

Enter Output Filename

D:\2019\Fosobie_2019\mask_proba_2019_cut2_N

OK Cancel

Рисунок 5.40 – Матрица неточностей в программе ENVI: а) сопоставляемые классы, б) статистики оценки точности, в) сохранение итогового текстового файла

5.6. Преобразование данных классификации в векторный формат

После создания классифицированных изображений наземного покрова по данным ДЗЗ возникает необходимость последующей работы с этими данными в среде ГИС (Геоинформационной системе). С этой целью в дистанционном зондировании проводится векторизация полученных растровых тематических изображений.

Процедура векторизации проводится аналитиком после выполнения классификации изображений ДЗЗ, последующей их генерализации и оценки точности вновь полученной тематической карты. В программном комплексе ENVI заложен простой двухэтапный процесс, который используется для преобразования классифицированных растровых данных в векторную файловую структуру.

5.6.1. Векторизация данных классификации в ENVI

В окне главное меню **ENVI 5 Toolbox** набираем функцию **Raster to Vector** (Растр в вектор) (рисунок 5.41 а). Во вновь открывшемся диалоговом окне **Raster To Vector Input Band** (Диапазон ввода растра в вектор) выбираем наше рабочее классифицированное изображение на исследуемую территорию и нажимаем ОК (рисунок 5.41 б).

В новом окне **Raster To Vector Parameters** «Параметры растра в вектор» комплексным пакетом ENVI 5 предлагается несколько вариантов перевода растровых данных в векторные (рисунок 5.42). В опции **Output** (Вывод файла) можно выбрать все изучаемые классы наземного покрова или каждый такой класс по отдельности. В нашем примере в опции **Output** отмечаем команду **One Layer per Class** (Один векторный слой на класс). Для команды **Output Result to** (Вывод файла) в этом же окне устанавливаем команду в **File** (Файл).

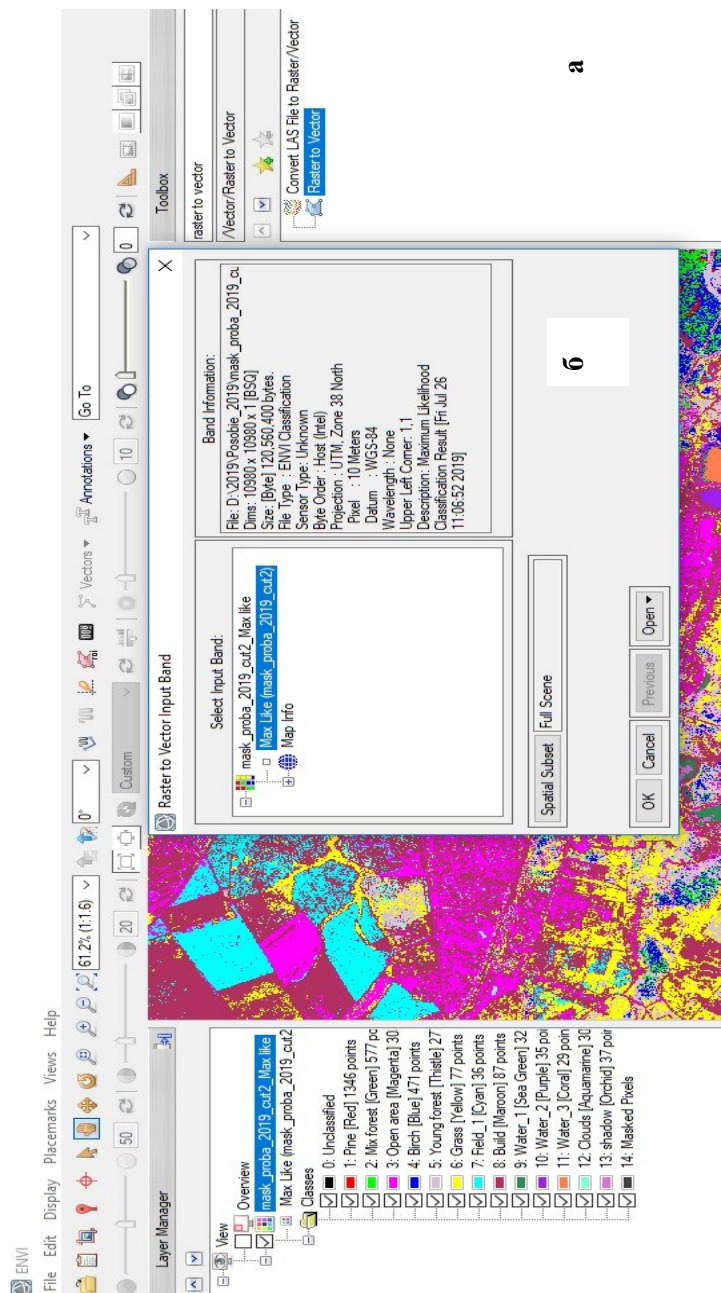


Рисунок 5.38 – Преобразование растрового изображения в векторное в пакете ENVI

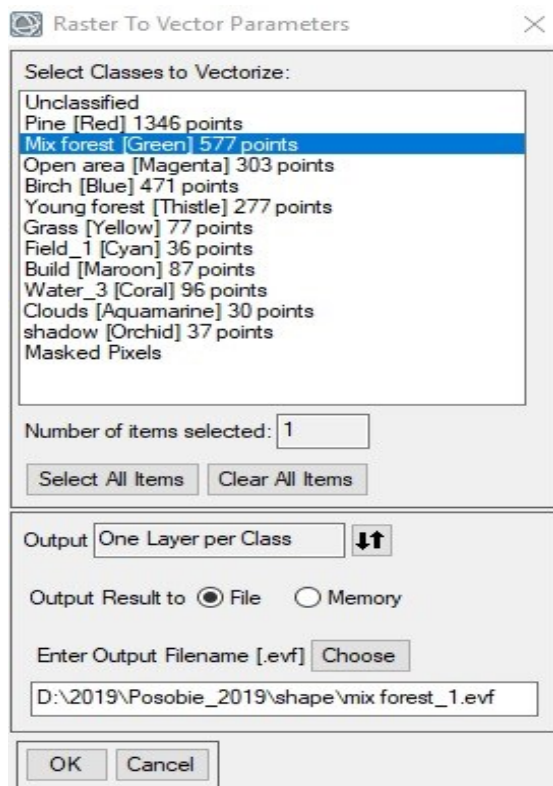


Рисунок 5.42 – Выделение отдельного растрового слоя в вектор

В строке команды пакета ENVI **Enter Output Filename** (Введите имя выходного файла) указываем путь сохранения на диске компьютера, имя выходного рабочего файла (в нашем случае, mix forest – смешанные насаждения) и нажимаем ОК (см. рисунок 5.42). В результате этих действий будет создан векторный файл с расширением «EVF» для программы ENVI. Полученный векторный слой после введения в окно **Layer Manager** (Диспетчер слоев) будет отражен на рабочем экране ENVI (рисунок 5.43).

