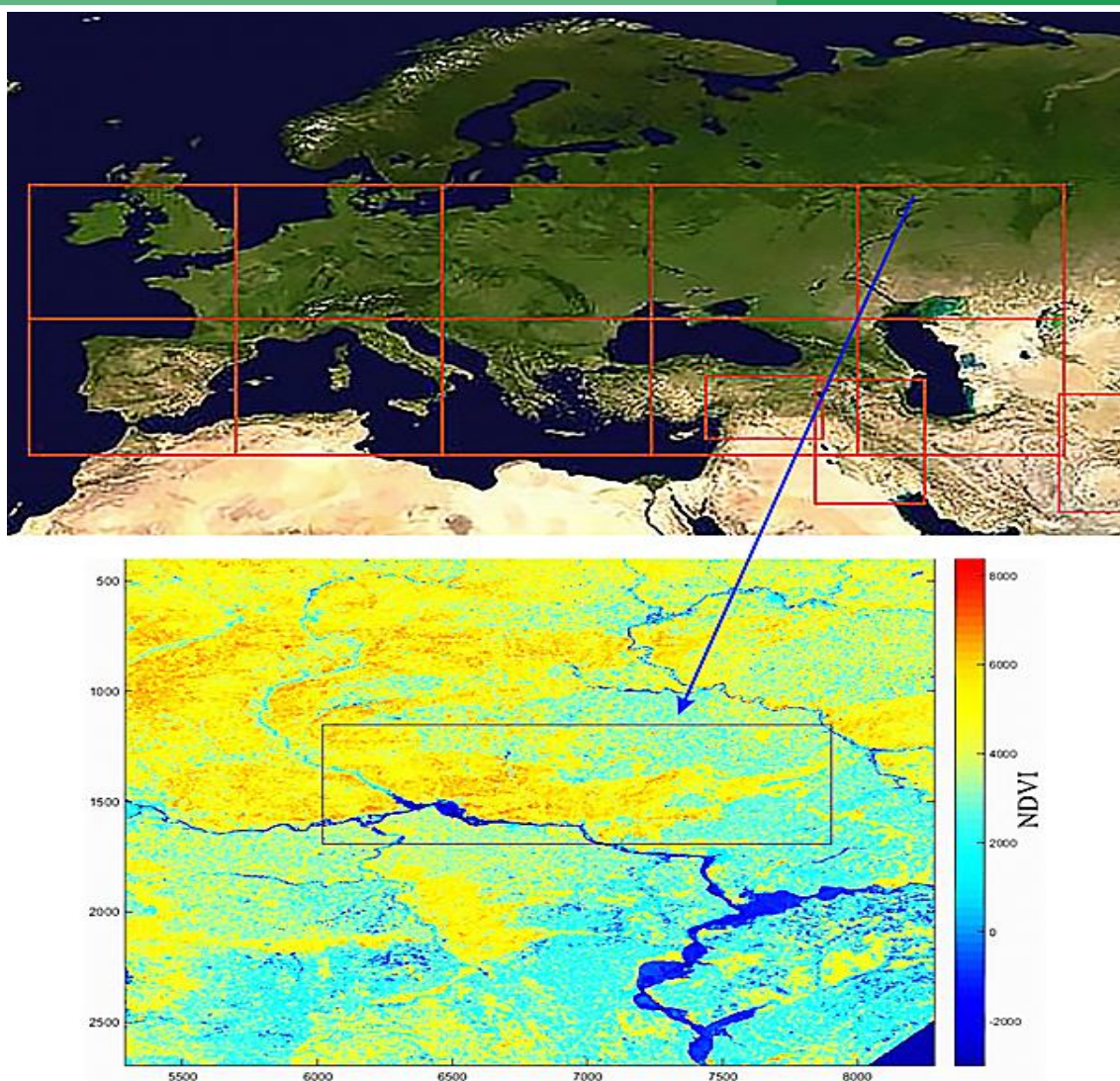




ДИСТАНЦИОННЫЙ МОНИТОРИНГ УСТОЙЧИВОСТИ ЛЕСНЫХ ЭКОСИСТЕМ



Монография

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

**ДИСТАНЦИОННЫЙ МОНИТОРИНГ
УСТОЙЧИВОСТИ ЛЕСНЫХ ЭКОСИСТЕМ**

МОНОГРАФИЯ

*Под общей редакцией
профессора Э.А. Курбанова*

Йошкар-Ола
2019

УДК 630*587.6

ББК 26.12

Д 48

Авторы: О.Н. Воробьёв, Э.А. Курбанов, Е.Н. Демишева,
С.А. Меньшиков, М.С. Али, Л.Н. Смирнова, Л.В. Тарасова

Рецензенты:

доктор географических наук, профессор **А.С. Алексеев** (г. Санкт-Петербург)

доктор биологических наук, профессор **С.М. Матвеев** (г. Воронеж)

доктор технических наук, профессор **В.С. Шалаев** (г. Москва)

Д48 Дистанционный мониторинг устойчивости лесных экосистем /
О.Н. Воробьёв, Э.А. Курбанов, Е.Н. Демишева и др.; под
общ. ред. проф. Э.А. Курбанова. – Йошкар-Ола: Поволж-
ский государственный технологический университет, 2019.
– 166 с.

ISBN 978-5-8158-2122-4

В монографии обобщены результаты исследований коллектива центра устойчивого управления и дистанционного мониторинга лесов ФГБОУ ВО «ПГТУ» по оценке и мониторингу устойчивости лесных экосистем. Рассматриваются вопросы использования спутниковых изображений разного пространственного разрешения для картографирования лесного покрова и роли дистанционного зондирования в области устойчивого развития. Дается описание применения методики оценки состояния и классификации растительного (лесного) покрова на примере Сирийской Арабской Республики, Марийского Заволжья и Пензенской области Российской Федерации.

ISBN 978-5-8158-2122-4

УДК 630*587.6

ББК 26.12

© Воробьёв О.Н., Курбанов Э.А.,
Демишева Е.Н. и др., 2019

© Поволжский государственный
технологический университет, 2019

© Центр устойчивого управления
и дистанционного мониторинга лесов, 2019

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

**REMOTE MONITORING
OF FOREST ECOSYSTEMS SUSTAINABILITY**

MONOGRAPH

Edited by Professor E.A. Kurbanov

Yoshkar-Ola
2019

UDC 630*587.6

BBC 26.12

Authors: O.N. Vorobiev, E.A. Kurbanov, E.N. Demisheva,
S.A. Menshikov, M.C. Ali, L.N. Smirnova, L.V. Tarasova

Reviewers:

doctor of Geographical sciences, prof. **A.S. Alexeev** (Saint-Petersburg)

doctor of Biological sciences, prof. **S.M. Matveev** (Voronezh)

doctor of Technical sciences, prof. **V.S. Shalaev** (Moscow)

Remote monitoring of forest ecosystems sustainability / O.N. Vorobiev, E.A. Kurbanov, E.N. Demisheva, et al.; edited by professor E.A. Kurbanov. – Yoshkar-Ola: Volga State University of Technology, 2019. – 166 p.

ISBN 978-5-8158-2122-4

The monograph summarizes the research outcomes by the staff members of the Center for Sustainable Forest Management and Remote Sensing of Volga State University of Technology regarding assessment and monitoring of forest ecosystems sustainability. The role of Remote Sensing for Sustainable Development and the use of satellite images of different spatial resolutions for mapping forest cover have been considered. The methodology covers all the aspects of condition assessments and classification of vegetation (forest cover) using case studies from the Syrian Arab Republic and the Volga region of the Russian Federation.

ISBN 978-5-8158-2122-4

© Vorobiev O.N., Kurbanov E.A.,
E.N. Demisheva, et al., 2019

© Volga State University
of Technology, 2019

© Center for Sustainable Forest Management
and Remote Sensing, 2019

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 Жана Монне «Европейская экспертиза и технологии в области защиты окружающей среды и устойчивого лесоводства» (SUFEX) получил финансовую поддержку Европейского Союза. Эта монография опубликована в рамках деятельности центра SUFEX.

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

ОГЛАВЛЕНИЕ

Список сокращений и условных обозначений	8
Введение	12
Introduction	15
1. Состояние вопроса	18
1.1. Роль лесов в концепции устойчивого развития и международных соглашениях	18
1.2. Исследования в области дистанционного зондирования лесов	31
1.3. Спутниковые данные Sentinel	34
1.4. Фенологические исследования по временным рядам спутниковых данных	38
<i>Выводы по главе 1</i>	41
2. Оценка растительного покрова Сирийской Арабской Республики	44
2.1. Цель и задачи исследования	44
2.2. Объект и область исследования	45
2.3. Методика и материалы исследования	48
2.4. Полевые исследования	63
2.5. Результаты исследования	68
<i>Выводы по главе 2</i>	72
3. Методика оценки состояния лесов по спутниковым данным на примере Марийского Заволжья	74
3.1. Цель и задачи исследования	74
3.2. Объект исследования	74
3.3. Полевые исследования	78
3.4. Методика камеральных исследований	81
3.4.1. Картографирование лесного покрова по данным Landsat	81

3.4.2. Оценка состояния лесного покрова на основе средних показателей раститель- ности по данным MODIS	84
3.4.3. Алгоритм анализа вегетационных индексов	89
3.4.4. Климатические показатели и распределе- ние классов наземного покрова	100
3.5. Результаты исследования.....	104
<i>Выводы по главе 3</i>	114
4. Распознавание лесных насаждений по данным спутника Sentinel-2 на территории Пензенской области.....	116
4.1. Цель и задачи исследования.....	116
4.2. Объекты и методика исследования	116
4.3. Результаты исследования	129
<i>Выводы по главе 4</i>	134
Заключение	137
Словарь терминов	140
Список литературы	144

Список сокращений и условных обозначений

БД	База данных
ГИЛ	Государственная инвентаризация лесов
ГИС	Географическая информационная система
ДЗЗ	Дистанционное зондирование Земли
DEM	Цифровая модель рельефа (<i>англ.</i> Digital Elevation Model)
AI	Аэрозольный индекс (<i>англ.</i> Aerosol Index)
ФАО	Продовольственная и сельскохозяйственная организация Объединенных Наций)
РА	Точность производителя (<i>англ.</i> Producer's accuracy)
UA	Точность пользователя (<i>англ.</i> User's accuracy)
OE	Ошибка пропуска (<i>англ.</i> Omission error)
CE	Ошибка допуска (<i>англ.</i> Commission error)
$\hat{k}$	Коэффициент Каппа
P	Общая точность классификации
NDVI	Нормализованный относительный индекс растительности (<i>англ.</i> Normalized Difference Vegetation Index)
SWI	Индекс влажности почвы (<i>англ.</i> Soil Water Index)
EVI	Усовершенствованный вегетационный индекс (<i>англ.</i> Enhanced Vegetation Index)

Landsat	Спутник дистанционного зондирования Земли (<i>англ.</i> Land Remote-Sensing Satellite)
MSS	Многоспектральный сканер (<i>англ.</i> Multi Spectral Scanners)
DI	Индекс нарушенности (<i>англ.</i> Disturbance Index)
GWR	Географически взвешенная регрессия (<i>англ.</i> Geographical Weighted Regression)
WoE	Весовой признак (<i>англ.</i> Weight of evidence)
NBR	Нормализованный индекс гарей (<i>англ.</i> Normalized Burned Index)
HRSS	Сенсор спутника высокого разрешения (<i>англ.</i> High Resolution Satellite Sensor)
NASA	Национальное аэрокосмическая администрация США (<i>англ.</i> National Aeronautics and Space Administration)
ESA	Европейское космическое агентство (<i>англ.</i> European Space Agency)
TM	Тематическое картографирование
CD	Обнаружение изменений (<i>англ.</i> Change detection)
GLC	Глобальный наземный покров (<i>англ.</i> Global Land Cover)
LAI	Индекс листовой поверхности (<i>англ.</i> Leaf area Index)
LCCS	Система классификации наземного покрова ФАО (<i>англ.</i> Land Cover Classification System (FAO))
MODIS	<i>англ.</i> Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer

LST	Температура подстилающей поверхности (<i>англ. Land Surface Temperature</i>)
P _R	Атмосферные осадки (<i>англ. Precipitation</i>)
ВИ	Вегетационные индексы
CAP	Сирийская Арабская Республика
SOS	Начало вегетационного периода (<i>англ. Time for the start of the season</i>)
EOS	Конец вегетационного периода (<i>англ. Time for the end of the season</i>)
LOS	Продолжительность вегетационного периода (<i>англ. Length of season</i>)
BL	Базовый уровень (<i>англ. Base level</i>)
TMS	Середина вегетационного сезона (<i>англ. Time of mid-season</i>)
MV	Максимальное значение данных для выбранной функции в течение сезона (<i>англ. Maximum VI</i>)
SA	Амплитуда вегетационного периода (<i>англ. Seasonal amplitude</i>)
RI	Степень (скорость) роста в начале сезона (<i>англ. Rate of increase</i>)
RD	Степень (скорость) снижения в конце сезона (<i>англ. Rate of decrease</i>)
LInt	Большой сезонный интеграл (<i>англ. Large integral</i>)

SInt	Малый сезонный интеграл (<i>англ.</i> Small integral)
ЦУР	Цель в области устойчивого развития
ЛХ	Лесное хозяйство
USGS	Геологическая служба США (<i>англ.</i> United States Geological Survey)

ВВЕДЕНИЕ

В международной повестке ООН на период до 2030 года лесам планеты Земля отводится ключевая роль в реализации целей в области устойчивого развития. В частности, к таким целям можно отнести: искоренение нищеты и ликвидацию голода (продовольственная безопасность), сохранение и восстановление связанных с водой экосистем, обеспечение комфортной среды для проживания в городах и населенных пунктах, обеспечение доступа к устойчивым источникам энергии (дровяная древесина), борьба с изменением климата. Поэтому вопросы точной оценки и мониторинга растительного покрова (лесных насаждений) требуют использования современных технологий, к которым относятся методы дистанционного зондирования Земли.

Дистанционные методы зондирования Земли, основанные на спутниковых изображениях разного пространственного разрешения, являются оперативными и доступными для специалистов и широкого круга пользователей. Такие данные можно легко масштабировать (аппроксимировать) до национального, регионального или глобального уровней. В нашем исследовании из 67 критериев оценки устойчивого управления лесами Монреальского процесса были выделены 27, которые подробно описывают состояние и структуру лесного покрова и могут быть достаточно точно определены методами дистанционного зондирования Земли. Полученные количественные и качественные показатели этих индикаторов позволяют провести дистанционный мониторинг устойчивости лесных насаждений на исследуемых территориях.

В последние годы у специалистов, работающих в разных отраслях народного хозяйства, широкое применение находят изображения спутниковой системы Sentinel Европейского кос-

мического агентства, которые предоставляют новые возможности для создания точных наборов мультиспектральных данных в готовом к использованию векторном формате. Система этих спутников европейской программы Copernicus сочетает в себе высокое пространственное и временное разрешение, новые мультиспектральные возможности и широкий охват территории, что дает больше преимуществ перед спутниками американской программы Landsat. В данном исследовании авторами были использованы спутниковые изображения Sentinel для картографирования и оценки лесных насаждений на примере Сирийской Арабской Республики и Среднего Поволжья Российской Федерации.

Методологии и алгоритмы картографирования лесного покрова, представленные в монографии, в значительной степени основаны на исследованиях ученых Европейского Союза. К ним можно отнести работы по оценке фенологии лесного покрова, временных рядов по спутниковым данным, вегетационных индексов, пространственно-временного распределения растительности, спектральной делимости тематических классов и многие другие.

Предлагаемая вниманию читателей монография является обобщением полученных к настоящему времени результатов исследований и разработок коллектива (профессорско-преподавательский состав, аспиранты и научные сотрудники) Центра устойчивого управления и дистанционного мониторинга лесов Поволжского государственного технологического университета.