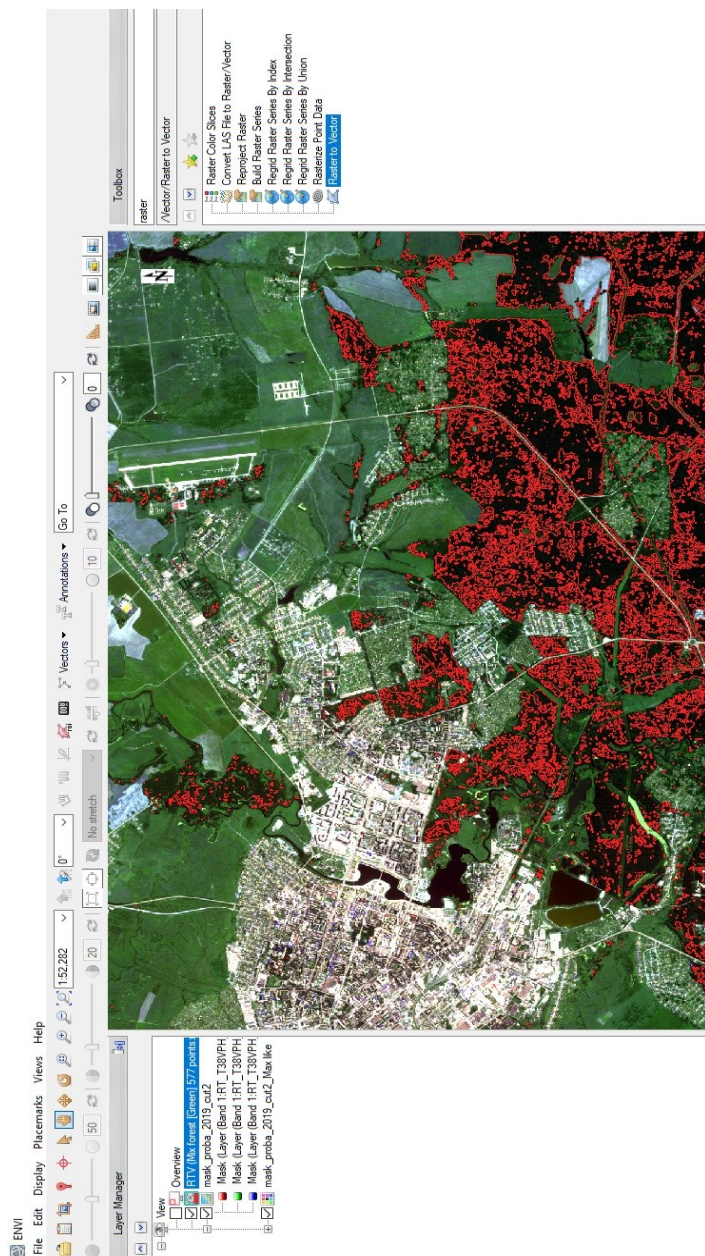


Рисунок 5.43 – Вновь полученный векторный слой в окне Layer Manager

5.6.2. Экспорт файла с расширением «EVF» в формат шейп в пакете ENVI

Для дальнейшей работы в среде ГИС вновь полученный векторный слой изображения ДЗЗ необходимо перевести в наиболее распространённый среди пользователей векторный формат *шейп* (англ. Shape). Для выполнения этой команды в окне главное меню ENVI 5 **Toolbox** выбираем функцию **Classic EVF – to Shapefile** (Классический EVF – в шейп файл) (рисунок 5.44).

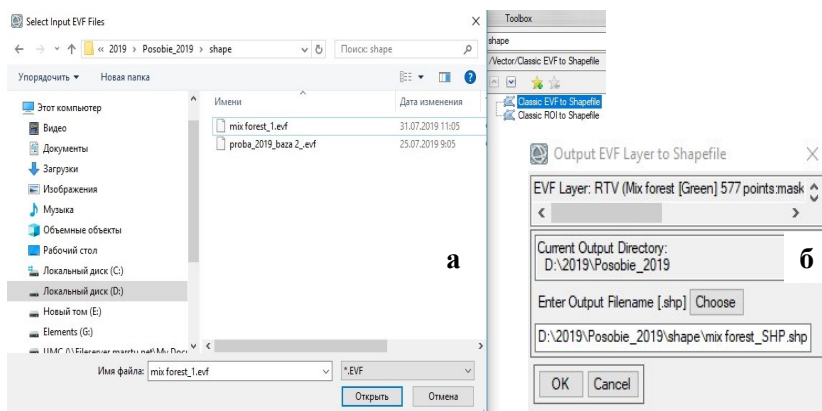


Рисунок 5.44 – Команды пакета ENVI для экспорта векторного слоя EVF в шейп формат

В появившемся окне **Select Input EVF file** (Выберите входной файл EVF) вводим соответствующее имя рабочего файла *mix forest_1.evf* и подтверждаем это действие командой **OK** (см. рисунок 5.44 а). Далее в открывшемся диалоговом окне **Output EVF Layer to Shapefile** (Вывод слой EVF в шейп-файл) вводим имя выходного файла векторного слоя (см. рисунок 5.44 б). При этом новый файл будет иметь расширение «shp» (в нашем примере – *mix forest.shp*).

После завершения процесса векторизации для визуализации тематической карты классов наземного покрова открываем вновь полученный шейп-файл в геоинформационной среде. В нашем примере это сделано в пакете ArcGIS (рисунок 5.45), который распознает названия классов, полученных в программе ENVI, но использует свою собственную цветовую схему распознавания тематических классов. При необходимости в пакете ArcGIS можно вернуться к цветам классов наземного покрова, полученным в пакете ENVI, выбрав соответствующую команду на главной панели.

Таким образом, в программе ENVI 5 формируются тематические векторные слои, предназначенные для дальнейшей работы в среде ГИС.

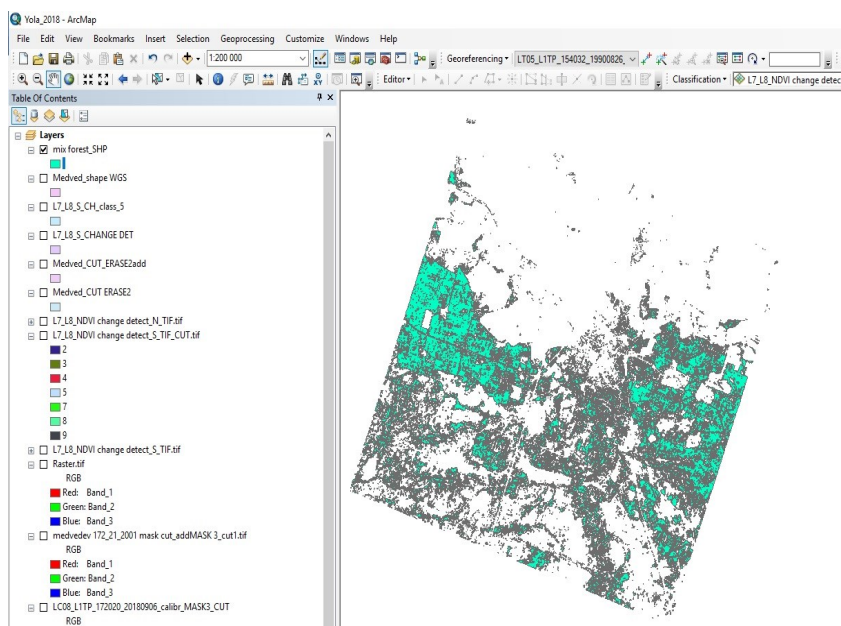


Рисунок 5.45 – Вновь полученный векторный слой в формате шейп в ArcGIS

Контрольные вопросы по разделу 5

1. В чем заключается принцип классификации изображений дистанционного зондирования?
2. Что такое пространство спектральных признаков и как оно используется для классификации изображений?
3. С какой целью проводится предварительная обработка данных и почему этот этап особенно важен для классификации изображений ДЗЗ?
4. Какие типы классификации изображений вы знаете? Приведите примеры наиболее используемых в ДЗЗ.
5. В чем преимущества и недостатки управляемой классификации?
6. Для чего служит обучающая выборка? Приведите требования, предъявляемые к обучающей выборке.
7. Какие методы (алгоритмы) управляемой классификации используются в ДЗЗ? Приведите примеры их использования, укажите преимущества и недостатки каждого метода.
8. Расскажите о способах и подходах к оценке разделимости тематических классов на изображении ДЗЗ, используемых до процедуры классификации.
9. Расскажите про последовательность действий формирования обучающей выборки ROI на базе комплексного пакета ENVI.
10. В чем преимущества и недостатки неуправляемой классификации?
11. Расскажите о порядке проведения неуправляемой классификации для оценки лесного покрова на изображении ДЗЗ.
12. Приведите последовательность шагов для выполнения процесса классификации на изображении ДЗЗ.

13. Какие методы (алгоритмы) неуправляемой классификации используются в ДЗЗ? Приведите примеры их использования, преимущества и недостатки каждого метода.
14. В чем различие между методом средних и алгоритмом ISODATA?
15. Для чего нужна постклассификационная обработка изображений ДЗЗ? Приведите примеры такой обработки.
16. Какие типы оценки точности классификационной карты вы знаете? В чем их разница?
17. Составьте простую матрицу неточностей с указанием нескольких тематических классов и объясните, как определяется общая точность классификации.
18. Опишите основные статистики, используемые для оценки точности тематической классификации изображения ДЗЗ.
19. Для чего нужен процесс трансформации растерянного изображения ДЗЗ в векторный формат?

СЛОВАРЬ ТЕРМИНОВ

База данных – совокупность данных, организованных по определенным правилам, устанавливающим общие принципы описания, хранения и манипулирования данными. Хранение данных в БД обеспечивает централизованное управление, соблюдение стандартов, безопасность и целостность данных, сокращает избыточность и устраняет противоречивость данных.

Векторная графика – формат описания объектов и изображений ДЗЗ в компьютерной графике, основанный на математическом описании элементарных геометрических объектов: точки, линии, сплайны, круги, окружности, многоугольники.

Векторно-растровое преобразование (*англ.* rasterization, vector of raster conversion) – процедура преобразования (конвертирования) векторного представления пространственных объектов в растровое путем присваивания элементам растра значений соответствующих им векторных записей объектов.

Валидация – оценка независимых измерений качественных и количественных показателей данных дистанционного зондирования на их соответствие требованиям, предназначенным для конкретного пользователя (*ISO 9000:2005*)

Гари – относятся к не покрытым лесом землям и включают участки леса, поврежденные пожарами до степени прекращения роста.

Географическая информационная система, ГИС (*англ.* geographic(al) information system, GIS, spatial information system) – информационная система, обеспечивающая сбор, хранение, обработку, доступ, отображение и распространение пространственно-координированных данных.

Геоинформационный анализ (*англ.* GIS based analysis) – анализ размещения, структуры, взаимосвязей объектов и явлений с использованием методов пространственного анализа и гео моделирования.

Древостой – надземная часть древесного яруса лесных насаждений (лесных сообществ).

Картографическая база данных (*англ.* cartographic data base (database)) – совокупность взаимосвязанных картографических данных по какой-либо предметной (тематической) области, представленная в цифровой форме при соблюдении общих правил описания, хранения и манипулирования данными. К. б. д. доступна многим пользователям, не зависит от характера прикладных программ и управляется системой управления базами данных (СУБД).

Класс бонитета – единица оценки продуктивности насаждений (древостоев), которая зависит от качества лесорастительных условий и определяется по величине средней высоты преобладающей породы в определенном возрасте.

Масштаб (*англ.* Scale) – отношение длины бесконечно малого отрезка на изображении ДЗЗ к длине соответствующего бесконечно малого отрезка на местности (поверхности Земли). Он показывает, во сколько раз расстояние на карте уменьшено относительно расстояния на местности. Масштаб 1 : 1 0 000 значит, что 1 см на карте соответствует 100 м на местности.

Мультиколлинеарность (*англ.* Multicollinearity) – наличие линейной зависимости между независимыми переменными (факторами) регрессионной модели (*Магнус, 2004*).

Лесной покров – участки лесной территории какого-либо ландшафта, покрытые совокупностью лесных сообществ, представляющих собой возрастные этапы различных форм динамики лесообразовательного покрова, образующие отдельные лесные массивы.

Лесной квартал – часть леса, ограниченная на местности просеками или другими натурными границами.

Лесистость – степень облесенности территории, определяемая отношением площади покрытых лесом земель к общей ее площади.

Лесорастительные условия – комплекс экологических факторов, определяющих условия роста леса. Обозначаются буквенными и численными показателями, характеризующими плодородие (А, В, С, D) и влажность (0, 1, 2, 3, 4, 5) почвы.

Метаданные – субканальная информация об используемых данных, показывающая дополнительные сведения об изучаемом объекте. Метаданные раскрывают сведения о признаках и свойствах, характеризующих какие-либо объекты, позволяющие автоматически искать и управлять ими в больших базах данных.

Нарушенность (англ. Disturbance) – термин, который используется в экологии для описания уменьшения или полного исчезновения лесной растительности под влиянием внешних факторов. Данный термин не включает естественные процессы гибели лесов. Внешними факторами нарушенности могут быть пастьба, рубка, пожар или заморозки (Wainwright and Mulligan, 2013).

Переклассификация – аналитическая операция, направленная на преобразование слоя карты по заданному условию (Jebur, 2015).

Полигон (англ. polygon) – 2-мерный (площадной) объект, один из четырех основных типов пространственных объектов (наряду с точками, линиями и поверхностями), внутренняя область, образованная замкнутой последовательностью дуг в векторно-топологических представлениях или сегментов в модели 'спагетти' и идентифицируемая внутренней точкой (меткой) и ассоциированными с ней значениями атрибутов. Различают *простой полигон* (simple polygon), не содержащий внутренних полигонов (inner polygon), и *составной полигон* (complex polygon). Совокупность полигонов образует полигональный слой.

Погибшие насаждения относятся к не покрытым лесом землям и включают участки леса с усохшими на корню деревьями в результате воздействия энтомологических и фитопатологических вредителей, промышленных выбросов, вымокания и других отрицательных факторов среды, а также участки со сплошным ветровалом и буреломом.

Подрост – молодое поколение древесных растений естественного происхождения под пологом леса высотой не более 1/4 высоты основного яруса древостоя.

Полнота – степень плотности размещения деревьев в древостое, характеризующая долю использования ими занимаемого пространства. Различают *абсолютную* полноту (сумма площадей поперечных сечений всех деревьев в древостое на высоте груди (1,3 м) в пересчете на один гектар) и *относительную* полноту (отношение сумм площадей поперечных сечений реального древостоя и эталонного древостоя при полноте 1.0).

Позиционирование (англ. positioning, GPS measurement) – измерения с помощью систем спутникового позиционирования с целью определения координат местонахождения объекта в трехмерном земном пространстве. В GPS и ГЛОНАСС измерения проводят кодовым или фазовым методами псевдодальности от приемника до 4 или большего числа спутников.

Преобладающая порода – древесная порода, на долю которой приходится большая часть запаса стволовой древесины древостоя. При государственном учете лесов или лесоустройстве для насаждений из основных лесообразующих пород рассчитывают средний возраст, общий средний прирост.

Растровая графика – форма компьютерной графики, центральным элементом которой является пиксель. В настоящее время благодаря высокой степени разрешения экранов растрового изображения различают пассивную и интерактивную визуализацию.

Сомкнутость полога – величина отношения суммы площадей горизонтальных проекций крон деревьев (без учета площади их перекрытия) к общей площади участка леса.