К отличительным чертам данного исследования можно отнести следующие особенности:

- наличие большого полевого материала тестовых участков, обеспечивающего приемлемую валидацию и точность тематического картографирования лесного покрова территорий;

- возможность эффективного использования разработанных методов оценки лесного покрова на региональном уровне;
- использование временных рядов многоспектральных спутниковых данных для решения вопросов в области оценки влияния изменения климата на лесной покров в разных лесорастительных регионах (средиземноморья, широколиственных лесов и лесостепной зоны);
- сопоставимость предложенных классов наземного (лесного) покрова для тематической классификации спутниковых изображений с методикой классификации растительности международной организации ФАО;
- широкое использование данных спутника Sentinel (Европейского космического агентства) и спектрорадиометра MODIS в решении поставленных в исследовании задач.

Результаты выполненных изысканий и разработок применяются для решения прикладных и научных задач, в частности, используются в процессе лекционных и лабораторных занятий по дисциплинам «Дистанционное зондирование лесов», «Международное лесное хозяйство», «Дистанционный мониторинг лесных экосистем», «Геопространственное моделирование и анализ», «Пространственный анализ и геостатистика» для студентов образовательных программ бакалавриата и магистратуры при центре совершенства им. Жана Монне ФГБОУ ВО «ПГТУ». Полученные наработки применяются также при спутниковом мониторинге окружающей среды, лесоустроительных и лесоинвентаризационных работах на региональном уровне Приволжского федерального округа.

INTRODUCTION

The UN 2030 Agenda for Sustainable Development emphasizes protection, restoration, promotion and management of forests among its key Sustainable Development Goals, which include no poverty (Zero Hunger); preserving and restoring water-related ecosystems (Clean Water and Sanitation); providing a comfortable environment for living in cities and towns (Sustainable Cities and Communities), providing access to sustainable energy sources (Life on Land); as well as Climate Action.

The actions aimed at accurate assessment and monitoring of vegetation cover (forest stands) require using modern technologies including Remote Sensing methods which use satellite images of different spatial resolutions and are operational and accessible for specialists and the general public. Such data can be easily scaled to the national, regional or global levels. We referred to 27 out of 67 criteria of the Montreal process in order to assess sustainable forest management.

These criteria provide a detailed description of the condition and structure of forest cover and can be quite accurately obtained using Remote Sensing methods. The quantitative and qualitative indicators of these criteria allow Remote Monitoring of the sustainability of forest stands under study.

Over the recent years, specialists employed in various economy sectors have been extensively using the images of the Sentinel satellite system of the European Space Agency (ESA), which provide new opportunities for creating accurate sets of multispectral data in a ready-to-use vector format. The system of these satellites of the European Copernicus program combines high spatial and temporal resolution, new multispectral capabilities and a wide coverage of the territory, which gives more advantages over the satellites of the US Landsat program. In this study, the authors used Sentinel satellite

imagery to map and evaluate forest stands using the case study of the Syrian Arab Republic and the Middle Volga of the Russian Federation.

The methodologies and algorithms for mapping Land (forest) cover presented in the research are largely based on investigations of EU scientists. These include the work on the assessment of the phenology of forest cover, time series by satellite data, vegetation indices, spatio-temporal distribution of vegetation, spectral separability of thematic land cover classes, and many others.

This monograph integrates the scientific outcomes obtained by Volgatch research team of the teachers, graduate students and researchers of the Center for Sustainable Forest Management and Remote Sensing.

The study is characterised by:

- availability of a large database of field material with the forest test sites, which ensures acceptable validation and accuracy of thematic mapping of forest cover of the area under study;
- effective use of the developed methods for forest cover assessment at the regional level;
- time series of multispectral satellite data used for assessing the impact of climate change on forest cover in different forest growing regions (Mediterranean, broad-leaved forests and forest-steppe zone);
- comparability of the proposed classes of Land (forest) cover for thematic classification of satellite images with the vegetation classification methodology of the international organization FAO;
- widespread use of data from the Sentinel satellite (European Space Agency) and the MODIS spectroradiometer in solving the problems raised in the study.

The results of the carried out research are used for applied and academic purposes. They are included into lecture and laboratory

courses “Remote Sensing of Forests”, “International Forestry”, “Remote Monitoring of Forest Ecosystems”, “Geospatial Modeling and Analysis” , "Spatial Analysis and Geostatistics" for Undergraduate and Graduate Students at the Jean Monnet Center of Excellence of Volgatech.

The obtained results are also used in satellite environmental monitoring, forest mensuration and forest inventory work in the Volga Federal District.

ГЛАВА 1. СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА

1.1. Роль лесов в концепции устойчивого развития и международных соглашениях

Лесные насаждения являются уникальными природными экосистемами, обеспечивающими естественную среду для жизни на планете Земля. Лесные экосистемы вносят большой вклад в сохранение биоразнообразия, углеродного цикла, непосредственно с ними связано существование флоры и фауны. Они также способствуют устойчивому ведению сельского хозяйства. Лес стабилизирует почву и климат, очищает атмосферу, регулирует водосток, дает тень и укрытие, создает ареал обитания для опылителей и естественных врагов сельскохозяйственных вредителей (FAO, 2016). Леса и деревья также обеспечивают продовольственную безопасность миллионов людей в разных странах мира, для которых они служат источником питания, энергии и благосостояния.

Именно поэтому много важных решений в области взаимоотношений человека и природы было принято на Конференции ООН по окружающей среде и развитию, прошедшей в Рио-де-Жанейро (1992 г.). Там же была принята Конвенция о биологическом разнообразии, которая как важнейшую цель обозначила сохранение лесов и устойчивое управление ими. Большим вкладом в осуществление программы данной конвенции является создание критериев и индикаторов устойчивого управления лесами, которые служат важным инструментом оценки изменений в состоянии лесов и лесоправлении (Критерии и индикаторы устойчивого..., 1998).

Следующим этапом развития целевых задач лесного хозяйства в концепции устойчивого развития явился документ «Преобразование нашего мира: Повестка дня в области устой-

чивого развития на период до 2030 года», принятая мировыми лидерами на Саммите Организации Объединенных Наций (ООН) по устойчивому развитию в сентябре 2015 года (Transforming our World..). В этом директивном документе подчеркивается необходимость решительных действий для выведения всего человечества на траекторию безопасного развития, а также сформулированы 17 целей в области устойчивого развития (ЦУР, англ. SDG – Sustainable Development Goals). Разработанные глобальные цели имеют 169 задач и 232 индикаторов, которые основаны на трех основных принципах устойчивого развития: экономическом, социальном и экологическом.

Леса планеты Земля в этой повестке имеют непосредственное отношение к достижению нескольких ЦУР (рисунок 1.1), таких как искоренение нищеты и ликвидация голода (продовольственная безопасность), сохранение и восстановление связанных с водой экосистем, обеспечение комфортной среды для проживания в городах и населенных пунктах, обеспечение доступа к устойчивым источникам энергии (дровяная древесина), борьба с изменением климата.

ЦУР могут быть также полезны для выполнения (мониторинга) государственных программ и национальных проектов Российской Федерации (рисунок 1.2), которые рассматривают достижение приоритетов и целей социального, экономического и экологического развития и обеспечения национальной безопасности страны.

В докладе ФАО «Состояние лесов мира» (FAO, 2018) более детально рассмотрены пути реализации ЦУР, при этом основное внимание уделяется вопросам, касающимся освобождения (вырубка и поджоги) лесных земель под выращивание продукции сельского хозяйства и перевода сельскохозяйственных угодий в земли лесного фонда. Сельское хозяйство по-прежнему остается ведущим ключевым фактором глобального сведения



Цель 1: Ликвидация нищеты



Цель 2: Ликвидация голода



Цель 6: Чистая вода и санитария



Цель 7: Недорогостоящая и чистая энергия



Цель 11: Устойчивые города и населенные пункты



Цель 13: Борьба с изменением климата



Цель 15: Сохранение экосистем суши

Рисунок 1.1 – Цели устойчивого развития, имеющие непосредственное отношение к лесам и деревьям

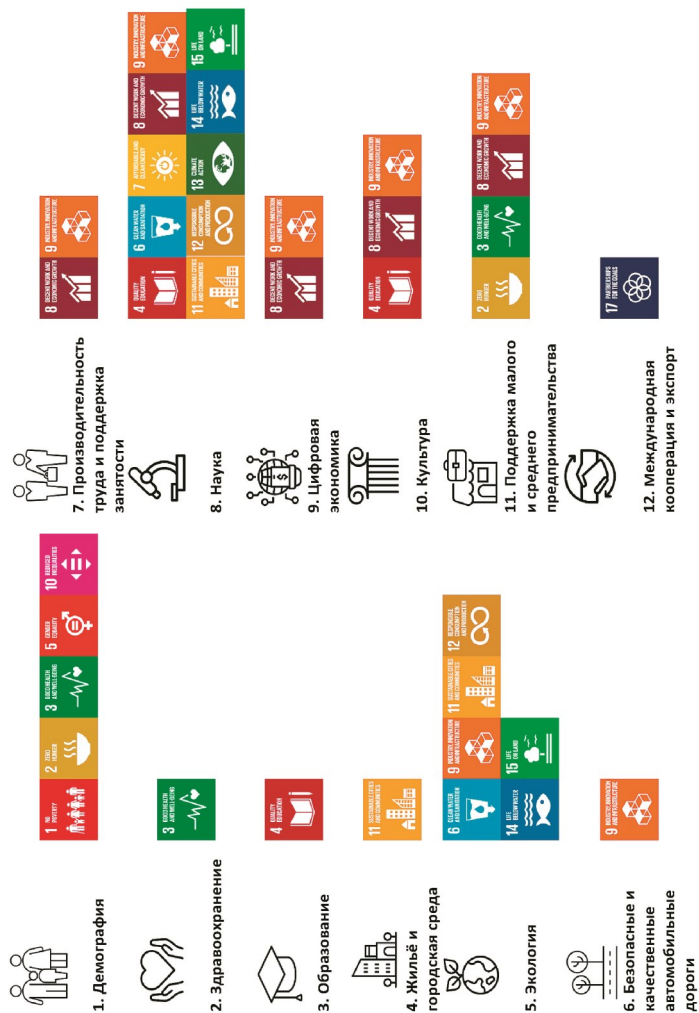


Рисунок 1.2 – Соответствие целей устойчивого развития национальным проектам Российской Федерации

лесов, что приводит к настоящей необходимости в развитии позитивных взаимосвязей между этими двумя видами землепользования. Лесам планеты также отводится важная роль в решении других задач в рамках ЦУР 15, в том числе: ЦУР 15.3 (борьба с опустыниванием и восстановление деградированных земель и почвы); ЦУР 15.4 (сохранение горных экосистем, в том числе их биоразнообразия) и ЦУР 15.5 (сдерживание деградации природных сред обитания, прекращение процесса утраты биоразнообразия и предотвращение исчезновения видов, находящихся под угрозой вымирания).

Реальные действия в сфере лесного комплекса, а также в отношении других видов земле- и лесопользования (LULUCF - *англ.* Land Use Land Use Change and Forestry) должны обеспечить также выполнение обязательств, взятых на себя Российской Федерацией, в рамках Парижского соглашения ООН по проблеме изменения климата (2015). Россия является одним из крупнейших эмитентов углекислого газа (CO_2) - четвертым по величине после Китая, США и Индии (рисунок 1.3).

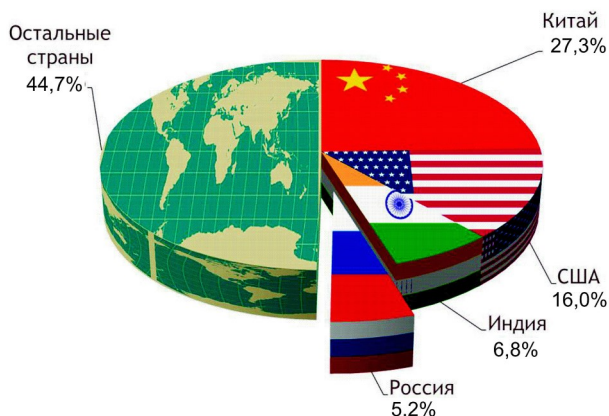


Рисунок 1.3 – Доля стран в мировой эмиссии CO_2 в 2016 г. без учета землепользования, изменений в земле и лесопользовании, % (BP Statistical Review of World Energy, 2017)

В постановлении правительства Российской Федерации (21.09.2019 № 1228) «О принятии Парижского соглашения» отдельным заявлением отмечена важность «сохранения и увеличения поглощающей способности лесов и иных экосистем, а также необходимости ее максимально возможного учета, в том числе при реализации механизмов Соглашения».

В целом обязательства стран-участниц Парижского соглашения направлены на мероприятия по сокращению выбросов, вызванных обезлесением и деградацией лесов, и по сохранению лесов, устойчивому лесопользованию и увеличению поглощения углерода лесами, что является ключевым фактором в глобальных усилиях по снижению последствий изменения климата. Кроме того, страны-участницы договорились о сохранении и увеличении поглотителей и накопителей парниковых газов, включая леса. Поэтому Российской Федерации как лесной державе в процессе выполнения обязательств по реагированию на изменение климата во многих случаях придется предусматривать меры, касающиеся лесного хозяйства и других видов землепользования.

Стоит отметить отличия Парижского соглашения от ранее принятого Киотского протокола, главным образом касающиеся роли лесов стран-участниц Соглашения. Важным итогом Парижского соглашения стало то, что проблеме лесных экосистем в этом документе посвящена отдельная статья № 5.

Также в соглашении нет деления на тропические или бореальные леса, и правила по снижению эмиссий парниковых газов приняты одинаковыми для всех стран-участниц. В рамках «механизма чистого развития» (Курбанов, 2007) как для бореальных, так и для тропических лесов по Парижскому соглашению становится возможно осуществление международных проектов по сохранению лесов и увеличению стоков углерода в их биомассе.

В Парижском соглашении ООН прописано, что все страны должны принимать меры для сохранения лесов и других экосистем, поглощающих или хранящих CO₂, таких как болота или сельхозземли.

Кроме того, в первой части статьи 5 Парижского соглашения, посвященной снижению эмиссии парниковых газов от обезлесения и нарушений лесов, видна преемственность Рамочной Конвенции ООН об изменении климата (Рамочная конвенция..., 1992) через ссылку на статью 4 п.1 d). В частности в ней прописано: «Все Стороны, учитывая свою общую, но различную ответственность и конкретные национальные и региональные приоритеты, цели и условия развития, оказывают содействие рациональному использованию поглотителей и накопителей всех парниковых газов, не регулируемых Монреальским протоколом, включая биомассу, леса, океаны и другие наземные, прибрежные и морские экосистемы, а также, в соответствующих случаях, оказывают содействие и сотрудничают в их охране и повышении их жизнеспособности». Этот параграф является подтверждением долгосрочной перспективы выполнения Соглашения, что в свою очередь является немаловажным условием для выполнения лесных углерододепонирующих проектов с длительным сроком окупаемости (Olsen, 2007; Kurbanov et al., 2007; Курбанов, 2009; Yousefpour, Hanewinkel, 2015; Шалаев, 2015).

Согласно данным Всемирной метеорологической организации (World Meteorological Organization) (WMO statement..., 2018), средняя температура у земной поверхности с начала XX века по настоящее время возросла примерно на 1°C. По данным этой организации, последние четыре года (2015–2018) были самыми теплыми за всю историю наблюдений. Такие радикальные изменения оказывают непосредственное влияние на смещение границ распространения лесов. Ученые считают, что в

России, Канаде, США и Скандинавии северная граница бореальных лесов может переместиться на север, что приведет к резкому уменьшению площади леса (Шиятов и др., 2005; Galos et al., 2013; Ogris, Jurc, 2010).

Процессы природного характера и деятельности человека становятся главной причиной изменений, вызывающих нарушение структуры лесного покрова, а также длительности периода вегетации лесных насаждений (ИРСС, 2019). Для обеспечения эффективного управления лесами необходимо проводить своевременную оценку и прогнозирование изменений лесного покрова, который является важным компонентом последствий изменения климата (Матвеев, 2003; Шалаев, Тепляков, 2017).

Между тем есть многочисленные свидетельства того, что большие территории лесных насаждений Российской Федерации подвержены многочисленным нарушениям (Терехин, 2017; Матвеев и др., 2012). Причинами, по мнению ученых, являются вырубка лесов, лесные пожары, непосредственно механическое воздействие на растения, нарушение почвенного покрова и увеличение рекреационной нагрузки (Воробьев и др., 2016). По причине возрастающего антропогенного влияния на лесные насаждения актуальной становится своевременная оценка их устойчивости.

Понимание процессов антропогенного влияния на лесо- и землепользование и возможности дистанционного мониторинга за изменениями во времени и пространстве позволят обоснованно принимать решения по снижению последствий влияния изменения климата на планету и человека, а также на более современном уровне реализовывать концепцию устойчивого развития.

По мере того, как спутниковые данные разного пространственного разрешения и методы дистанционного зондирования Земли становятся все более доступными и надежными, их ис-

пользование находит самое широкое применение в устойчивом управлении лесами. В «Повестке дня на период до 2030 года» отмечено, что для выполнения ЦУР потребуются сбор новых данных и использование широкого спектра возможных источников данных для поддержки их реализации на период 2015-2030 гг. Статья 76 этого документа гласит: «Мы будем содействовать прозрачному и ответственному расширению государственно-частного партнерства, чтобы использовать широкий спектр данных, включая наблюдения за Землей (EO Earth Observations) и геопространственную информацию» (The 2030 Agenda for Sustainable....).

Данные и методы, основанные на ЕО, являются оперативными и доступными для специалистов и широкого круга пользователей, и их можно легко масштабировать до национального, регионального или глобального уровней. Межведомственной экспертной группой ООН (IAEG-SDG – the UN Inter-Agency Expert Group on the SDG) предъявляются качеству спутниковых данных для мониторинга ЦУР следующие требования:

- *последовательность*. Глобальный мониторинг ЦУР проводится в течение 15-летнего периода для любой страны мира, независимо от ВВП этой страны;
- *надежность*. Должно быть доверие к сбору и отчетности данных;
- *масштабность*. Наличие сведений от национального до районного уровня;
- *прозрачность*. Выявление слабых и сильных сторон используемых методологий;
- *проверяемость*. Информация может быть прослежена до ее источника;
- *выполнимость*. Данные фиксируются практическим и реалистичным образом;

- *прагматичность*. Собранные данные и методология могут быть использованы для стратегического планирования, повышения осведомленности, оценки рисков и принятия решений;

- *ретроспективность*. Анализ долгосрочных тенденций, например, изменение климата;

- *устойчивость*. Открытые и бесплатные базы данных.

Для оценки и мониторинга лесного покрова Земли требуются надежные, высококачественные и оперативно обновляемые спутниковые данные лесного покрова. Этим требованиям на сегодняшний день отвечают программы Landsat (США) и Sentinel ESA (European Space Agency – Европейское космическое агентство).

Композитные и тематические карты, полученные с помощью снимков Landsat, создаются во всем мире в рамках глобальной инициативы по наблюдению за лесами Института мировых ресурсов и независимых лабораторий, таких как Глобальный фонд растительного покрова Университета Мэриленда (Loboda et al., 2017). Для решения и отчета по задаче 15.2.1 ЦУР требуется знание показателей протяженности лесного покрова, его потерь и прироста, которые также являются исходными данными для оценки нетронутых, первичных / старовозрастных лесов, а также процессов лесовосстановления (Andersen et al., 2017).

На основе такой информации, полученной по данным ДЗЗ, могут быть разработаны и приняты практические инициативы в области устойчивого управления лесными ресурсами и продовольственной безопасности «Повестки дня на период 2030». В связи с этим развитие методов дистанционного зондирования будет иметь все возрастающее значение при оценке лесного покрова в различных регионах мира.

Россия также является участницей международного Монреальского процесса, в рабочую группу которого входят 12 стран

(Аргентина, Австралия, Канада, Чили, Китай, Япония, Республика Корея, Мексика, Новая Зеландия, Российская Федерация, США и Уругвай). Все вместе эти страны содержат: 90 % умеренных и бореальных лесов, 49 % всех лесов мира, 58 % лесных посадок, 49 % производства круглого леса и 31 % населения планеты (The Montreal Process Criteria ...).

Страны-участницы Монреальского процесса приняли Сантьягскую декларацию (1995 г.), в которой заявили о своей приверженности принципам устойчивого управления лесами. Рабочей группой этой организации были рекомендованы 7 критериев и 67 связанных с ними индикаторов в качестве руководства по оценке и анализу тенденций в области устойчивого управления лесами:

1. Сохранение биологического разнообразия.
2. Поддержание продуктивной способности лесных экосистем.
3. Поддержание здоровья и жизнеспособности лесных экосистем.
4. Сохранение и поддержание почвенных и водных ресурсов.
5. Поддержание вклада лесов в глобальный цикл углерода.
6. Поддержание и расширение долгосрочных социально-экономических выгод для удовлетворения потребностей общества.
7. Юридические, институциональные и экономические рамки сохранения и устойчивого управления лесами.

В нашем исследовании из 67 критериев оценки устойчивого управления лесами Монреальского процесса были выделены 27, которые подробно описывают состояние и структуру лесного покрова и могут быть определены методами дистанционного зондирования Земли (таблица 1.1). Полученные количественные показатели этих индикаторов позволяют провести мониторинг устойчивости лесных насаждений на исследуемых

территориях с учетом основных критериев, используемых при оценке устойчивости лесных экосистем за определенные периоды времени.

Таблица 1 – **Индикаторы устойчивости лесных экосистем, определяемые по данным ДЗЗ**

№	Индикаторы	Ед. измерен.
1	Доля площади покрытых лесом земель	%
2	Доля площади покрытых лесом земель, занимаемая лесами хвойных пород	%
3	Доля площади покрытых лесом земель, занимаемая лесами лиственных пород	%
4	Доля площади покрытых лесом земель, занимаемая смешанными лесами хвойных и лиственных пород	%
5	Доля площади покрытых лесом земель, занимаемая лесами хвойных пород с участием спелых и перестойных насаждений	%
6	Доля площади покрытых лесом земель, занимаемая лесами хвойных пород с участием средневозрастных и приспевающих насаждений	%
7	Доля площади покрытых лесом земель, занимаемая молодняками	%
8	Доля площади покрытых лесом земель, занимаемая лесами лиственных и смешанных пород с участием спелых и перестойных насаждений	%
9	Доля площади покрытых лесом земель, занимаемая лесами лиственных и смешанных пород с участием средневозрастных и приспевающих насаждений	%
10	Доля площади особо охраняемых природных территорий (всего), а также:	%
11	государственных природных заповедников	%
12	национальных и природных парков	%

Окончание таблицы 1.1

13	Доля площади лесов особо охраняемых природных территорий, всего	%
14	Доля площади хвойных лесов особо охраняемых природных территорий	%
15	Общий запас углерода древостоев территории исследования	т/га
16	Общий запас углерода хвойных пород с участием спелых и перестойных насаждений	т/га
17	Общий запас углерода хвойных пород с участием средневозрастных и приспевающих насаждений	т/га
18	Общий запас углерода лиственных и смешанных пород с участием спелых и перестойных насаждений	т/га
19	Общий запас углерода лиственных и смешанных пород с участием средневозрастных и приспевающих насаждений	т/га
20	Общий запас углерода молодняков хвойных и лиственных пород	т/га
21	Доля площади покрытых лесом земель, нарушенных крупными пожарами	%
22	Доля площади покрытых лесом земель с сомкнутостью полога более 65 %	%
23	Доля площади покрытых лесом земель с сомкнутостью полога менее 65 %	%
24	Площадь потерь покрытых лесом земель	га
25	Расширение площади покрытых лесом земель	га
26	Количество лесных участков размером более 10000 га	шт
27	Среднее расстояние между лесными участками	км

1.2. Исследования в области дистанционного зондирования лесов

В последние годы во всем мире запускается все большее количество новых спутников, а также разрабатываются программные средства, обеспечивающие данные и обработку изображений для исследования наземного покрова планеты (Жири́н и др., 2012; Курбанов, 2016). Дистанционное зондирование Земли (ДЗЗ) и мониторинг состояния окружающей среды с помощью спутников с оптической бортовой аппаратурой стали возможными благодаря нескольким десятилетиям технического совершенствования сенсоров и спутниковых платформ (Tang, Xie, 2012). Спутниковые данные широко используются исследователями для оценки и мониторинга растительного покрова, прогнозирования пожарной опасности лесов, влияния климата на леса, процессов деградации и опустынивания территорий (Алексеев и др., 2017; Воробьев, Курбанов, 2017; Терехин, Чендев, 2018; Viccaro et al., 2019).

Спутниковые изображения повсеместно используются для составления карт наземного покрова, в лесоустройстве, природопользовании и экологии. Они предоставляют возможность для проведения дистанционного мониторинга природных ландшафтов, лесного покрова, сельскохозяйственных угодий, лесопарковых зон и других объектов (Воробьев и др., 2012; Räsänen et al., 2019). Кроме того, 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., 2015; Шалаев, 2018).

ДЗЗ и географические информационные системы (ГИС) также широко используются для прогнозирования уровня пожарной опасности лесов (Ghobadi et al., 2012; Жири́н и др., 2013) и в совокупности с точными данными наземной инвентаризации

могут быть использованы для принятия решений при ведении лесного хозяйства.

Новые алгоритмы и методики были разработаны мировым научным сообществом для анализа изображений, от классификации до повышения точности оценки тематического картографирования. Решение этих вопросов обычно проводится на основе различных методов классификации изображений дистанционного зондирования (Noi, Kappas, 2017) с целью получения тематических карт наземного покрова (Lopatin, Alexeev, 2014; Барталев и др., 2016).

Классификация, основанная на выделении объектов на земной поверхности по различным спектральным отражательным характеристикам, является эффективным способом извлечения информации о растительном покрове с изображений дистанционного зондирования (Алексеев, Никифоров, 2013; Jwan, 2013; Puletti et al., 2017). При этом подходы к классификации спутниковых изображений могут быть разделены на две группы: 1) классификация на основе пикселей, 2) объектно-ориентированная классификация (Blaschke et al., 2014; Курбанов и др., 2014; Chen et al., 2018).

Развитие методов дистанционного зондирования в ближайшие годы позволит повысить точность распознавания структуры лесных насаждений и проводить оценку их биоразнообразия (Fassnacht et al., 2016; Pouteau et al., 2018). Более детальная классификация лесов с выделением отдельных древесных пород и типов леса, отличающихся своей фенологической динамикой, может быть достигнута за счет использования разновременных спутниковых изображений (Жарко, Барталев, 2014; Karasiak et al., 2017; Курбанов и др., 2018).

Существуют исследования, использующие метод фьюжн (слияния) двух снимков (например, Landsat-8 и Sentinel-2) для повышения точности выделения древесных пород при темати-

ческой классификации (Wang et al., 2017; Wang, Atkinson, 2018). Также интерес представляет разработка более точных моделей, предсказывающих будущие сдвиги ареалов произрастания древесных пород, в рамках исследований изменения климата (Caviglia-Harris et al., 2015; Sheeren et al., 2016; Acuna, Strandgard, 2017).

В Финляндии 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 этой стране при проведении национальной инвентаризации активно используется лазерное сканирование, что позволяет повысить точность проводимых исследований (Paskalen et al., 2013; Kotivuori et al., 2016).

Практический интерес представляют работы по оценке последствий воздействия насекомых на лесные насаждения (Adelabu et al., 2012; Coops et al., 2009). Многие научные коллективы занимаются изучением влиянием насекомых на дефолиацию растительности (Eklundh et al., 2009; Solberg, 2010; Adelabu et al., 2014; Bjerke et al., 2014). В частности для оценки субальпийских лесов севера Швеции разработана методика, основанная на анализе NDVI MODIS (Olsson et al., 2016). Она позволяет проводить мониторинг лесов в реальном времени на основе отклонений от сезонной траектории NDVI, показывающей состояние ненарушенных насаждений.

В Испании коллективом ученых установлено, что на прирост деревьев и накопление фитомассы (углерода) в значительной степени влияет наличие воды (Vayreda et al., 2012). С другой стороны, небольшое потепление в исследуемом регионе Испании привело к снижению скорости роста и накопления углерода, особенно во влажных районах. Пространственные вариации в снижении углерододепонирования были в основном свя-

заны с естественной динамикой самоизреживания на заброшенных лесных участках.

1.3. Спутниковые данные Sentinel

В последние годы для повышения точности картографирования растительного покрова используют спутниковые данные высокого разрешения Sentinel-2, которые предоставляют новые возможности для создания точных наборов мультиспектральных данных в готовом к использованию векторном формате (Belgiu, Csillik, 2018). Sentinel-2 – это спутник нового поколения, разработанный Европейским космическим агентством для обеспечения наземного мониторинга и продолжения миссий Landsat и SPOT (ESA introducing..., 2018). Этот спутник, который был успешно запущен в июне 2015 года в рамках европейской программы Copernicus сочетает в себе высокое пространственное и временное разрешение, новые мультиспектральные возможности и широкий охват территории, что дает больше преимуществ перед спутниками американской программы Landsat в области регионального земле- и лесопользования, классификации и картографирования растительного покрова (Immitzer et al., 2016; Zheng et al., 2017).

Спутник Sentinel-2 оснащен оптико-электронным мультиспектральным сенсором для съемок с разрешением от 10 до 60 м в видимой, ближней инфракрасной (VNIR) и коротковолновой инфракрасной (SWIR) зонах спектра, включающих в себя 13 спектральных каналов, что гарантирует отображение различий в растительном покрове. Высокое пространственное разрешение изображения (до 10 м), новые спектральные возможности (три канала в красном диапазоне и два канала в SWIR), широкий охват на местности (полоса 290 км) и минимальное пятидневное временное разрешение (два аппарата на орбите) делает этот спутник, по сравнению с американским Landsat, более приемле-

мым и полезным для государственной инвентаризации лесов (Immitser et al., 2016).

Спутниковые 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 пространственного разрешения (Жирин и др., 2012; Козодеров, Дмитриев, 2017; Жарко, Барталев, Егоров, 2018), и спутниковые данные, совмещенные с лидарной съемкой (Kane et al., 2010; Clark et al., 2011; Kangas et al., 2018). 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).

Несмотря на такой высокий потенциал спутниковой системы Sentinel, в последние годы немного исследований было посвящено лесному картографированию, классификационным методикам и дистанционному мониторингу с использованием его изображений. Среди научных публикаций в этой области стоит отметить изучение мониторинга состояния растительного (лесного) покрова саванн и пастбищ Северной Америки (Hill, 2013), оценку содержания хлорофилла в листьях и растительного (лесного) покрова (Verrelst et al., 2012; Frampton et al, 2013; Zarco-Tejada et al., 2019), классификацию альпийской тундровой растительности в Чехии (Kupkova et al., 2017) и наземного покрова в Румынском Закарпатье (Rujoiu-Mare et al., 2017).

Текстурные характеристики полога лесного насаждения, полученные по изображениям Sentinel, также представляют большой интерес при классификации типов леса, о чем свидетельствуют предыдущие исследования на примере тропических ле-

сов (Culter et al., 2012; Lu et al., 2014). Использование текстуры полога, которая показывает пространственную связь между центральным и соседними исследуемыми пикселями изображения, позволяет повысить различимость типов наземного покрова и сохранить границы исследуемых признаков (Seetharaman, Pal-anivel, 2013; Laurin et al., 2016; Astola et al., 2019).

Возможности получения достоверных данных о количественных и качественных характеристиках лесонасаждений на основе спутниковых данных Sentinel-2 приведены в исследованиях по учету и мониторингу лесов на землях лесного фонда Шебекинского района Белгородской области Российской Федерации (Перепечина и др., 2017). По результатам автоматизированного дешифрирования спутниковых данных авторами исследования проведен анализ структуры и площади выделенных категорий лесных земель. В итоге исследования установлено, что площадь неучтенных земель составила 14664,6 га. Авторами выявлена существенная разница между данными государственного лесного реестра (ГЛР) и данными дистанционного зондирования.

Результаты предварительного тематического картографирования структуры лесного полога Польши по изображениям Sentinel-2 в период максимальной вегетационной активности (май-август) показали высокую степень смешивания различных широколиственных пород деревьев вследствие близости их спектральных характеристик (de Kok et al., 2017). Это в целом приводит к низкой точности тематического картографирования территории по породному составу лесов. Применение спутниковых снимков позднеосеннего периода на эту же территорию позволило значительно улучшить результаты тематической классификации. Таких же выводов, предлагая использовать для анализа спутниковые изображения Sentinel-2 весенне-осеннего периода, придерживаются другие ученые, занимающиеся дистанцион-

ным мониторингом растительного покрова (Kupková et al., 2017; Ng et al., 2017).