Тестовый участок – участок территории, выбранный в качестве эталона для проведения исследования основных свойств, их взаимосвязи и взаимодействия (*Экологический словарь, 2014*).

Точность карты (*англ.* map accuracy) – соответствие действительности изображенных на карте объектов и явлений; истинность их местоположения, размеров, плановых очертаний и высотного положения.

Цифровая картография (*англ.* digital cartography) – раздел картографии, охватывающий теорию и методы создания и практического применения цифровых карт и цифровых пространственно-временных картографических моделей.

Цифровая модель рельефа, ЦМР (*англ.* Digital Elevation Model, DEM) – цифровое представление 3-мерных пространственных объектов (поверхностей, рельефов) в виде трехмерных данных, полученных при обработке топографических материалов. ЦМР представляет собой информацию о высоте поверхности земли без учёта растительности, зданий и других высотных объектов, которые на ней находятся.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Барталев, С.А. Разработка информационной системы поддержки мониторинга состояния и динамики наземных экосистем Северной Евразии по данным спутниковых наблюдений / С.А. Барталев, М.А. Бурцев, Е.А. Лупян, А.А. Прошин, И.А. Уваров // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2004. – № 1. – С. 131-139.
2. Барталев, С.А. Спутниковое картографирование растительного покрова России / С.А. Барталев, В.А. Егоров, В.О. Жарко, Е.А. Лупян, Д.Е. Плотников, С.А. Хвостиков, Н.В. Шабанов. – Москва: ИКИ РАН, 2016. – 208 с.
3. Барталев, С.А. Оценка площади пожаров на основе комплексирования спутниковых данных различного пространственного разрешения MODIS и Landsat-TM/ETM+ / С.А. Барталев, В.А. Егоров, В.Ю. Ефремов, Е.А. Лупян, Ф.В. Стыценко, Е.В. Флитман // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2012. – Т.9, № 2. – С. 9-26.
4. Барталев, С.А. Состояние и перспективы развития методов спутникового картографирования растительного покрова России / С.А. Барталев // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2015. – Т. 12, № 5. – С. 203-221.
5. ВЕГА-PRO спутниковый сервис анализа вегетации [Электронный ресурс]. – URL: <http://pro-vega.ru/>
6. Воробьев, О.Н. Методика выявления степени повреждения древостоев после пожаров 2010 года в Среднем Поволжье / О.Н. Воробьев, Э.А. Курбанов, С.А. Лежнин, Ю.А. Полевщикова, Е.Н. Демишева // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2014. – Т. 11, № 4. – С. 217-229.
7. Воробьев, О.Н. Дистанционный мониторинг устойчивости лесных экосистем: монография / О.Н. Воробьев, Э.А. Курбанов, Е.Н. Демишева, С.А. Меньшиков, М.С. Али, Л.Н. Смирнова, Л.В. Тарасова. – Йошкар-Ола: Поволжский государственный технологический университет, 2019а. – 166 с.
8. Воробьев, О.Н. Пространственно-временной анализ динамики лесного покрова в Среднем Поволжье по спутниковым данным: моногра-

фия / О.Н. Воробьев, Э.А. Курбанов, Ю.А. Полевщикова, С.А. Лежнин; под общ. ред. проф. Э. А. Курбанова. – Йошкар-Ола: Поволжский государственный технологический университет, 2019б. – 200 с.

9. Воробьев, О.Н. Оценка динамики и нарушенности лесного покрова в Среднем Поволжье по снимкам Landsat // О.Н. Воробьев, Э.А. Курбанов, Ю.А. Полевщикова, С.А. Лежнин / Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2016. – Т. 13. – № 4. – С. 124-134.

10. Воробьев, О.Н. Дистанционный мониторинг лесных гарей в Марийском Заволжье / О.Н. Воробьев, Э.А. Курбанов, А.В. Губаев, С.А. Лежнин, Ю.А. Полевщикова // Вестник ПГТУ. – Йошкар-Ола: Поволжский государственный технологический университет. – 2012. – № 1. – С. 12-22.

11. Габделхаков, А.К. Фитомасса и формирование липняков лесостепной зоны Республики Башкортостан / А.К. Габделхаков, З.З. Рахматуллин, Ф.Ф. Рамазанов, И.Р. Рахматуллина. – Уфа: Мир печати, 2014. – 156 с.

12. Геопортал данных ДЗЗ Роскосмоса [Электронный ресурс]. – URL: <https://www.roscosmos.ru>

13. Денисова, А.Ю. Пространственная классификация преобладающих древесных пород на территории Самарской области по данным Sentinel-2 и таксации леса / А.Ю. Денисова, Л.М. Кавеленова, Е.С. Корчиков, Н.В. Прохорова, Д.А. Терентьева, В.А. Федосеев // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2019. – Т. 16, №4. – С. 86–101.

14. Жарко В.О. Исследование возможностей оценки запасов древесины в лесах Приморского края по данным спутниковой системы Proba-V / В.О. Жарко, С.А. Барталев, В.А. Егоров // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2018. – Т. 15, № 1. – С. 157-168

15. Заичко, В.А. Основные направления развития Российской системы ДЗЗ из космоса / В.А. Заичко, М.Н. Хайлов // Дистанционное зондирование земли из космоса в России. Сборник информационных материалов (научно-практический журнал). – 2019. – №1. – С. 8-15.

16. Елсаков, В.В. Современные изменения растительного покрова пастбищ северного оленя Тиманской тундры по результатам анализа

данных спутниковой съёмки / В.В. Елсаков, В.М. Щанов // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2019. – Т. 16, № 2. – С. 128-142.

17. Елсаков, В.В. Межгодовые изменения индекса NDVI на территории европейского северо-востока России и западной Сибири в условиях климатических флуктуаций последних десятилетий / В.В. Елсаков, М.Ю. Телятников // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2013. – Т. 10, № 3. – С. 260–271

18. Елсаков, В.В. Растительный покров Югорского полуострова в условиях климатических изменений последних десятилетий / В.В. Елсаков, Е.Е. Кулюгина // Исследование Земли из космоса. – 2014. – № 3. – С. 65-77.

19. Жирин, В.М. Динамика спектральной яркости породно-возрастной структуры групп типов леса на космических снимках Landsat / В.М. Жирин, С.В. Князева, С.П. Эйдлина // Лесоведение. – 2014. – № 4. – С. 3-12.

20. Козодеров, В.В. Модели распознавания и оценки состояния лесной растительности по гиперспектральным данным дистанционного зондирования / В.В. Козодеров, Е.В. Дмитриев // Исследования Земли из космоса. – 2017. – № 6. – С. 78-88.

21. Курбанов, Э.А. Оценка точности и сопоставимости тематических карт лесного покрова разного пространственного разрешения на примере Среднего Поволжья / Э.А. Курбанов, О.Н. Воробьев, С.А. Лежнин, А.В. Губаев, Ю.А. Полевщикова // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2015а. – Т. 13, № 1. – С. 1-15.

22. Курбанов, Э.А. Тематическое картирование растительного покрова по спутниковым снимкам: валидация и оценка точности: монография / Э.А. Курбанов, О.Н. Воробьев, С.А. Лежнин, А.В. Губаев, Ю.А. Полевщикова. – Йошкар-Ола: Поволжский государственный технологический университет, 2015б. – 126 с.

23. Курбанов, Э.А. Оценка лесных гарей Чувашии методами дистанционного зондирования / Э.А. Курбанов, О.Н. Воробьев, С.А. Лежнин, Ю.А. Полевщикова // Вестник ИРГСХА. – 2013. – № 54. – С. 80-97.