Для мониторинга наземного покрова юга Французской Республики были исследованы возможности использования комплекса разновременных спутниковых изображений Landsat-8, SPOT-4 и соответствующих им по пространственному разрешению спутника Sentinel-2 (Pelletier et al., 2016). В качестве контрольных участков была использована национальная база данных наземного покрова, формируемая и обновляемая каждые три года Службой картографирования Франции.

Методика этого исследования включала технологию картографирования полученных на базе NDVI индексных изображений с применением методов управляемой классификации «Случайный лес» (RF – *англ.* Random Forest) и «машинного обучения» (SVM – *англ.* Support Vector Machine). Метод «Случайный лес» показал более высокую степень точности тематического картографирования по сравнению с машинным обучением и высокую степень разделимости (ОА, общая точность классификации = 50-70 %) по границам страт доминирующих хвойных и лиственных древесных пород на основе снимков высокого пространственного разрешения SPOT-4, близких по своим характеристикам к Sentinel-2. Авторы предполагают возможность успешного применения технологии RF для картографирования данных спутника Sentinel-2.

Преимущества Sentinel-2 перед другими доступными спутниковыми данными в совокупности с применением классических инструментов классификации изображений позволяет создать платформу для специалистов лесного хозяйства (Wittke et al., 2019; Mercier et al., 2019). Изображения этого спутника повышают возможности точной интерпретации данных дистанционного зондирования при проведении лесоустроительных работ и мониторинга хозяйственной деятельности арендаторов леса.

1.4. Фенологические исследования по временным рядам спутниковых данных

Фенологические показатели растительного покрова Земли являются важными индикаторами глобального изменения климата, свидетельствующими о соответствующих изменениях в устойчивости лесных экосистем (Liang et al., 2011, Lara, Candini, 2016; Матвеев, Тимашук, 2019). Существуют многочисленные свидетельства и исследования о влиянии происходящих изменений климата на рост растительности (Brown et al., 2012; Horion et al., 2013; Швецов и др., 2018), включая депонирование углерода (Курбанов и др., 2008) и продуктивность лесов (Tshebakova et al., 2009; Пахучий, Пахучая, 2018).

Изменения в фенологии растений обычно связывают с несколькими климатическими факторами, такими как температура воздуха, влажность, тепло- и влагообеспеченность. Известно, что фенологический цикл умеренного климата контролируется температурой воздуха (Piao et al., 2006; Fu et al., 2017; Anav et al., 2019). Другие исследования (Brown, de Beurs, 2008, Finsholt et al., 2012) показывают, что изменения во влагообеспеченности растений могут привести к необратимым последствиям, особенно в засушливых регионах (Scharnweber et al., 2011).

В научной литературе значительное внимание также уделяется применению наборов глобальных климатических данных, необходимых для пространственно-временного анализа (Gallant et al., 2018; Koutsias et al., 2010; Grotti et al., 2019). Это, например, ежемесячные климатические данные с использованием модели PRISM. Данный продукт представляет собой набор ежедневных, еженедельных и ежегодных данных о минимальной, средней, максимальной температуре, осадках и температуре точки росы, в первую очередь для всей территории США (Yuan et al., 2014). Полученные наборы данных включают несколько методов моделирования и доступны в различных простран-

ственных и временных разрешениях, охватывающих период с 1895 год по настоящее время.

Считается, что умеренные и бореальные лесные экосистемы могут реагировать на температурные аномалии с более значительными биогеофизическими последствиями, чем леса тропической зоны (Bonan, 2008; Allen et al., 2010). В связи с суровыми климатическими условиями хвойно-широколиственные леса умеренного и бореального поясов Среднего Поволжья Российской Федерации особенно уязвимы и чувствительны к изменению климата, что может привести к стрессам от засух и частым лесным пожарам в долгосрочной перспективе (IPCC, 2007; Buermann et al., 2014; Sidor et al., 2019).

Фенологические показатели, полученные со спектрорадиометров спутниковых систем, могут быть использованы для оценки происходящих изменений климата и его влияния на лесной покров во времени и пространстве (Du et al., 2014; Thiago et al., 2015). Такие показатели и получаемые на их основе значения вегетационных индексов (ВИ) представляют ценную информацию для специалистов о круговороте углерода, сезонной динамике различного рода лесного покрова физиологических и гидрологических процессах, взаимодействии между лесным покровом и атмосферой, а также при работах по выявлению изменений в земле- и лесопользовании (Медведева и др., 2010; Leinenkugel et al., 2013). Для этих целей обычно используют временные ряды данных спутниковых наблюдений среднего и высокого пространственного и временного разрешений.

Временной ряд представляет собой набор наблюдений (статистический материал) обычно одного исследуемого процесса, регистрируемых непрерывно или через некоторые моменты времени (Мишулина, 2004; Madsen, 2007). Для каждого наблюдения такого ряда приводится время или номер его измерения по порядку. Временной ряд отличается от простой выбор-

ки данных тем, что при его анализе учитывается взаимосвязь измерений со временем, а не только статистические характеристики оцениваемых данных.

Анализ временных рядов, позволяющий глубже оценить исследуемый процесс (феномен), основан на ряде методов анализа и моделировании последовательности наблюдений (Chandler, Scott, 2011). Метод временных рядов широко используется в дистанционном зондировании Земли при прогнозном моделировании на основе серии спутниковых данных, выявлении смещения пространственного распределения биоклиматических зон, а также при оценке и анализе фенологических параметров, характеризующих динамику состояния растительности в течение определенного периода времени (Барталев и др., 2016; Cano et al., 2017; Gill et al., 2017; Frazier et al., 2018).

Аналогичные методы оценки пространственно-временных взаимосвязей факторов окружающей среды и фенологического состояния растительного (лесного) покрова в своих работах использовали и другие исследователи (Frantz et al., 2017; Meroni et al., 2019).

При решении подобных задач, в том числе для оценки растительного (лесного) покрова, предполагается, что исследуемые временные ряды состоят из систематических шаблонов данных (оцениваемых компонентов) и так называемого случайного шума, ошибки данных. Основные показатели временных рядов, выступающих в качестве стандартных шаблонов, описываются такими системными компонентами, как тренды и сезонность.

Изучение вышеназванных проблем особенно актуально для лесных насаждений Марийского Заволжья, которые за последние десятилетия были неоднократно подвергнуты сильным природным и антропогенным нарушениям (Курбанов и др., 2016; Демаков, 2018), приведшим к их усыханию, пожарам, ветровалам и буреломам. Остаются недостаточно изученными вопросы

влияния происходящих изменений на устойчивость лесных экосистем, взаимосвязь сезонных изменений с ареалами их произрастания и степенью их повреждения, а также использования спутниковых данных при выполнении подобных исследований.

Основным фактором, лимитирующим использование данных дистанционного зондирования для решения вопросов по мониторингу и оценке устойчивости лесов, является недостаток валидации и экспертизы таких работ на региональном уровне (Hosiolo, Lewandowska, 2019; Verkerk et al., 2019). В данном исследовании мы рассмотрели три региональных примера использования данных спутниковой съемки разного пространственного разрешения для оценки устойчивости лесных экосистем.

Выводы по главе 1

Лесные насаждения планеты Земля становятся важным объектом при решении вопросов в повестках международных организаций, а также директивных документах по устойчивому развитию и изменению климата. Среди 17 целей в области устойчивого развития 7 направлений имеют непосредственное отношение к лесам и деревьям. В Парижских соглашениях по изменению климата страны-участницы договорились о сохранении и увеличении поглотителей и накопителей парниковых газов, включая леса, которые в этом документе были выделены в отдельную 5 статью. Российской Федерации как лесной державе в процессе выполнения обязательств по реагированию на изменение климата придется предусматривать меры, касающиеся лесного хозяйства и других видов землепользования.

Понимание процессов антропогенного влияния на лесо- и землепользование и возможности дистанционного мониторинга за изменениями во времени и пространстве могут позволить обоснованно принимать решения по выполнению странами

международных обязательств. В последние годы данные дистанционного зондирования становятся все более оперативными и доступными для специалистов и широкого круга пользователей, находят применение для решения вышеназванных проблем в настоящее время и будут иметь все большее значение в ближайшие десятилетия.

Российская Федерация как одна из 12 участниц международного Монреальского процесса по сохранению и устойчивому управлению лесами приняла обязательства по выполнению руководства по 7 критериям и 67 связанных с ними индикаторов в области устойчивого управления лесами. 27 из этих индикаторов, которые подробно описывают состояние и структуру лесного покрова, могут быть определены и количественно оценены методами дистанционного зондирования Земли.

В последние годы в лесном и сельском хозяйстве находят широкое использование спутниковые данные высокого разрешения Sentinel-2, которые предоставляют новые возможности для создания точных наборов мультиспектральных данных в готовом к использованию векторном формате. Спутниковые снимки Sentinel-2 Европейского космического агентства обладают большим потенциалом для повышения точности классификации типов леса и их породного состава.

Проведенный анализ научных публикаций, отражающих исследования отечественными и зарубежными учеными данных спутника Sentinel-2, показывает, что в последние годы лишь немногие работы были посвящены лесному картографированию, классификационным методикам и дистанционному мониторингу с использованием его изображений. Между тем изображения Sentinel-2 повышают возможности точной интерпретации данных ДЗЗ при проведении лесоустроительных работ и мониторинга хозяйственной деятельности арендаторов леса.

Все большее применение для оценки фенологических показателей лесов и происходящих изменений климата во времени и пространстве находят вегетационных индексы, получаемые на основе временных рядов данных спутниковых наблюдений среднего и высокого пространственного и временного разрешений. Анализ временных рядов, позволяющий глубже оценить исследуемый процесс, широко используется в дистанционном зондировании Земли. В частности его используют при прогнозном моделировании на основе серии спутниковых данных, выявлении смещения пространственного распределения биоклиматических зон, а также при оценке и анализе фенологических параметров, характеризующих динамику состояния растительности.

Проведенный анализ литературных источников в этой главе монографии позволил учесть предыдущие наработки и недостатки других исследователей в области картографирования и оценки устойчивости лесного покрова в разных лесорастительных условиях планеты Земля. В данной работе коллектив авторов рассмотрел возможность использования спутниковых данных высокого и среднего пространственного разрешения для оценки устойчивости лесных насаждений на примере трех региональных исследований – Сирийской Арабской Республики, Марийского лесного Заволжья и Пензенской области Российской Федерации.

ГЛАВА 2. **ОЦЕНКА РАСТИТЕЛЬНОГО ПОКРОВА СИРИЙСКОЙ АРАБСКОЙ РЕСПУБЛИКИ**

2.1. Цель и задачи исследования

Исследования наземного покрова по данным спутниковой съемки особенно актуальны для средиземноморских лесных насаждений, которые характеризуются высокой пространственно-временной разнородностью, что обусловлено особым региональным климатом, флористическим биоразнообразием и топографической изменчивостью (Али, 2017). Большое разнообразие и фрагментированность растительного покрова, сухость почв, известняки и высокая отражательная способность в этом регионе Средиземноморья являются ограничивающими факторами, влияющими на точность картографирования лесных насаждений (Pignatti et al., 2009; Etteieb et al., 2013; Gomariz-Castillo et al., 2017).

Основной целью работы является оценка динамики и состояния растительного покрова Сирийской Арабской Республики (САР) по данным спутниковой съемки MODIS и Sentinel-2. Для достижения данной цели были решены следующие задачи:

- Подобраны спутниковые данные радиометров MODIS (за 2000 - 2017 гг.) и Sentinel-2 на территорию исследования.
- Выделены классы наземного покрова и проведен анализ динамики растительного покрова САР.
- Проведена классификация сцен MODIS и Sentinel-2.
- Разработана тематическая карта на территорию САР и легенда классов наземного покрова на мухафаз¹ Латакия.
- Проведена оценка точности картографирования.

¹ Административно-территориальная единица в САР. Мухафазы в свою очередь делятся на манатики (районы).

2.2. Объект и область исследования

Областью исследований является территория Сирийской Арабской Республики, расположенная в Западной Азии и на восточном побережье Средиземного моря. На севере Сирия граничит с Турцией, на востоке – с Ираком, на юге – с Иорданией и Палестиной и на западе – с Ливаном по границе Средиземного моря (рисунок 2.1).

Горные цепи в САР тянутся с севера на юг страны и включают холмистую местность, расположенную параллельно границе побережья Средиземного моря, разделяющего страну на влажную западную и засушливую восточную зоны. Лесные территории в САР расположены в основном в прибрежной зоне (Атлас мира, 2018).

Средиземноморские леса, подвергшиеся в последнее тысячелетие существенным антропогенным воздействиям, состоят из низкорослых хвойных и лиственных пород. Такие леса характеризуются пространственно-временной гетерогенностью, которая обусловлена субтропическим климатом, высоким уровнем биоразнообразия и топографической изменчивостью. Большинство таких растительных участков находятся под угрозой опустынивания (Hill et al., 1994). Поэтому небольшие участки древесно-кустарниковой растительности представляют собой важный элемент устойчивости земель к процессам опустынивания (Calva, Palmeirim, 2004). Лесные пожары также являются одним из основных природных рисков в Средиземноморском бассейне. В частности в САР лесные пожары по-прежнему представляют собой один из самых больших рисков (FAO, 2013). Сирийские леса также играют важную роль в охране почв от эрозии, регулировании водных ресурсов и обеспечении других различных экологических функций.

Землепользование во многом зависит от ежегодных климатических условий. Западное побережье входит в зону субтропиче-

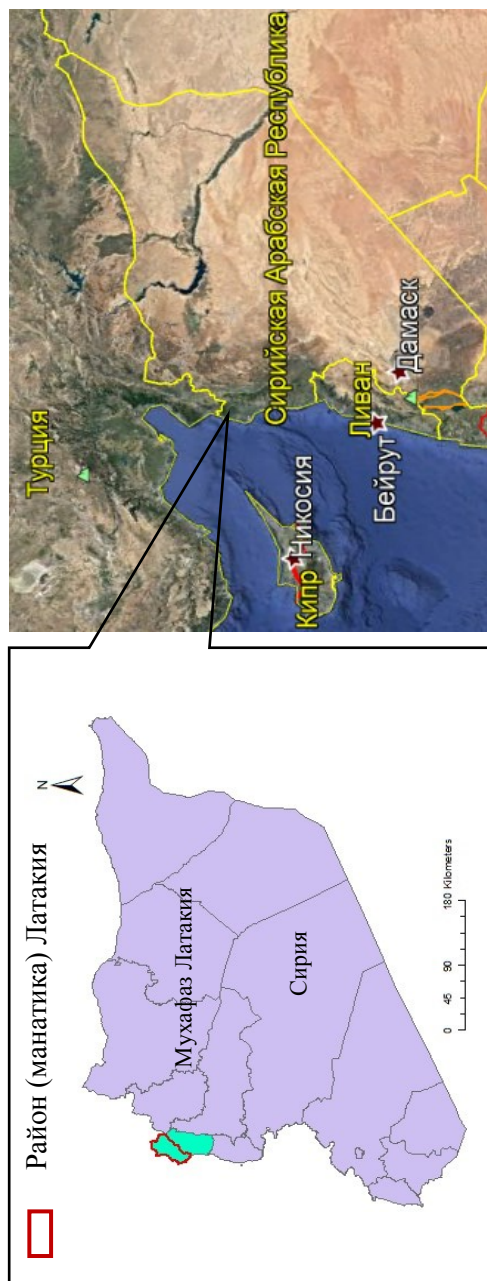


Рисунок 2.1 – Расположение района (манатика) Латакия, входящего в мухафаз Латакия САР
(Ресурс –Yandex Карта)

ского средиземноморского пояса, восточная часть страны находится в пустынно-степной и пустынной зонах (FAO, 2013). Структурно территория республики подразделяется на следующие категории: лесные районы, занимающие более 3 % территории страны: плодородные земли – 32 %; пастбища, занимающие 45 % территории страны и 20 % – это площадь, занятая пустынями.