24. Курбанов, Э.А. Четыре десятилетия исследований лесов по снимкам Landsat / Э.А. Курбанов, О.Н. Воробьев, А.В. Губаев, С.А. Лежнин,

Ю.А. Полевщикова, Е.Н. Демишева// Вестник Поволжского государственного технологического университета. Сер.: Лес. Экология. Природопользование. – 2014. – № 1(21).– С. 18-32

25. Курбанов, Э.А. Тематическое картирование и стратификация лесов Марийского Заволжья по спутниковым снимкам Landsat / Э.А. Курбанов, О.Н. Воробьев, С.А. Незамаев, А.В. Губаев, С.А. Лежнин, Ю.А. Полевщикова // Вестник ПГТУ. – Йошкар-Ола: Поволжский государственный технологический университет. Сер.: Лес. Экология. Природопользование. – № 3. – 2013. – С. 72-82.

26. Курбанов, Э.А. Распознавание лесных насаждений и доминирующих древесных пород Пензенской области по данным спутника Sentinel-2 / Э.А. Курбанов, О.Н. Воробьев, С.А. Меньшиков, Л.Н. Смирнова // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2018. – Т. 15, № 5. – С. 154-166.

27. Лупян, Е.А. Спутниковый сервис мониторинга состояния растительности / Е.А. Лупян, И.Ю. Савин, С.А. Барталев, В.А. Толпин, И.В. Балашов, Д.Е. Плотников // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – Москва: ИКИ РАН. – 2011. – Т.8, № 1. – С. 190–198.

28. Лупян, Е.А. Использование спутникового сервиса ВЕГА в региональных системах дистанционного мониторинга / Е.А. Лупян, С.А. Барталев, В.А. Толпин, В.О. Жарко, Ю.С. Крашенинникова, А.Ю. Оксюкевич //Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2014. – Т. 11, № 3. – С. 215–232.

29. Медведева, М.А. Возможности различных мультиспектральных космических данных для мониторинга неиспользуемых пожароопасных торфяников и эффективности их обводнения / М.А. Медведева, А.Е. Возбранная, А.А. Сирин, А.А. Маслов // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2019. – Т. 16, № 2. – С. 150–159.

30. Рахматуллин, З.З. Картографические методы исследований объектов природы / З.З. Рахматуллин, И.Р. Рахматуллина, А.К. Габделхаков // Лесные экосистемы в условиях изменения климата: биологическая продуктивность и дистанционный мониторинг: сборник научных статей. – Йошкар-Ола: ПГТУ, 2018. – № 4. – С. 100-110.

31. Совзонд. Обучение: Вопросы и ответы [Электронный ресурс]. – URL: <https://sovzond.ru/learning/self-study/faq/>
32. СКАНЭКС. – [Электронный ресурс]. URL: <http://www.scanex.ru/software/>
33. СКАНЭКС. – [Электронный ресурс]. URL: <https://http://www.scanex.ru/data/satellites/noaa-18-19/>
34. Сухих, В.И. Аэрокосмические методы в лесном хозяйстве и ландшафтном строительстве: учебник / В.И. Сухих. – Йошкар-Ола, МарГТУ, 2005. – 392 с.
35. Терехин, Э.А. Анализ каналов спутниковых данных Landsat TM для оценки характеристик лесных насаждений лесостепной провинции Среднерусской возвышенности / Э.А. Терехин // Исследование Земли из космоса. – 2012. – №2. – С. 53-61.
36. Терехин, Э.А. Оценка нарушенности лесных экосистем юго-запада Среднерусской возвышенности с применением материалов космических съемок / Э.А. Терехин // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2017. – Т. 14, № 4. – С. 112–124.
37. Терехин, Э.А. Процессы лесовозобновления на залежных землях юга Западной Сибири и их анализ с применением данных дистанционного зондирования / Э.А. Терехин, Т.С. Постернак // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2019. – Т. 16, № 4.– С. 161–172.
38. Ховратович, Т.С. Метод детектирования изменений лесов на основе попиксельной оценки проективного покрытия древесного полога по разновременным спутниковым изображениям / Т.С. Ховратович, С.А. Барталев, А.В. Кашницкий // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2019. – Т. 16, № 4.– С. 102– 110.
39. Чабан, Л.Н. Автоматизированная обработка аэрокосмической информации для картографирования геопространственных данных: учебное пособие / Л.Н. Чабан. – Москва: МИИГАиК, 2013. – 104 с.
40. Aanes, H. Model-based satellite image fusion / H. Aanes, J.R. Sveinsson, A.A. Nielsen, T. Bøvith, J.A. Benediktsson // IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing. – 2008. – Vol. 46. – P. 1336-1346.

41. Amro, I. A survey of classical methods and new trends in pansharpening of multispectral images // I. Amro, J. Mateos, M. Vega, R. Molina, A.K. Katsaggelos / EURASIP Journal on Advances in Signal Processing. – 2011. – Vol. 79. – P. 1–22.
42. Avitabile, V. An assessment of forest biomass maps in Europe using harmonized national statistics and inventory plots / V. Avitabile, A. Camia // Forest Ecology and Management. – 2018. – Vol. 409. – P. 489–498.
43. Andersona, K. Earth observation in service of the 2030 Agenda for Sustainable Development / K. Andersona, B. Ryana, W. Sonntaga, A. Kavvadab, L. Friedl // Geo-spatial Information Science. – 2017. – Vol. 20, № 2. – P. 77–96.
44. Baig, M.H.A. Derivation of a tasseled cap transformation based on Landsat 8 at-satellite reflectance / M.H.A. Baig, L. Zhang, T. Shuai, Q. Tong // Remote Sensing Letters. – 2014. – Vol. 5, № 5. – P. 423–431.
45. Baumbach, L. Impacts of temperature extremes on European vegetation during the growing season / L. Baumbach, J. F. Siegmund, M. Mittermeier, R. V. Donner // Biogeosciences. – 2017. – Vol. 14. – P. 4891 - 4903.
46. Bossard, M. CORINE land cover technical guide - Addendum 2000 / M. Bossard, J. Feranec, J. Otahel // Technical Report.– 2000.– № 40.–105 p.
47. Campbell, J.B. Introduction to Remote Sensing / J.B. Campbell. – 3rd Edition, The Guilford Press. – 2002. – 621 p.
48. Campbell, J.B. Introduction to Remote Sensing / J.B. Campbell. – 4th Edition, The Guilford Press. – 2008. – 626 p.
49. Campbell, J.B. Introduction to Remote Sensing / J.B. Campbell, R.H. Wynne. – 5th Edition, The Guilford Press. – 2011. – 667 p.
50. Chavez, P.S. Comparison of three different methods to merge multi resolution and multispectral data: Landsat TM and SPOT panchromatic // P.S. Chavez, S.C. Sides, J.A. Anderson / Photogrammetric Engineering & Remote Sensing. – 1991. – Vol. 57. – P. 295–303.
51. Chuvieco, E. Fundamentals of satellite remote sensing: an environmental approach. Second Edition. Boca Raton/ London. New York: CRC Press Taylor & Francis, 2016. – 468 p.
52. Crist, E.P. A TM tasseled cap equivalent transformation for reflectance factor data / E.P. Crist // Remote Sensing of Environment. – 1985. – № 17. – P. 301–306.