Водные ресурсы страны, имеющие важное народнохозяйственное значение для экономики, жизни ее населения и произрастания растительности, достаточно ограничены. Из крупных водных источников особо следует отметить пересекающую всю территорию Сирии реку Ефрат, вдоль русла которой произрастают значительные запасы растительного покрова (Al-Fares, 2013).

Древесно-кустарниковая растительность Сирии расположена в зоне произрастания жестколистных лесов и кустарников и представлена основными видами, включающими хвойные породы деревьев: пихта киликийская (*Abies cilicica*), кипарис вечнозелёный (*Cupressus sempervirens*) кедр ливанский (*Cedrus libani*), сосна калабрийская (*Pinus Brutia*); лиственные: клён критский (*Acer sempervirens*), дуб калепринский (*Quercus calliprinos*), эвкалипт (*Eucalyptus*), а также кустарниковые породы: можжевельник колючий (*Juniperus oxycedrus*); черноголовник колючий (*Sarcopoterium spinosum*) и др., кустарничковые: саксаул (*Halóxylon*), биюргун (*Anabasis salsa*) (Forests of Syria, 2009).

Травянистый покров на территории САР обычно появляется после обильных дождевых осадков. Большие площади, занятые плодовыми культурами, представлены яблоневыми, апельсиновыми и оливковыми садами. Вдоль побережья Средиземного моря САР тянутся плантации сахарного тростника и табака.

В долинах рек Сирийской Арабской Республики выращиваются тутовое дерево (*Morus*), инжир (*Ficus Carica*), цитрусовые (*Citrus*) и плантации хлопчатника (*Gossypium sturtianum*). На пологих склонах страны разводят оливки (*Olea europaea*) и виноград (*Vitis*). Наиболее известные сельскохозяйственные культуры в стране широко представлены пшеницей, кукурузой и ячменем. В САР также успешно выращивают картофель и другие овощи. В условиях искусственного орошения выращивается рис (FAO, 2016).

В этих условиях спутниковые изображения могут служить эффективным инструментом для определения состояния и мониторинга пространственного распределения древесно-кустарниковой растительности (Etteieb et al., 2013) средиземноморского региона.

При работе со сложными гетерогенными ландшафтами, которые широко встречаются в САР, методы тематической классификации спутниковых снимков имеют решающее значение для создания точных и недорогих карт землепользования (Koutsias, Karteris, 2003). При этом оценка фитомассы растительного покрова для тематических карт представляет собой ключевой элемент таких исследований при планировании защитных мероприятий (Курбанов, 2007) и оценке риска опустынивания территорий (Moleele et al, 2001).

2.3. Методика и материалы исследования

В ходе исследования разработан метод регионального мониторинга растительного покрова территории Сирийской Арабской Республики на основе данных спутниковых наблюдений среднего и высокого пространственного разрешения MODIS (США) и Sentinel-2 (Европейское космическое агентство). Для снимков радиометра MODIS разработана методика, позволяющая провести дистанционный мониторинг территории всей Си-

рии, в то время как для изображений спутника Sentinel-2 речь идет о региональных исследованиях на уровне отдельных районов страны.

Для анализа изменений растительного покрова CAP были использованы готовые тематические продукты MOD13Q1 (Vegetation Indices), полученные на базе разновременной серии данных спектрорадиометра MODIS/Terra (250 м). Данные тематические карты являются результатом классификации 16-дневных композитных изображений, позволяющих оценить уровень, состояние и плотность растительного покрова исследуемой территории (фитомассы) на основе усовершенствованного индекса вегетации:

$$EVI = G * \frac{NIR - RED}{NIR + C_1 * RED - C_2 * BLUE + L},$$

где RED, NIR и BLUE – значения в красной, инфракрасной и синей зонах спектра; L – поправочный коэффициент, позволяющий учесть излучение, прошедшее сквозь полог растительного покрова; C₁ и C₂ – коэффициенты, учитывающие влияние аэрозоль в красной и синей зонах спектра; G – коэффициент усиления.

Для алгоритма оценки вегетационного индекса EVI приняты следующие значения используемых коэффициентов: L = 1, C₁ = 6, C₂ = 7.5 и G = 2.5 (Kamel et al., 2015). Диапазон значений индекса составляет от -1 до +1, для растительного покрова значения индекса EVI начинаются от 0,2 и выше. Наряду с широко распространенным индексом вегетации NDVI, индекс EVI часто используется для оценки пространственно-временных изменений растительного покрова и анализа взаимосвязи проективного покрытия LAI (Leaf area Index – индекс листовой поверхности), а также плотности и распределения фитомассы растительного покрова.

Чувствительность значений показателя вегетационного индекса EVI к условиям окружающей среды, в которых произрастает растительность, чрезвычайно важна при оценке динамического ряда изменений в структуре ее полога (Shwan et al., 2017).

В нашем исследовании для дистанционного мониторинга и оценки растительного покрова исследуемой территории САР были использованы пары тематических растровых изображений (спутниковых снимков) радиометра MODIS/Terra серии MOD13Q1 за 2000, 2010 и 2017 гг. (таблица 2.1). Это позволило понять и проанализировать динамику растительного покрова различных районов страны.

Для полного покрытия территории исследования были использованы пары сцен MODIS h20v05 (западная часть САР) и h21v05C (центральная и восточная часть САР) за каждый оцениваемый промежуток времени (рисунок 2.2).

Таблица 2.1 – **Используемые данные MODIS серии MOD13Q1**
(<https://ladsweb.modaps.eosdis.nasa.gov/>)

№	Индекс изображения	Дата съемки
1	MOD13Q1.A2000209.h20v05.006.2015138074234	27.07.2000
2	MOD13Q1.A2000209.h21v05.006.2015138073918	27.07.2000
3	MOD13Q1.A2010209.h20v05.006.2015209150345	28.07.2010
4	MOD13Q1.A2010209.h21v05.006.2015209150356	28.07.2010
5	MOD13Q1.A2017193.h20v05.006.2017209233103	28.07.2017
6	MOD13Q1.A2017193.h21v05.006.2017209233226	27.07.2017

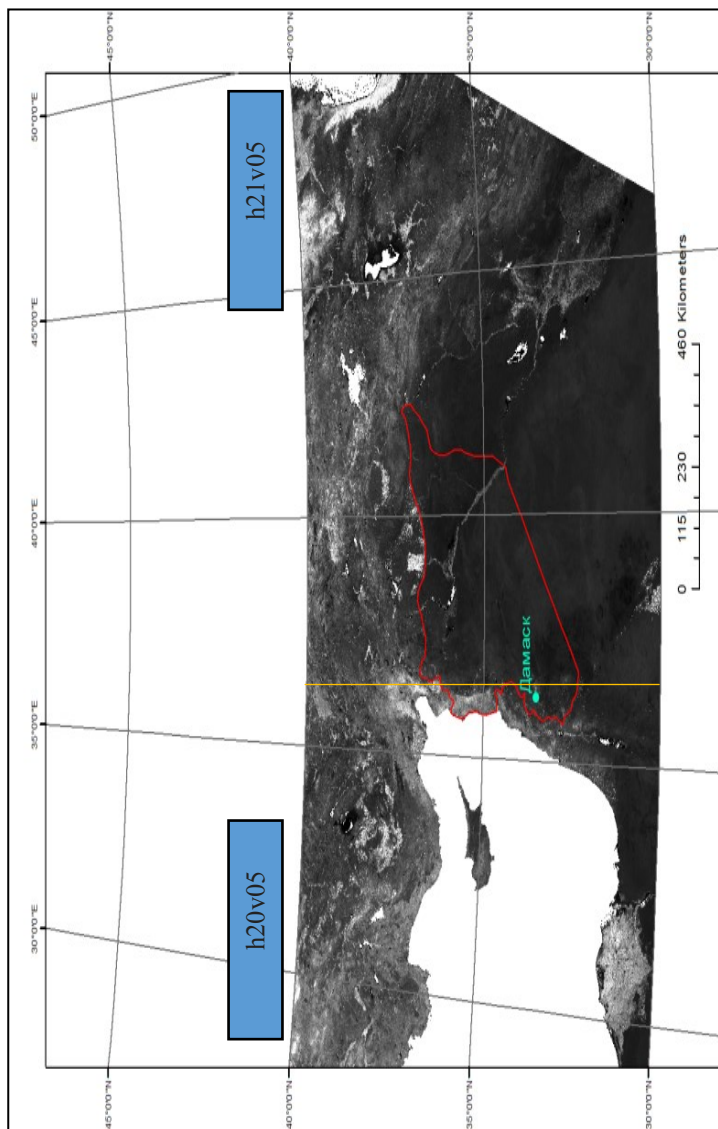


Рисунок 2.2 – Покрытие композитными изображениями EVI района исследований (желтая линия – граница сцен MODIS)

Тематический слой «растительный покров», в который также вошли древесно-кустарниковая растительность и травянистый покров, был получен путем разделения тематических классов наземного покрова САР методом «дерево целей» в программном пакете ENVI.

За основу выделения тематических классов было взято положение, по которому все значения выделенного тематического слоя вегетационного индекса EVI, имеющие показатель более 0,2, относятся к тематическому классу «растительный покров», а значения менее 0,2 относятся к тематическому классу без растительного покрова (открытые участки, водные объекты, транспортные пути и т.п.) (рисунок 2.3).

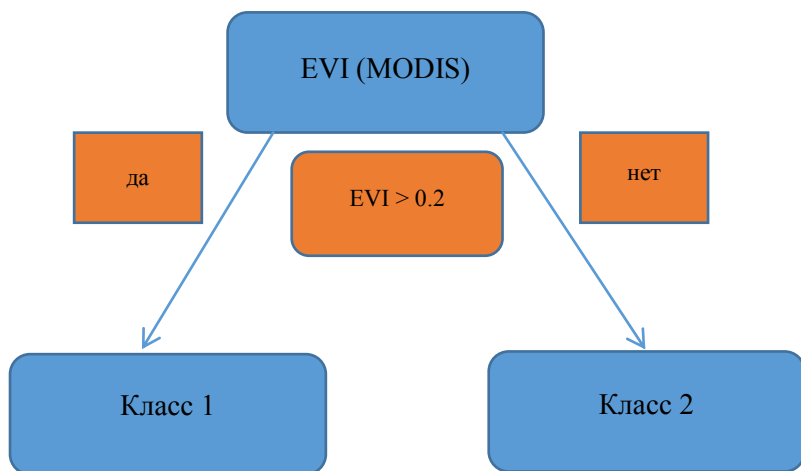


Рисунок 2.3 – Блок-схема «дерево целей» для выделения класса «растительный покров»

Оценка значений вегетационного индекса EVI по спутниковым данным радиометра MODIS при мониторинге растительного покрова была основана на подходах других исследователей с применением методики «дерева решений» (Huttich et al., 2009; Gond et al., 2013, Mertes et al., 2015). В результате такого подхода все объекты растительного происхождения были выделены в виде отдельного тематического растрового слоя – Класс 1 «растительный покров».

Для получения количественных характеристик и оценки пространственно-временного распределения растительного (лесного) покрова (качественная характеристика) на территории Сирийской Арабской Республики из спутниковых сцен MODIS были выделены отдельные фрагменты изучаемой территории с помощью векторного полигонального слоя по границам республики (рисунок 2.4).

Вновь полученные по сценам спектрорадиометра Modis тематические растровые слои 2000, 2010 и 2017 гг. «растительный покров» на территорию САР были трансформированы в векторный формат. Анализ тематических карт по данным MODIS в среде ArcGis для каждого оцениваемого периода позволил получить данные по динамике площадей растительного покрова (таблица 2.2).

Таблица 2.2 – Площадь тематического класса «растительный покров» на территории Сирийской Арабской Республики

Год	Площадь, тыс. га
2000	760,3
2010	784,7
2017	755

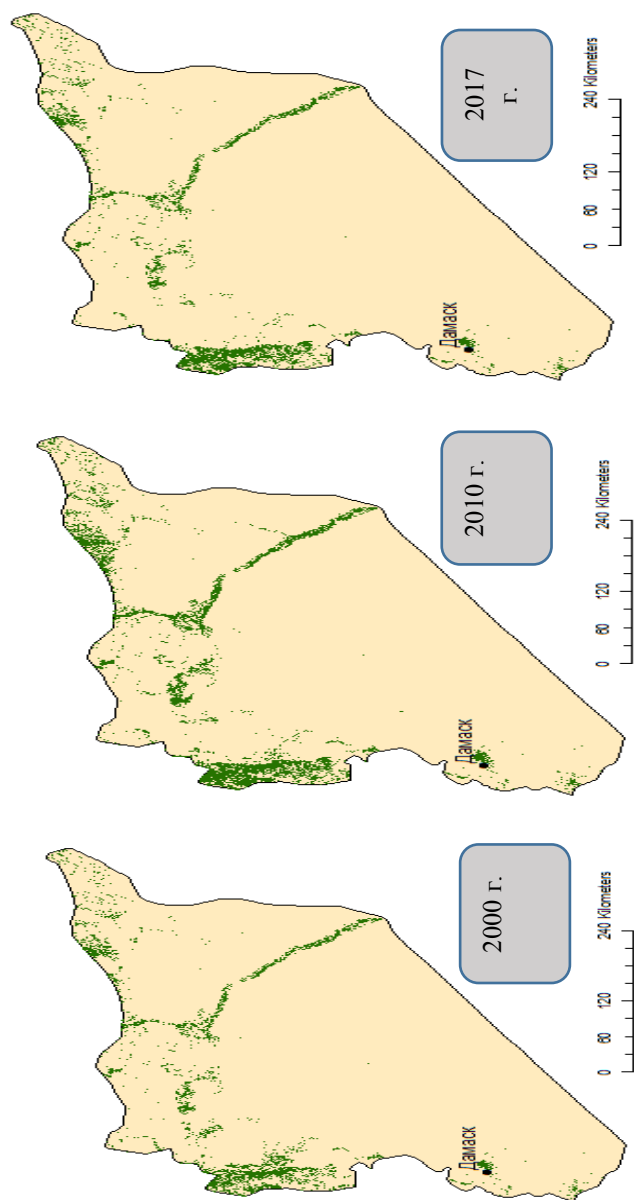


Рисунок 2.4 – Пространственно-временная динамика древесно-растительного покрова (зеленым цветом) на территории Сирии

Обработка спутниковых снимков Sentinel-2

На территорию исследования Сирийской Арабской Республики с сайта ESA был получен спутниковый снимок Sentinel-2 (S2B_TILE_ 20170903T1_T36SYE), сделанный 03.09.2017. Данный снимок Sentinel-2 прошел предварительную радиометрическую и атмосферную коррекцию с уровнем обработки 1C (Level-1C, Top Of Atmosphere (TOA) reflectance). В результате такой предварительной обработки спутникового снимка для последующей работы был сформирован мультиспектральный композит на основе каналов 2 (синий, 490 нм), 3 (зеленый, 560 нм), 4 (красный, 665 нм), 8 (ближний инфракрасный, 842 нм) спектрального диапазона (RGB и NIR) и с пространственным разрешением в 10 метров на пиксель.

В нашем исследовании для оценки растительного (лесного) покрова использовался только фрагмент сцены Sentinel-2, выделенный по границе территории исследования района Латакия (рисунок 2.5). Предварительная обработка, классификация спутниковых снимков, оценка точности тематического картографирования и анализ полученных данных велись в геоинформационных программных комплексах ENVI и ArcGis 10.3.