53. Cohen, J. A coefficient of agreement for nominal scales // J. Cohen // Educational and Psychological Measurement. – 1960. – № 20. – P. 37–46.
54. Colditz, R.R. Influence of image fusion approaches on classification accuracy: A case study // R.R. Colditz, T. Wehrmann, M. Bachmann, K. Steinnocher, M. Schmidt, G. Strunz, S. Dech / International Journal of Remote Sensing. – 2006. – Vol. 27. – P. 3311–3335.
55. Congalton, R.G. Assessing the accuracy of remotely sensed data : principles and practices / R.G. Congalton, K. Green. – 2nd ed. CRC Press Taylor & Francis. – 2019. – 328 p.
56. Congalton, R.G. Assessing the accuracy of remotely sensed data : principles and practices / R.G. Congalton, K. Green // 3d ed. CRC Press Taylor & Francis. – 2008. – 183 p.
57. Congalton, R.G. Assessing Landsat classification accuracy using discrete multivariate statistical techniques / R.G. Congalton, R.G. Oderwald, R.A. Mead // Photogrammetric Engineering and Remote Sensing. – 1983. – Vol. 49, №. 12. – P. 1671–1678.
58. CORINE Pan-European [Electronic resource]. – URL: <https://land.copernicus.eu/pan-european/corine-land-cover>.
59. Copernicus Global Land Service [Electronic resource] – URL: <https://land.copernicus.eu/global/>
60. Clark, M.L. Estimation of tropical rain forest aboveground biomass with small-footprint lidar and hyperspectral sensors / M.L. Clark, D.A. Roberts, J.J. Ewel, D.B. Clark // Remote Sensing of Environment. – 2011. Vol. 115. – P. 2931–2942.
61. Czaplewski, R. Variance approximations for assessments of classification accuracy / R. Czaplewski / Fort Collins: US Department of Agriculture, Forest Service. Research paper RM–316. – 1994. – 30 p.
62. Duda, R.O. Pattern classification / R.O. Duda, P.E. Hart, D.G. Stork. – New York: John Wiley & Sons, 2001, – p. 654.
63. eaPortal Directory. OrbView-3 [Electronic resource]. – URL: <https://directory.eoportal.org/web/eoportal/satellite-missions/o/orbview-3>
64. Edwards, K. The use of intensity-hue-saturation transformation for producing color shaded-relief images // K. Edwards, P. Davis // Photogrammetric Engineering and Remote Sensing. – 1994. – Vol. 60. – P. 1369–1373.

65. Ehlers, M. Multi-sensor image fusion for pansharpening in remote sensing / M. Ehlers, S. Klonus, P.J. Astrand, P. Rosso // *International Journal of Image and Data Fusion*. – 2010. – № 1. – P. 25-45.
66. Epting, J. Evaluation of remotely sensed indices for assessing burn severity in interior Alaska using Landsat TM and ETM+ / J. Epting, D. Verbyla, B. Sorbel // *Remote Sensing of Environment*. – 2005. – Vol. 96. – P. 328 - 339.
67. ESA. Sentinel online [Electronic resource]. – URL: <https://sentinel.esa.int/web/sentinel/user-guides/sentinel-2-msi/resolutions/spatial>
68. ESA. – Missions [Electronic resource]. – URL: <https://sentinel.esa.int/web/sentinel/missions/sentinel-2>.
69. Fassnacht, F.E. Review of studies on tree species classification from remotely sensed data / F.E. Fassnacht, H. Latifi, K. Stereńczak, A. Modzelewska, M. Lefsky, L.T. Waser et al. // *Remote Sensing of Environment*. – 2016. – Vol. 186. – P. 64-87.
70. Ghosh, S. Long-term monitoring of biophysical characteristics of tidal wetlands in the northern Gulf of Mexico – A methodological approach using MODIS / S. Ghosh, D.R. Mishra, A.A. Gitelson // *Remote Sensing of Environment*. – 2016. – Vol. 173. – P. 39-58.
71. Grabska, E. Forest stand species mapping using the sentinel-2 time series / E. Grabska, P. Hostert, D. Pflugmacher, K. Ostapowicz // *Remote Sensing*. – 2019. – Vol. 11, № 10. – ID: 1197.
72. Healey, S.P. Comparison of Tasseled Cap-based Landsat data structures for use in forest disturbance detection / S.P. Healey, W.B. Cohen, Y. Zhiqiang, O. Krankina // *Remote Sensing of Environment*. – 2005. – № 97. – P. 301 – 310.
73. Hai-Hoa, N. The relationship of spatial temporal changes in fringe mangrove extent and adjacent land-use: Case study of Kien Giang coast, Vietnam / N. Hai-Hoa, C. McAlpine, D. Pullar, K. Johansen, N.C. Duke // *Ocean Coastal Management*. – 2013. – №76. – P. 12-22.
74. Haapanen, R. Delineation of forest/non forest land use classes using nearest neighbor methods / R. Haapanen, A.R. Ek, M.E. Bauer, A.O. Finley // *Remote Sensing of Environment*. – 2004. – Vol. 89. – P. 265-271.
75. Hansen, M.C. Detecting long-term Global forest change using continuous fields of tree-cover maps from 8-km advanced very high resolution

radiometer (AVHRR) data for the years 1982-99 / M.C. Hansen, R.S. DeFries // *Ecosystems*. – 2004. – № 7. – P. 695-716.

76. Hepinstall-Cymerman, J. Using Urban Landscape Trajectories to Develop a Multi-Temporal Land Cover Database to Support Ecological Modeling / J. Hepinstall-Cymerman, S. Coe, M. Alberti // *Remote Sensing*. – 2009. – № 1. – P. 1353-1379.

77. Hoschilo, A. Post-fire vegetation response as a proxy to quantify the magnitude of burn severity in tropical peatland / A. Hoschilo, K.J. Tansey, S.E. Page // *International Journal of Remote Sensing*. – 2013. – Vol. 34, № 2. – P. 412-433.

78. Howard, J.A. Remote sensing of forest resources: theory and application / J.A. Howard. – New York: Chapman & Hall, 1991. – 420 p.

79. Huang, H. Separability analysis of Sentinel-2A multi-spectral instrument (MSI) data for burned area discrimination / H. Huang, D.P. Roy, L. Boschetti, H.K. Zhang, L. Yan, S.S. Kumar et al. // *Remote Sensing*. – 2016. – Vol. 8, № 10. – 873.

80. Hudak, A.T. The relationship of multispectral satellite imagery to immediate fire effects / A.T. Hudak, P. Morgan, B.M.J. Smith, S.A. Lewis, L.B. Lentile, P.R. Robichaud et al. // *Journal of Fire Ecology*. – 2007. – Vol. 3. – P. 64-90.

81. Hudson, W. Correct formulation of the kappa coefficient of agreement / W. Hudson, C. Ramm // *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*. – 1987. – Vol. 53, № 4. – P. 421 – 422.

82. Huete, A.R. A soil-adjusted vegetation index (SAVI) / A.R. Huete // *Remote Sensing of Environment*. – 1988. – Vol. 25, № 3. – P. 295-309.

83. Huete A.R. A comparison of vegetation indices global set of TM images for EOS-MODIS / A.R. Huete, H.Q. Liu, K. Batchily, W. YanLeeuwen // *Remote Sensing of Environment*. – 1997. – Vol. 59. – P. 440-451.

84. Jalan, S. Comparison of different pansharpening methods for spectral characteristic preservation: multi-temporal CARTOSAT-1 and IRS-P6 LISS-IV imagery // S. Jalan, B.S. Sokhi // *International Journal of Remote Sensing*. – 2012. – Vol. 33. – P. 5629-5643.

85. Jensen, J.R. Introductory digital image processing: a remote sensing perspective / J.R. Jensen. – 4th Edition, Pearson Series in Geographic Information Science. – 2015. – 656 p.

86. Johnson, B. Satellite Image Pansharpening Using a Hybrid Approach for Object-based Image Analysis / B. Johnson, R. Tateishi, N. Hoan // ISPRS International Journal of Geo-Information. – 2012. – Vol. 1. – P. 228-241.
87. Jose R.R.L. Using MODIS-NDVI for the modeling of post-wildfire vegetation response as a function of environmental conditions and pre-fire restoration treatments / R.R.L. Jose, W.J.D. van Leeuwen, G.M. Casady // Remote Sensing. – 2012. – Vol. 4. – P. 598-621.
88. Joint Research Centre, 2019 [Electronic resource]. – URL: <https://ec.europa.eu/jrc/en/about/jrc-in-brief>.
89. Johnson, B. Effects of pansharpening on vegetation indices // B. Johnson / ISPRS International Journal of Geo-Information. – 2014. – Vol. 3. – P. 507-522.
90. Kane, V.R. Comparisons between field- and LiDAR-based measures of stand structural complexity / V.R. Kane, R.J. McGaughey, J.D. Bakker, R.F. Gersonde, J.A. Lutz, J.F. Franklin // Canadian Journal of Forest Research. – 2010. – Vol. 40. – P. 761-773.
91. Kangas, A. Value of airborne laser scanning and digital aerial photogrammetry data in forest decision making / A. Kangas, T. Gobakken, S. Puliti, M. Hauglin, E. Nasset // Silva Fennica. – 2018. – Vol. 52, № 1, article id 9923.
92. Karlson, M. Assessing the potential of multi-seasonal WorldView-2 imagery for mapping West African agroforestry tree species / M. Karlson, M. Ostwald, H. Reese, H.R. Bazié, B. Tankoano // International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation. – 2016. – Vol. 50. – P. 80-88.
93. Kasischke, E.S. Evaluation of the composite burn index for assessing fire severity in Alaskan black spruce forests / E.S. Kasischke, M.R. Turetsky, R.D. Ottmar, N.H.F. French, E.E. Hoy, E.S. Kane // International Journal of Wildland Fire. – 2008. – Vol. 17. – P. 515-526.
94. Keenan, R.J. Dynamics of global forest area: results from the FAO Global Forest Resources Assessment 2015 / R.J. Keenan, G.A. Reams, F. Achard, J.V. de Freitas, A. Grainger, E. Lindquist // Forest Ecology and Management. – 2015. – Vol. 352. – P. 9-20.
95. Karasiak, N. Mapping tree species of forests in southwest France using Sentinel-2 image time series / N. Karasiak, D. Sheeren, M. Fauvel,

J. Willm, J.F. Dejoux, C. Monteil // 9th International Workshop on the Analysis of Multitemporal Remote Sensing Images (MultiTemp). – Brugge, 2017. – P. 1-4.

96. Kotivuori, E. Nationwide airborne laser scanning based models for volume, biomass and dominant height in Finland / E. Kotivuori, L. Korhonen, P. Packalen // *Silva Fennica*. – 2016. – Vol. 50, № 4, article id 1567. – 28 p.

97. Kurbanov, E. Assessment of burn severity in Middle Povolzhje with Landsat multi-temporal data/ E. Kurbanov, O. Vorobyev, S. Leznin, Y. Polevshikova, E. Demisheva // *International Journal of Wildland Fire*. – 2017. – Vol. 26, № 9. – P. 772-782.

98. Lanorte, A. Fisher–Shannon information plane analysis of SPOT/VEGETATION normalized difference vegetation index (NDVI) time series to characterize vegetation recovery after fire disturbance / A. Lanorte, R. Lasaponara, M. Lovallo, L. Telesca // *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*. – 2014. – Vol. 26. – P. 441–446.

99. L3Harris Geospatial [Electronic resource]. – URL: <https://www.harrisgeospatial.com/Software-Technology/ENVI>

100. L3Harris Geospatial. Landsat [Electronic resource]. – URL: <https://www.harrisgeospatial.com/Learn/Blogs/Blog-Details/ArtMID/10198/ArticleID/15691/The-Many-Band-Combinations-of-Landsat-8>

101. L3Harris Geospatial. Tools [Electronic resource]. – URL: <https://www.harrisgeospatial.com/docs/displaytools.html#EnhancementTools>

102. L3Harris Geospatial Solutions. Convolution and Morphology Filters. [Electronic resource]. – <https://www.harrisgeospatial.com/docs/convolutionmorphologyfilters.html>

103. L3Harris Geospatial. Atmospheric correction [Electronic resource]. – URL: <https://www.harrisgeospatial.com/docs/AtmosphericCorrection.html>

104. Image Registration [Electronic resource]. – URL: <https://www.harrisgeospatial.com/docs/ImageRegistration.html>

105. L3Harris Geospatial. K-means <https://www.harrisgeospatial.com/docs/KMeansClassification.html>

106. Landsat Science. Landsat 8 [Electronic resource]. – URL: <https://landsat.gsfc.nasa.gov/landsat-data-continuity-mission/>

107. Lillesand, T.M. Remote Sensing and Image Interpretation / T. Lillesand, R.W. Kiefer, J.W. Chipman. – 7th Ed. John Wiley and Sons Ltd.

– 2015. – 736 p.

108. Lillo-Saavedra, M. Spectral or spatial quality for fused satellite imagery? A trade-off resolution using the wavelet a'trous algorithm / M. Lillo-Saavedra, C. Gonzalo / *International Journal of Remote Sensing*. – 2006. – Vol. 27 (7). – P. 1453–1464.

109. Loboda, T. Land Management and the Impact of the 2010 Extreme Drought Event on the Agricultural and Ecological Systems of European Russia / T. Loboda, O. Krankina, I. Savin, E. Kurbanov, H. Joanne // *Land-Cover and Land-Use Changes in Eastern Europe after the Collapse of the Soviet Union in 1991* / Eds. G. Gutman, R. Volker // Springer International Publishing. – 2017. – P. 173–192.

110. Mather, P.M. Computer Processing of Remotely-Sensed images: an introduction / P.M. Mather., K. Magaly. – 4th ed. John Wiley and Sons Ltd. – 2010. – 434 P.

111. Meyer, L.H. Comparison of Landsat-8 and Sentinel-2 data for estimation of leaf area index in temperate forests / L.H. Meyer, M. Heurich, B. Beudert, J. Premier, D. Pflugmacher // *Remote Sensing*. – 2019. – Vol. 11, № 10. – ID: 1160.

112. Meyer, L.H. Comparison of Landsat-8 and Sentinel-2 data for estimation of leaf area index in temperate forests / L.H. Meyer, M. Heurich, B. Beudert, J. Premier, D. Pflugmacher // *Remote Sensing*. – 2019. – Vol. 11, № 10. – ID: 1160.

113. MODIS. Specifications [Electronic resource]. – URL: <https://modis.gsfc.nasa.gov/about/specifications.php>

114. MODIS. Vegetation Index Products (NDVI and EVI). – URL: <https://modis.gsfc.nasa.gov/data/dataproduct/mod13.php>

115. Modugno, S. Mapping regional patterns of large forest fires in Wild-land Urban Interface areas in Europe / S. Modugno, H. Balzter, B. Cole, P. Borrelli // *Journal of Environmental Management*. – 2016. – Vol. 172. – P. 112–126.

116. NASA. Science Strategy [Electronic resource]. – URL: <https://science.nasa.gov/about-us/science-strategy>

117. Nouri, H. NDVI, scale invariance and the modifiable areal unit problem: An assessment of vegetation in the Adelaide Parklands / H. Nouri, S. Anderson, P. Sutton, S. Beecham, P. Nagler, C.J. Jarchowe, D.A. Rob-

erts // *Science of the Total Environment*. – 2017. – № 584–585. – P. 11–18.