Тематическая классификация спутникового снимка Sentinel-2 проводилась в несколько последовательных этапов (рисунок 2.6). На первом этапе для района Латакия была получена карта NDVI (Нормализованный относительный индекс растительности) :

$$NDVI = (NIR - RED) / (NIR + RED),$$

где NIR – ближняя инфракрасная зона спектра изображения, RED – красная зона спектра. Диапазон значений индекса

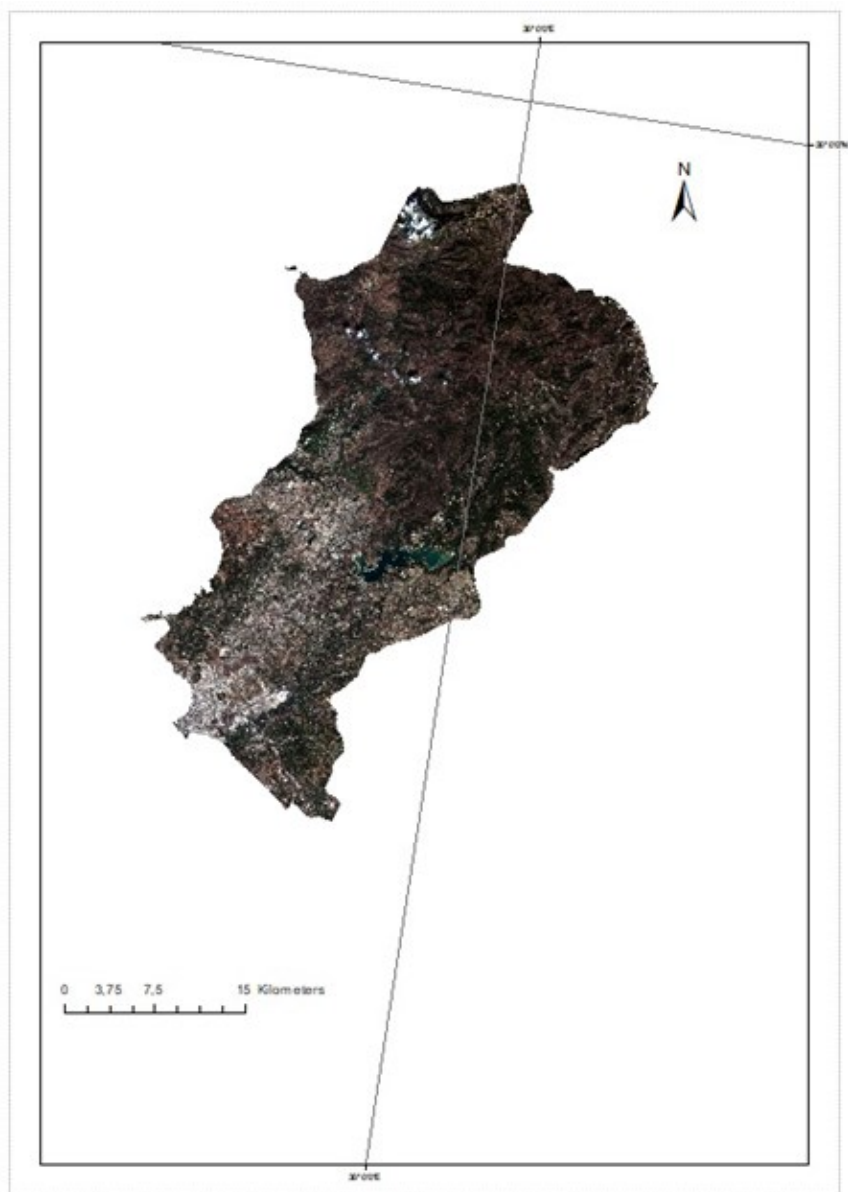


Рисунок 2.5 – Фрагмент мультиспектрального изображения Sentinel-2 (RGB и NIR) по границе района Латакия

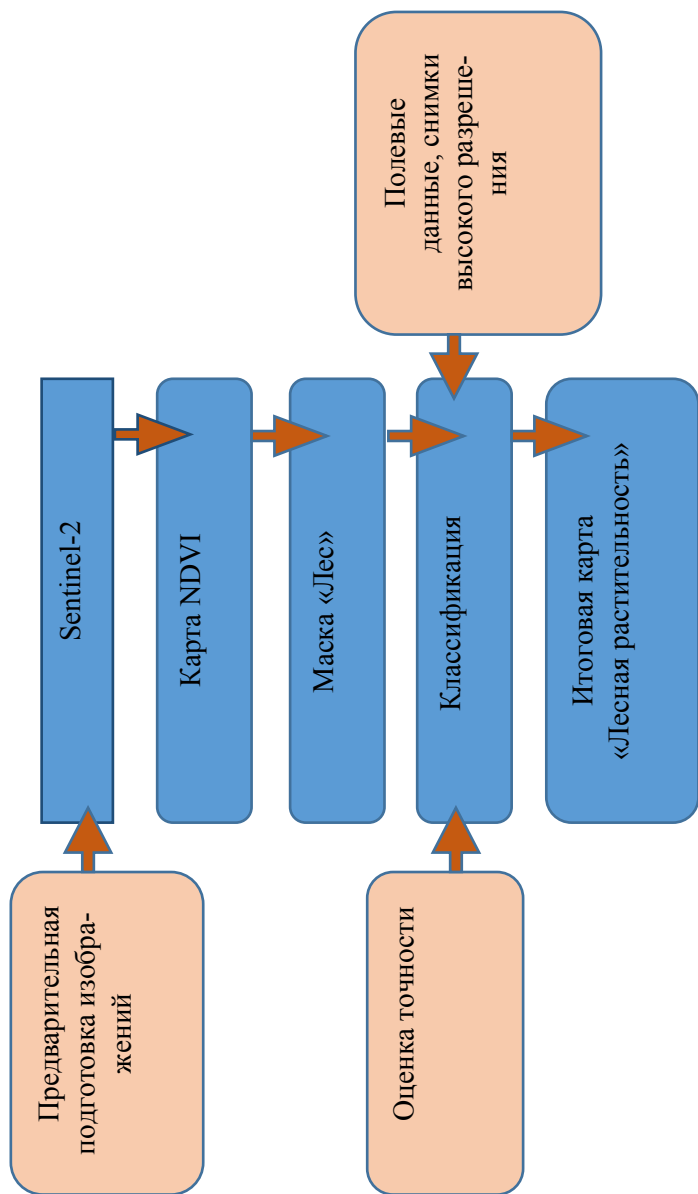


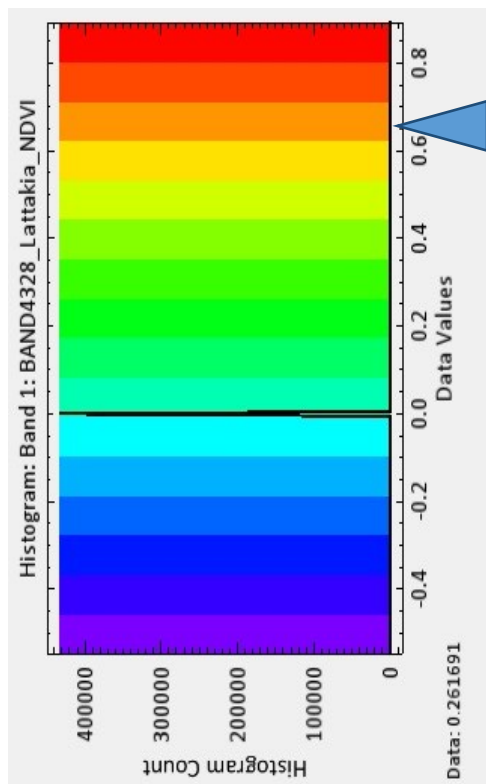
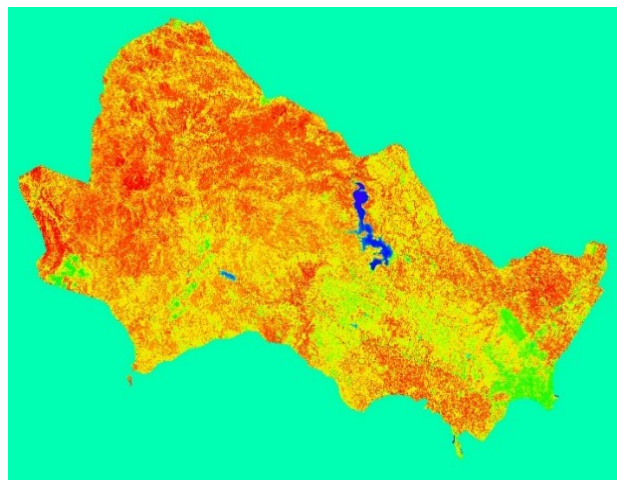
Рисунок 2.6 – Блок-схема тематической классификации фрагмента сцены Sentinel-2

составляет от -1 до +1, для подстилающего растительного (лесного) покрова значения индекса начинаются от 0,2 и выше (рисунок 2.7).

На основе полученной карты распределения NDVI по территории Латакия с применением методики бинарного геокодирования в пакете ENVI был выделен тематический слой со значениями выше 0.65, что позволило получить в виде маски векторного слоя полигональные границы класса «лесная растительность» для дальнейшего детального картографирования (рисунок 2.8).

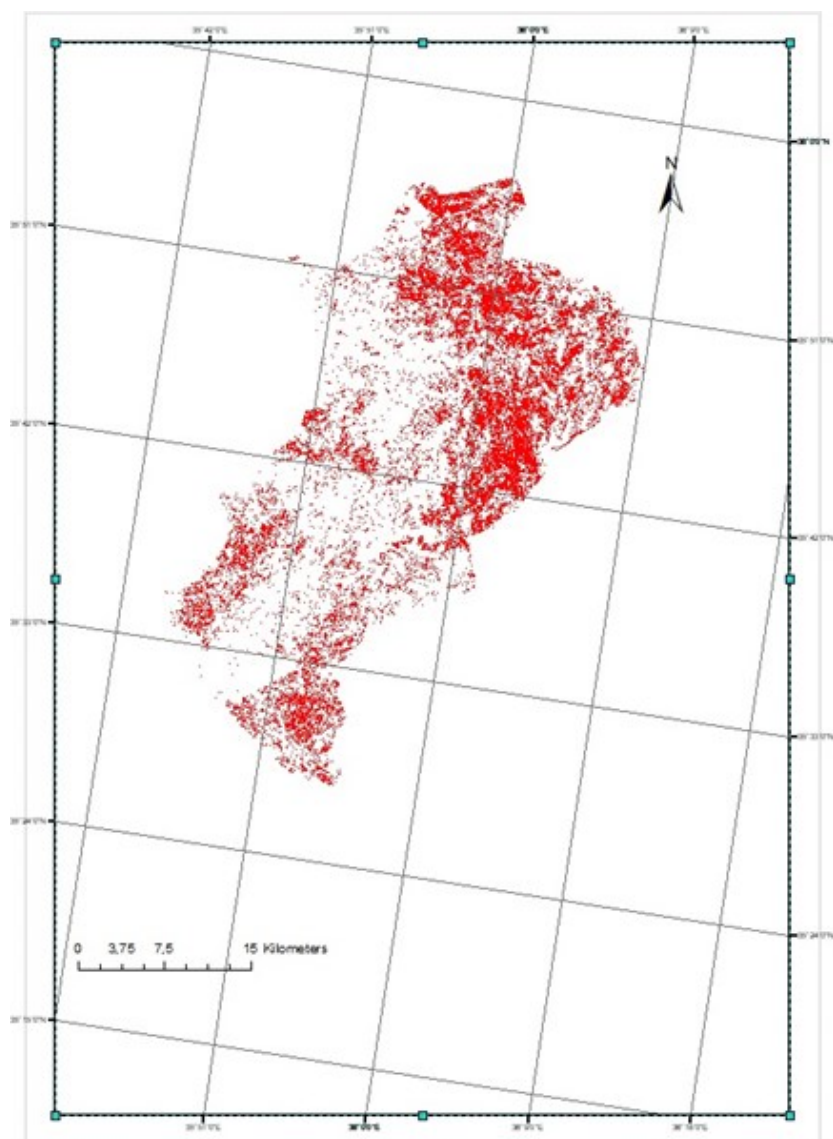
Последующая управляемая классификация картографического слоя лесных земель проводилась ранее применяемым методом «дерево решений» на основе выделенной векторной «маски» с использованием 30-метровой цифровой модели рельефа (данные NASA). Это позволило учесть рельеф местности района Латакии САР (экспозицию), а также градацию спектральной разделимости различных типов растительного покрова, произрастающих на склонах. После проведения процедуры тематической управляемой классификации выделенного слоя «лесная растительность» нами был получен картографический материал на территорию исследования (рисунок 2.8).

Оценка точности (Курбанов и др., 2015) полученной тематической карты была проведена по матрице различий для разработанных 5 тематических классов растительного покрова сирийской Латакии. Для оценки точности нами были использованы данные полевых исследований аспиранта Поволжского государственного технологического университета Али Махера Саида, других снимков высокого разрешения на территорию САР, глобальных карт Google и экспертного анализа спектральной разделимости вновь разработанных классов наземного (лесного) покрова в пакете ArcGIC (таблица 2.3). Общая точность тематиче-



Пороговое значение NDVI для выделения
класса «лесная растительность»

Рисунок 2.7 – Тематическая карта NDVI (слева) и диапазон полученных данных (справа). Показатель 0,6-0,9 NDVI указывает на высокую плотность насаждений для лесов умеренных широт и тропиков (Pettorelli, 2013)



**Рисунок 2.8. – Векторный слой «лесная растительность»
на базе снимка Sentinel-2 района Латакия**

Таблица 2.3 – Данные оценки точности тематического картографирования спутникового изображения Sentinel-2

Классы	С	Д	К	См	ДК	Всего	Точность пользователя UA%
С	623	49	2	31	32	737	84,5
Д	13	216	20	41	78	368	58,7
К	3	4	284	12	2	305	60,3
См	71	71	9	301	46	498	45,8
ДК	38	12	12	59	511	632	80,9
Всего	748	352	327	444	669	1935	
Точность произ- водителя PA%	83,3	61,4	56,3	51,4	76,4		

ской классификации спутникового снимка Sentinel-2 достигает 0.76, коэффициент Каппа – 0.73.

Далее полученные тематические классы растительного покрова прошли процедуры генерализации в пакете ENVI и векторизации в программном пакете ArcMap. Для большей точности экспертным путем из вновь полученной тематической карты «лесная растительность» были исключены участки искусственного происхождения «сельскохозяйственные земли» или «сады» (рисунок 2.9).

Полученные в исследовании тематические карты на 5 классов растительного (лесного) покрова района Латакия Сирийской Арабской Республики являются основой для проведения дальнейшего анализа его состояния, распределения и динамики во времени при использовании серии спутниковых изображений Sentinel-2.

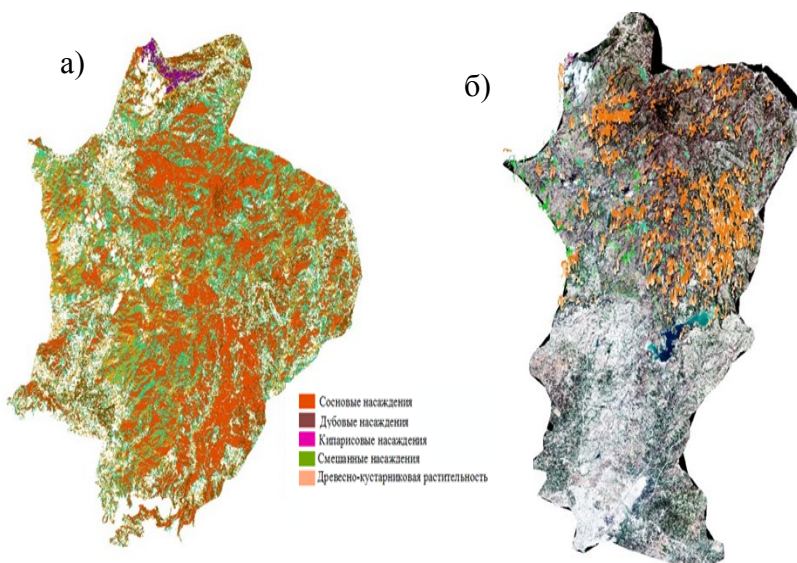


Рисунок 2.9 – Тематическая карта «лесной растительности» района Латакия: а) после генерализации; б) совмещенная с цифровой моделью рельефа

2.4. Полевые исследования

В 2018 г. аспирантом Поволжского государственного технологического университета Махером Саидом Али были заложены тестовые участки (эталонные) в районе исследования Латакии. Подбор и закладка тестовых участков на местности осуществлялись для последующей валидации и оценки точности разрабатываемого картографического материала лесного покрова Сирийской Арабской Республики. Для этого им использовались существующие карты лесных насаждений на территорию исследования и открытые материалы спутниковой съемки высокого разрешения (Yandex, Google, SAS Planet, Sentinel-2).