118. Packalen, P. Predicting the spatial pattern of trees by airborne laser scanning / P. Packalen, J. Vauhkonen, E. Kallio, J. Peuhkurinen, J. Pitkänen, I. Pippuri, et al. // *International Journal of Remote Sensing*. – 2013. – Vol. 34, № 14. – P. 5154–5165.

119. Palsson F., Sveinsson J.R., Benediktsson J.A., Aanaes H. Classification of pansharpened urban satellite images // F. Palsson, J.R. Sveinsson, J.A. Benediktsson, H. Aanaes / *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*. – 2012. – Vol. 5. – P. 281–297.

120. Pardo-Iguzquiza, E. Image fusion by spatially adaptive filtering using downscaling cokriging // E. Pardo-Iguzquiza, V.F. Rodriguez-Galiano, M. Chica-Olmo, P.N. Atkinson / *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*. – 2011. – Vol. 66. – P. 337–346.

121. Pelletier, C. Assessing the robustness of Random Forests to map land cover with high resolution satellite image time series over large areas / C. Pelletier, S. Valero, J. Ingladaa, N. Champion, G. Dedieu // *Remote sensing of environment*. – 2016. – Vol. 187. – P. 156–168.

122. Pohl, C. Multi-sensor image fusion in remote sensing: Concepts, methods, and applications // C. Pohl, J.L.V. Genderen / *International Journal of Remote Sensing*. – 1998. – Vol. 19. – P. 823–854.

123. Principles of Remote Sensing: An introductory textbook // Editors: K. Tempfli, N. Kerle, G.C. Huurneman, L.F. Janssen // *International Institute for Geo-Information Science and Earth Observation*. – 2009. – P. 591. [Electronic resource]. – URL: http://www.itc.nl/library/papers_2009/general/PrinciplesRemoteSensing.pdf

124. Proença, V. Global biodiversity monitoring: From data sources to Essential Biodiversity Variables / V. Proença, L.J. Martin, H.M. Pereira, M. Fernandez, L. McRae, J. Belnap et al. // *Biological Conservation*. – 2017. – Vol. 213. – P. 256–263.

125. Quinn, J.W. Spectral band combination [Electronic resource] – URL: <http://web.pdx.edu/~emch/ip1/bandcombinations.html>.

126. Racknell, A.P. New aspects of global climate-dynamics research and remote sensing / A.P. Racknell, C.A. Varotsos // *International Journal of Remote Sensing*. – 2011. – Vol. 32. – № 3, № 10. – P. 579–600.

127. Ranchin, T. Image fusion – the ARSIS concept and some successful

implementation schemes // T. Ranchin, B. Aiazzi, L. Alparone, S. Baronti, L. Wald / *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*. – 2003. – Vol. 58. – P. 4-18.

128. Räsänen, A. Predicting aboveground biomass in Arctic landscapes using very high spatial resolution satellite imagery and field sampling / A. Räsänen, S. Juutinen, M. Aurela, T. Virtanen // *International Journal of Remote Sensing*. – 2019. – Vol. 40, № 3. – P. 1175-1199.

129. Richards, J.A. Remote sensing digital image analysis: An Introduction / J. A. Richards, X. Jia // Berlin, Germany: Springer. – 2006. – 439 p.

130. Research Systems (ENVI) [Electronic resource]. – URL: (<https://www.harrisgeospatial.com/Software-Technology/ENVI>).

131. Richards, J.A. Remote Sensing Digital Image Analysis: An Introduction/ J.A. Richards. – 5th Edition, Kindle Edition. – 2012. – 515 p.

132. Rodriguez-Galiano, V.F. A comparative assessment of different methods for Landsat 7/ETM+ pansharpening / V.F. Rodriguez-Galiano, E. Pardo-Igúzquiza, M. Chica-Olmo, J. Mateos, J.P. Rigol-Sánchez, M. Vega // *International Journal of Remote Sensing*. – 2012. – № 33. – P. 6574-6599.

133. Rouse, J.W. Monitoring Vegetation Systems in the Great Plains with ERTS / J.W. Rouse, R.H. Haas, J.A. Scheel, D.W. Deering // *Proceedings of 3rd Earth Resource Technology Satellite (ERTS) Symposium*. – 1974. – Vol. 1. – P. 48-62.

134. Stoffels, J. Satellite-Based Derivation of High-Resolution Forest Information Layers for Operational Forest Management / J. Stoffels, J. Hill, T. Sachtleber, S. Mader, H. Beddenbaum, O. Stern et. al. // *Forests*. – 2015. – Vol. 6. – P. 1982-2013.

135. Thomas, C. Synthesis of multispectral images to high spatial resolution: A critical review of fusion methods based on remote sensing physics // C. Thomas, T. Ranchin, L. Wald, J. Chanussot / *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*. – 2008. – Vol. 46. – P. 1301-1312.

136. Topp, L. Knowledge management for policy impact: the case of the European Commission's Joint Research Centre / L. Topp, D. Mair, L. Smillie, P. Cairney // *Palgrave communications*. – 2018. – P. 1-10 [Electronic resource] – URL: <https://www.nature.com/articles/s41599-018-0143-3.pdf>

137. Tu, T. A fast intensity-hue-saturation fusion technique with spectral

adjustment for IKONOS imagery / T. Tu, P. Huang, C. Hung, C. Chang // IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters. – 2004. – Vol. 1. – P. 309–312.

138. Tucker, C.J. Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation / C.J. Tucker // Remote Sensing of Environment. – 1979. – Vol. 8. – P. 127-150.

139. United space in Europe «Galileo» [Electronic resource] – URL: http://www.esa.int/Our_Activities/Navigation/The_future_-_Galileo/What_is_Galileo

140. U.S. Geological Survey, 2018, Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) Landsat 8 Path 44 Row 33 – Acquired 7 October 2018. Accessed December 16, 2019 at URL: <https://www.usgs.gov/land-resources/nli/landsat/landsat-normalized-difference-vegetation-index>

141. Wittenberg, L. Spatial and temporal patterns of vegetation recovery following sequences of forest fires in a Mediterranean landscape Mt Carmel Israel / L. Wittenberg, D. Malkinson, O. Beeri, A. Halutzy, N. Tesler // Catena. – 2007. – Vol. 71. – P. 76–83.

142. White, R.A. Remote Sensing and Cognition: Human Factors in Image Interpretation: 1st Edition / Editors: R.A. White, A. Coltekin, R.R. Hoffman // CRC Press: Taylor & Francis Group. – 2018. – 194 p.

143. Zeng, Y. Image fusion for land cover change detection // Y. Zeng / International Journal of Image and Data Fusion. – 2010. – Vol.1. – P. 193-215.

Учебное пособие

Курбанов Эльдар Аликрамович
Воробьев Олег Николаевич

**ДИСТАНЦИОННЫЕ МЕТОДЫ
В ЛЕСНОМ ХОЗЯЙСТВЕ**

Учебное пособие

Редактор *Л.С. Емельянова*
Компьютерная верстка *Э.А. Курбанов*
Дизайн обложки *С.А. Лежнин*

Подписано в печать 07.07.2020. Формат 60х84

Печать цифровая. Усл. печ. л. 17,35.

Тираж 300 экз. Заказ № 5459

Поволжский государственный технологический университет
424000 Йошкар-Ола, пл. Ленина, 3

Отпечатано с готового оригинала-макета в ООО «Вертола»
Республика Марий Эл, г. Йошкар-Ола, ул. Льва Толстого, 45