Главным условием при подборе тестовых участков была их репрезентативная представленность во всех классах наземного покрова и равномерное распределение по территории исследования. Для идентификации на спутниковом снимке Sentinel-2 площадь тестовых участков на местности составляла не менее 0,5 га. Оценка древостоев проводилась методом наземной глазомерно-измерительной таксации. Для выбранного тестового участка определялись состав (не менее 70 % главной породы), величина проекционного покрытия, средняя высота и диаметр насаждения, а также возраст преобладающей породы древостоя. В течение полевого сезона было исследовано 115 тестовых участков, представленных описанными ниже классами древесных пород.

Древостой с преобладанием сосны калабрийской (Pinus brutia) – наиболее широко распространённой древесной породы Сирийской Арабской Республики, произрастающей в субгумидных и полузасушливых биоклиматических зонах от побережья Латакии в горных районах. Деревья этой породы могут достигать средней высоты 20-22 м. В зависимости от условий местопроизрастания в подлеске древостоя часто встречаются различные кустарники.

Древостои с преобладанием дуба австрийского (турецкого) (*Quercus cerris*) занимают участки в западных предгорьях на высотах от 900 до 1250 м и между 900 и 1100 м над уровнем моря на восточных склонах. Высота деревьев дуба австрийского в Сирийской Арабской Республике может достигать до 40 м. Насаждения, представленные дубом австрийским, могут произрастать совместно с некоторыми другими древесными породами: это дуб инфекторный/лузитанский (*Quercus infectoria*), граб восточный (*Carpinus orientalis*), хмелеграб обыкновенный (*Ostrya carpinifolia*), багрянник европейский (*Cercis siliquastrum*), ясень белый (*Fraxinus ornus*).

Древостои с преобладанием кипариса вечнозелёного (*Cupressus sempervirens*) произрастают в основном в районе сирийско-турецкой границы. Такие лесные насаждения довольно часто имеют в своем подросте и подлеске следующие древесно-кустарниковые породы: дуб кermесовый (*Quercus calliprinos*), цератония стручковая, или рожковое дерево (*Ceratonia Siliqua*), лавр благородный (*Laurus nobilis*), фисташка палестинская (*Pistacia palaestina*). В последние годы древостои кипариса вечнозеленого в Сирии подвергаются различным нарушениям, вызванным антропогенным и природным факторами.

Смешанные леса открытого типа (относительная полнота менее 50 %) представляют собой сложные древостои, состоящие из двух типов древесных пород – лиственных и хвойных. Лиственные породы могут быть представлены листопадными породами, например, лавром благородным (*Laurus nobilis*), лиственными вечнозелеными, например, цератонией стручковой (*Ceratonia siliqua*) и другими.

Хвойные породы в смешанных лесах открытого типа в Сирии представлены соснами калабрийской и итальянской (*Pinus pinea*), имеющими как естественное, так и искусственное происхождение. Все смешанные древостои могут иметь более слож-

ный породный состав за счет большого биологического разнообразия в составе лесных насаждений других древесных и кустарниковых пород.

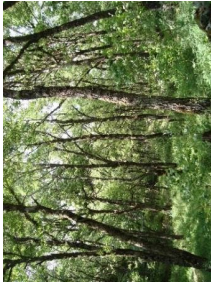
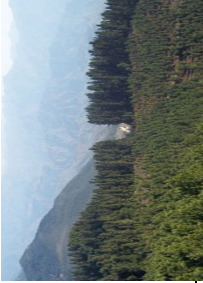
Древесно-кустарниковая растительность представлена небольшими деревьями высотой до 3 м, включая практически все вышеперечисленные породы деревьев, а также можжевельник колючий (*Juniperus oxycedrus*), рожковое дерево (*Ceratonia siliqua*), клен сирийский (*Acer syriacum*) и другие породы, которые характеризуются невысокой биологической производительностью, что связано с худшими условиями места произрастания. В этом древесно-кустарниковом тематическом классе представлены в основном засухоустойчивые растения. Кроме того, растения данного класса обычно являются пионерами после лесных пожаров.

Смешанная с деревьями кустарниковая растительность в Сирии представлена следующими породами высотой до 2 м: ракитник мохнатый (*Calycotome villosa*), дрок колючеветвистый (*Genista acanthoclada*), ладанник (*Cistus villosus*). Наличие в составе такой растительности черноголовника колючего (*Poterium spinosum*) указывает на сухость почвы, что может отразиться на ухудшении общего состояния и производительности лесных насаждений.

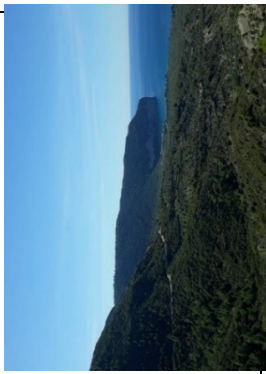
Тестовые участки были также заложены аспирантом ФГБОУ Поволжского государственного технологического университета Махером Саидом Али на нелесных землях района Латакии: травянистый покров, населенные пункты, пути сообщений, водные объекты, участки, не покрытые растительностью.

В нашем исследовании на основе полученных тестовых участков для проведения управляемой классификации спутниковых данных была сформирована легенда на 5 тематических классов лесного покрова, разработанных для территории исследования (таблица 2.4).

Таблица 2.4 – Легенда тематической карты наземного покрова для сцены Sentinel-2

Наименование класса	Код класса	Класс	Фото
Хвойные насаждения	С	Основной ярус представлен сомкнутым древостоем хвойных вечнозеленых пород высотой более 3 м и сомкнутостью полога более 70 %. Более 7 единиц в составе насаждения. Преобладающая порода – сосна калибрийская	
Лиственные насаждения	В	Основной ярус представлен сомкнутым древостоем лиственных пород высотой более 3 м, сомкнутостью полога более 75 %. Более 7 единиц в составе насаждения. Преобладающие породы – дуб австрийский и псевдосирийский (<i>Quercus cerris</i> sp. <i>Pseudo-cerris</i>)	
Насаждения кипариса	CS	Основной ярус под вечнозелеными деревьями высотой более 3 м и сомкнутостью полога более 50 %. Преобладающая порода (кипарис вечнозелёный) составляет более 70 % от состава насаждения	

Окончание таблицы 2.4

Наименование класса	Код класса	Класс	Фото
Смешанные насаждения	ТМО	Представлены деревьями высотой более 3 м, где ни лиственные, ни вечнозеленые хвойные породы не составляют > 60 % от состава насаждения. Сомкнутость полога составляет 15-60 %. Основные породы – сосна калибрийская, дуб австрийский и псевдосирийский	
Древесно-кустарниковая растительность	TS	Растительность высотой до 3 м, с площадью проективного покрытия более 50 %. Представлена низкорастущими деревьями высотой до 3 м: сосна калибрийская, дуб австрийский и псевдосирийский, можжевельник колочий, рождковое дерево. Среди кустарников встречаются: ракитник мохнатый, дрок колнучевистый и др.	

2.5. Результаты исследования

По результатам классификации спутниковых снимков MODIS и Sentinel-2 были получены пространственные и количественные характеристики распределения древесно-кустарниковой растительности на территории Сирийской Арабской Республики и провинции Латакия.

Данные MODIS. Пространственно-временной анализ динамики по площади растительного покрова на территории САР на основе спутниковых данных MODIS показал незначительные его изменения за семнадцатилетний период (рисунок 2.10).

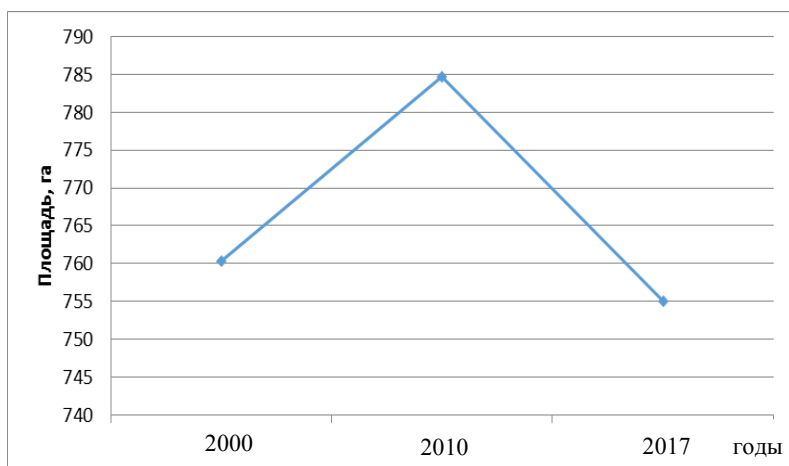


Рисунок 2.10 – Динамика изменения площади растительного покрова Сирии

С 2000 по 2010 год в Сирии наблюдается увеличение общей площади растительного покрова на 24,4 тыс. га (на 3,2 %). Такую динамику класса «растительный покров» можно объяснить увеличением осадков за исследуемый период, что подтверждается также ростом среднего значения индекса NDVI между 2000 и 2010 годами, особенно в 2003 году (Iyad and Warda, 2016).

Кроме того, в Сирии в эти годы активно выполнялись мероприятия по восстановлению лесов с участием международных партнеров (FAO, 2013).

Между тем с 2010 по 2017 год наблюдается снижение площади растительного (лесного) покрова в связи с ростом интервалов засушливых периодов, а также резким уменьшением площадей сельскохозяйственных угодий. Это объясняется существенным (на 50 %) падением в САР сельхозпроизводства, нарушением и деградацией древостоев (вырубка и пожары), а также связано с негативными последствиями сирийского конфликта (Al-Mahmoud, 2015).

Полученные на основе данных MODIS карты растительного покрова Сирийской Арабской Республики за период с 2000 по 2017 год позволяют проводить региональный мониторинг динамики наземного покрова с высокой периодичностью. Разработанные методика и алгоритм работы со спутниковыми снимками MODIS предоставляют возможность оценить состояние и динамику пространственно-временных изменений в растительном (лесном) покрове на территории исследования.

Проведенное тематическое картографирование позволило также выявить участки максимальной кластеризации фитомассы (NDVI) растительного покрова в САР. Максимальная концентрация площади древесно-кустарниковой растительности и травянистого покрова (фитомасса) приходится на участки вдоль западной границы Сирии: на побережье Средиземного моря, в предгорье и горах Латакии и Тартус, вдоль побережья реки Евфрат и на участках плодородных земель административного района Хасака.

По данным FAO, общая площадь древесно-кустарниковой растительности в 2010 году составила свыше 500000 га. Наше исследование по спутниковым данным MODIS показало, что за период с 2010 по 2017 год средняя площадь растительного

покрова составила свыше 750 тыс. га. Существенная разница (250 тыс. га) может быть объяснена тем, что данные спутникового наблюдения включают не только площади лесов и кустарниковой растительности, но и данные площадей, покрытых травянистым покровом, включая пастбища, сельскохозяйственные угодья и участки задернения.

Результаты оценки спутниковых изображений MODIS при проведении дистанционного мониторинга территории Сирийской Арабской Республики будут полезны при изучении влияния различных антропогенных и природных факторов на состояние растительного покрова (в особенности при оценке лесных экосистем). Применение данных дистанционного зондирования и геоинформационных технологий на примере оценки площади растительного покрова САР за семнадцатилетний период показало важность использования данной технологии для изучения состояния и динамики лесного покрова. Полученные результаты могут способствовать выработке национальной программы по устойчивому управлению, сохранению и восстановлению лесных насаждений Сирии.

Данные Sentinel-2. По результатам классификации спутникового снимка Sentinel-2 были получены пространственные и количественные характеристики распределения древесно-кустарниковой растительности на территории сирийской провинция Латакия (таблица 2.5).

Было установлено, что большинство лесов в провинции Латакия расположены в горных районах с высоким углом уклона на местности (высокие горы и крутые склоны). Хвойные леса в данном районе представлены в основном высокополнотными насаждениями общей площадью 24 тыс. га. Подлесок таких лесов представлен различными кустарниками и травянистой растительностью, что характерно для лесов с повышенным уровнем пожароопасности.

Таблица 2.5 – Распределение классов лесного покрова в районе провинции Латакия на тематической карте

№	Наименование класса по легенде	Код по легенде	Площадь		
			пиксели	га	%
1	Сосновые насаждения	PВ	2407300	24073	55
2	Дубовые насаждения	Q	443952	4439.52	10
3	Кипарисовые насаждения	CS	28599	248.99	2
4	Смешанные наса	TMO	617640	6176.4	14
5	Древесно-кустарниковая растительность	SMO	845521	8455.21	19
Всего:				43393	100

Дубовые леса расположены на территории 4.5 тыс. га, а смешанные – на 6 тыс. га. Древесно-кустарниковая растительность занимает площадь немногим более 8 тыс. га.

Близость лесов на отдельных участках к сельскохозяйственным угодьям повышает вероятность деградации лесов в результате антропогенной деятельности, включая пожары. Территория Латакии характеризуется полусухим средиземноморским климатом летом и частыми периодами засухи, что приводит к опасности возникновения лесных пожаров и сложности их предотвращения и ликвидации.

Спутниковые данные Sentinel-2 предоставляют новые возможности для проведения долгосрочного мониторинга наземного покрова в целом для всей Сирийской Арабской Республики. Использование данных высокого пространственного разрешения спутника Sentinel-2 в сочетании с ГИС-технологиями позволяет проводить высококачественный мониторинг окружающей среды с целью обнаружения изменений, которые могут помочь при оценке процесса сведения и деградации лесов.

Выводы по главе 2

Средиземноморские леса Сирийской Арабской Республики, подвергшиеся в последнее тысячелетие существенным антропогенным воздействиям, состоят из низкорослых хвойных и лиственных древесных пород. Для сирийских лесных насаждений характерна пространственно-временная разнородность, которая вызвана субтропическим климатом, высоким уровнем биоразнообразия и топографической изменчивостью.

Большинство растительных (лесных) участков Сирии находятся под угрозой опустынивания. Лесные пожары также являются одним из основных природных рисков в данном регионе.

В условиях вооруженного конфликта, который имеет место в последние годы в Сирии, спутниковые изображения среднего и

высокого пространственных разрешений и данные вегетационных индексов могут служить эффективным инструментом для определения состояния и мониторинга пространственного распределения его древесно-кустарниковой растительности.

На основе вновь полученной карты распределения NDVI по территории сирийской провинции Латакия с применением методики бинарного геокодирования в пакете ENVI был выделен тематический слой со значениями выше 0.65, что позволило получить в виде маски векторного слоя полигональные границы класса «лесная растительность».

Оценка точности тематической карты проведена по матрице различий для разработанных 5 тематических классов растительного покрова сирийской Латакии. Для оценки точности также были использованы данные полевых исследований аспиранта Поволжского государственного технологического университета Али Махера Саида.

С 2000 по 2010 год в Сирии наблюдается увеличение общей площади растительного покрова на 24,4 тыс. га (на 3,2 %). Такую динамику класса «растительный покров» можно объяснить увеличением осадков за исследуемый период. Между тем с 2010 по 2017 год наблюдается снижение площади растительного (лесного) покрова в связи с ростом интервалов засушливых периодов, а также резким уменьшением площадей сельскохозяйственных угодий.

Общая точность тематической классификации спутникового снимка Sentinel-2 достигает 0.76, коэффициент Каппа – 0.73. По тематическим картам было установлено, что большинство лесов в провинции Латакия расположены в горных районах с высоким углом уклона на местности (высокие горы и крутые склоны). Хвойные леса в данном районе представлены в основном высокоплотными насаждениями общей площадью 24 тыс. га.

ГЛАВА 3. МЕТОДИКА ОЦЕНКИ СОСТОЯНИЯ ЛЕСОВ ПО СПУТНИКОВЫМ ДАННЫМ НА ПРИМЕРЕ МАРИЙСКОГО ЗАВОЛЖЬЯ

3.1. Цель и задачи исследования

Цель исследования – разработка алгоритма и методики оценки состояния лесных насаждений в условиях изменения климата с применением спутниковых снимков различного пространственного разрешения (MODIS, Landsat, Канопус-В, Ресурс-П, Rapid Eye) на примере Марийского Заволжья.

Для выполнения поставленной цели были решены следующие задачи исследования:

- 1) разработать алгоритм и методику определения фенологических признаков растительности на основе анализа временных рядов спутниковых данных;
- 2) выявить состояние лесных насаждений в Марийском Заволжье по спутниковым снимкам и результатам полевых исследований;
- 3) создать тематические карты площадей лесных насаждений с оценкой их динамики;
- 4) выявить зависимость пространственно-временного распределения лесных насаждений от климатических параметров (температура, влажность, количество осадков и т.п.).

3.2. Объект исследования

Объектом исследования явились лесные насаждения Марийского лесного Заволжья. Аprobация разработанной методики была проведена в Республике Марий Эл.

Исследуемый район расположен в континентальной зоне умеренных широт с умеренно-континентальным климатом, характеризующимся продолжительной и холодной с незначительными оттепелями зимой; поздней, прохладной весной; корот-

ким, жарким летом; прохладной, дождливой и затяжной осенью (Френкель, 2017). Лето в южной части района жаркое: среднемесячная температура июля $+17...+20^{\circ}\text{C}$, зима довольно холодная: средняя температура января от -11° до -16°C . Сравнительно реже, обычно с проходящими циклонами, в район поступает морской воздух, сформировавшийся над Атлантикой, вызывающий дождливую погоду летом; зимой в таких случаях наступает потепление, сопровождающееся иногда оттепелями.

Территория Республики Марий Эл (РМЭ), площадью 22,9 тыс. км², занимает западную часть левобережья – низменное левобережье Волги (рисунок 3.1). Являясь крупным геоморфологическим районом, она тянется широкой полосой вдоль левого берега Волги. Ширина полосы от 20 км на востоке до 50-70 км на западе, и высота её над уровнем моря 70-110 м.

Гидрографическая система РМЭ представлена сетью из 19 бассейнов и 179 рек. Самые крупные из них – Ветлуга, Волга и Сура (Aksenov et al., 2002; Ступишин, 1969). Протяженность территории с севера на юг составляет 150 км, с запада на восток – 275 км. В административном отношении на территории расположены 14 районов. Северная и восточная граница Марий Эл проходит рядом с Кировской областью, на юго-западе – Чувашия, на юго-востоке – Республика Татарстан, на западе – Нижегородская область. Административным центром является город Йошкар-Ола.

В целом климатические условия Марийского Заволжья благоприятны для произрастания лесных древесных и кустарниковых пород. К числу отклонений, которые оказывают неблагоприятное воздействие на рост и развитие лесной растительности, можно отнести часто повторяющиеся оттепели в зимнее время, наличие поздних весенних заморозков, неравномерное выпадение атмосферных осадков в течение вегетационного периода, падение в весенне-летнее время относительной влажно-

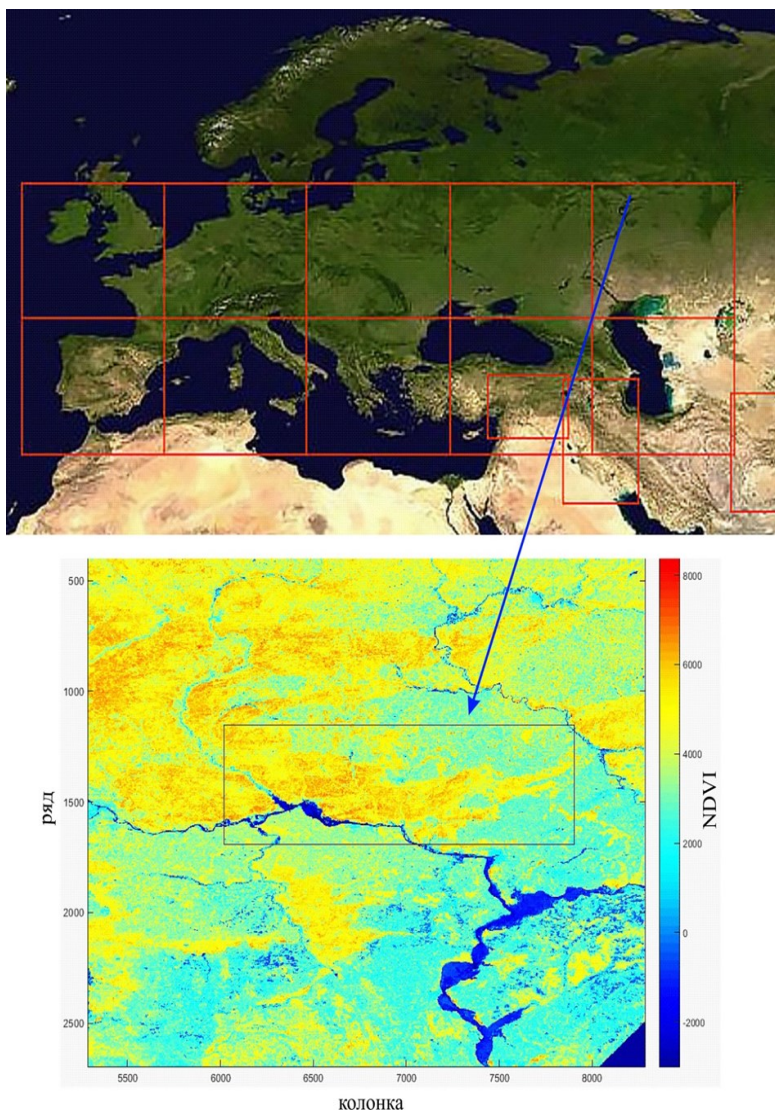


Рисунок 3.1 – Территория исследования Марийского Заволжья на снимке NDVI MODIS

сти воздуха до уровня, вызывающего водный стресс у древесных растений.

Растительный состав лесов Марийского песчаного Заволжья является характерным для бореального пояса Российской Федерации. Для целей тематического картографирования в этом регионе можно выделить до 15 классов растительного покрова, соответствующих международным системам классификации и требованиям к лесной стратификации ГИЛ Рослесхоза.

В восточной части, где по междуречьям сильнее выражен дюнный ландшафт, преобладают сухие и свежие боры, а в западной, более ровной половине низменности, где почвы слабо дренированы, широко распространены кроме свежих боров влажные, сырые и заболоченные.

Территория исследований относится к зоне хвойно-широколиственных лесов европейской части Российской Федерации. Разнообразие ее лесорастительных условий (до 15 типов) характеризуется различными уровнями трофности и влажности. Наиболее представленным среди лесорастительных условий является боровой тип (49,2 % всех лесных территорий) с преобладанием свежих боров (А2). Далее следуют свежие сурамени (С2) и субори (В2).

Рельеф Заволжской песчаной низменности представляет собой равнину, простирающуюся на большой территории. Это обстоятельство позволяет применить единую методику при дешифрировании и тематическом картографировании наземного покрова этой местности по спутниковым снимкам среднего и высокого пространственного разрешения.

К почвообразующим породам исследуемого региона относятся водно-ледниковые мономинеральные пески, обладающие недостатком элементов минерального питания и низкой способностью к удержанию влаги. Зачастую такие почвы чередуются с супесчано-суглинистыми отложениями. Невысокая энергия эро-

зионных процессов, с одной стороны, и слабая дренированность территории, с другой, обусловлены небольшой глубиной эрозийного расчленения.

Под воздействием лесных пожаров, отчасти сплошных рубок, на месте сосняков на значительных площадях возникли березовые леса, а на месте суборей – березовые и осиновые леса. В настоящее время большое значение имеет прогноз поведения природной системы при ее эксплуатации, а основой для изучения динамики природных комплексов является знание ландшафтной дифференциации.

Изучение взаимосвязей между ландшафтообразующими компонентами, выявление динамики природных комплексов и оценка их изменений под воздействием антропогенного фактора дают возможность рационально использовать природные ресурсы, повышать экономическую эффективность природопреобразования.

3.3. Полевые исследования

Полевые исследования проведены в летне-осенний период 2014-2017 гг. В основу исследований положена методика закладки тестовых участков методом глазомерно-измерительной таксации.

При выборе мест для закладки тестовых участков проводился детальный анализ таксационных описаний лесничеств и планов лесонасаждений, а также спутниковых снимков среднего и высокого разрешения. Главным критерием при выборе тестовых участков было выявление наиболее представленных участков леса с целью их дальнейшего распознавания на исследуемой территории.

Закладка тестовых участков (см. рисунок 3.1) на исследуемой территории проводилась методом круговых реласкопических площадок (приложение 4 к Лесоустроительной инструкции, 2012) в древостоях основных лесообразующих пород.

Все данные по исследуемым тестовым участкам (площади, породному составу и основным таксационным показателям лесного насаждения) заносились в учётные ведомости с заполнением абриса и привязкой к имеющейся рядом квартальной сети (таблица 3.1).

Таблица 3.1 – Примеры описания тестовых участков в учетной ведомости

тестовый участок №	GPS	Состав	Н, м	D, см	P	категория	подрост	подлесок	ЖНП
6	N: 55°57.597' E: 048°02.924'	5С3Ос2Б	15,5	16	0,8	Лесной массив	Сосна, береза, осина	Крушина ломкая	Папоротник, брусника
7	N: 55°56.549' E: 048°07.352'	7С3Б	13	12	0,8	Лесной массив	Сосна	Можжевельник обыкновенный	Мох, лишайник
8	N: 55°57.637' E: 048°02.031'	9Ос1Б+С	8	12	0,7	Лесной массив	Сосна, береза, осина		Мох, луговик
9	N: 55°59.506' E: 048°00.887'	8С2Б	18	36	0,8	Лесной массив	Сосна, береза	Можжевельник обыкновенный	Брусника, папоротник

Дополнительно, путем глазомерной оценки по состоянию крон деревьев на тестовых участках, проводилось визуальное определение санитарного состояния насаждений (таблица 3.2). Насаждения делились: на 1 – здоровые (без признаков ослабления); 2 – ослабленные; 3 – сильно ослабленные (Приказ «Об утверждении санитарных..., 2005).

При проведении полевых исследований также оценивались такие важные показатели, как:

- антропогенная нарушенность (наличие выгоревших участков, вырубок, подъездных путей);

- степень физического повреждения (повреждение коры, деформация сучьев, деградация и гибель подроста и живого напочвенного покрова).

Таблица 3.2 – Шкала категорий состояния деревьев

Категории состояния деревьев	Внешние признаки деревьев	
	Хвойные	Лиственные
I - здоровые (без признаков ослабления)	крона густая (для данной породы, возраста и условий местопроизрастания); хвоя (листва) зеленая; прирост текущего года нормального размера	
II - ослабленные	крона разреженная; хвоя светло-зеленая; прирост уменьшен, но не более чем наполовину; отдельные ветви засохли	крона разреженная; листва светло-зеленая; прирост уменьшен, но не более чем наполовину; отдельные ветви засохли; единичные водяные побеги
III - сильно ослабленные	крона ажурная; хвоя светло-зеленая, матовая; прирост слабый, менее половины обычного; усыхание ветвей до 2/3 кроны; многолетние плодовые тела трутовых грибов	крона ажурная; листва мелкая, светло-зеленая; прирост слабый, менее половины обычного; усыхание ветвей до 2/3 кроны; обильные водяные побеги; многолетние плодовые тела трутовых грибов

Координаты каждого тестового участка на местности фиксировались с помощью GPS-приёмника GARMIN eTrex с целью их последующей идентификации и привязки на спутниковых снимках. В лабораторных (камеральных) условиях это позволило выявить тестовые участки и наложить их на спутниковые

изображения разного пространственного разрешения и другой вспомогательный картографический материал в программных пакетах ENVI и ArcGIS.

3.4. Методика камеральных исследований

3.4.1. Картографирование лесного покрова по данным Landsat

Начальный этап работы заключался в выделении необходимых для исследования классов лесного покрова (рисунок 3.2). Тематическая карта растительного (лесного) покрова на исследуемую территорию была сформирована методом множественной неуправляемой классификации способом «IsoData» (Iterative Self-Organizing Data Analysis Technique — итеративный самоорганизующийся способ анализа данных) в программном комплексе ENVI-5.2.

Данный метод основан на оценке критериев близости точек в пространстве признаков (Kim et al., 2014; Елсаков и др., 2009). Установлены параметры классификации: число классов — от 20 до 25, максимальное число итераций — 25, минимальный размер класса — 3 пикселя. В ходе исследования проводилась обработка пяти спутниковых сцен, которые покрывали исследуемую территорию. Среднее число пикселей одной сцены составляло около 3,145 миллионов.

Классификация осуществлялась в несколько этапов в соответствии с иерархичностью построения легенды лесного растительного покрова. В первый раз спутниковый снимок Landsat классифицировался на 25 классов. Они были последовательно сгруппированы в классы: хвойные, лиственные и смешанные леса. В случае, когда некоторые объекты было невозможно отнести к определенному классу, на них создавалась отдельная векторная маска, для которой проводилась дополнительная классификация спутникового снимка на 15 классов. Далее рабо-

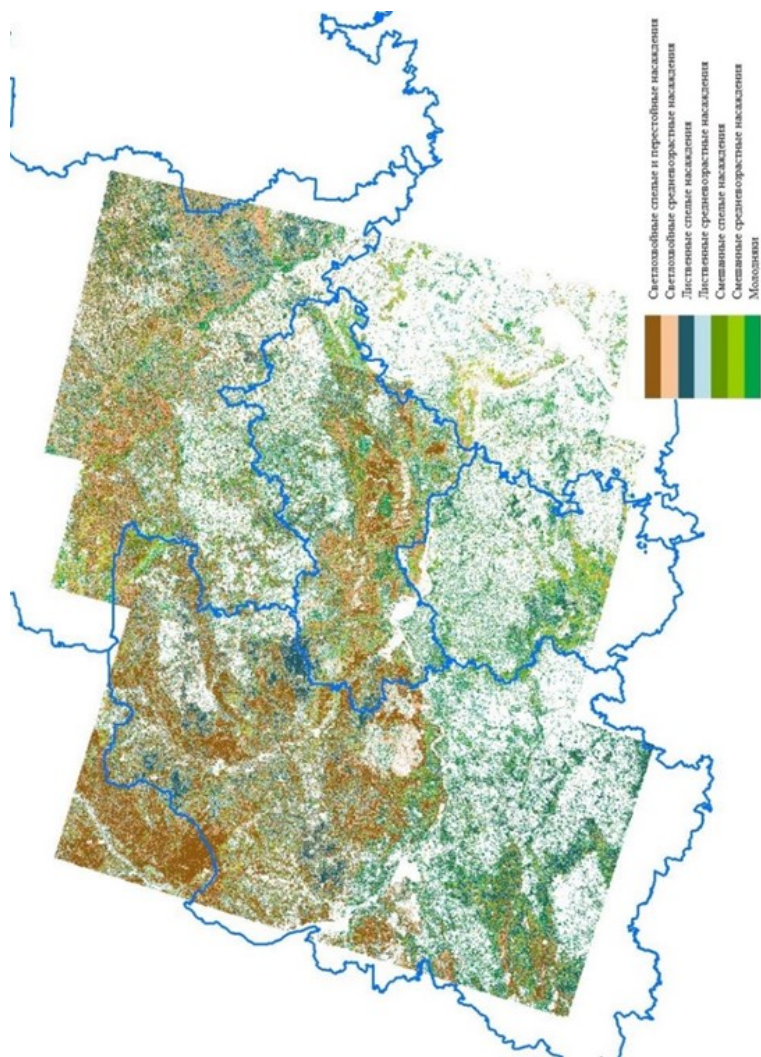


Рисунок 3.2 – Основные классы лесного покрова на тематической карте ЦУ/ДМЛ 2014 г. на территорию исследования

та продолжалась с каждым классом отдельно с разделением на возрастные категории.

При картировании лесного покрова за 2011 год была проведена дополнительная классификация с использованием Нормализованного индекса гарей (Normalized Burned Index, NBR) некоторых участков в связи с пожарами 2010 на исследуемой территории (Воробьев и др., 2012). Индекс NBR был рассчитан как отношение разности значений спектральных каналов ближнего инфракрасного и коротковолнового каналов к их сумме. Итоговые карты представляли собой мозаику всех созданных масок.

Для работы из тематической карты Landsat 2014 были исключены такие классы, как сельскохозяйственные земли, населенные пункты, водные объекты, облака и тени от них. В конечном итоге в исследовании были использованы классы наземного (лесного) покрова, представленные в таблице 3.3.

Таблица 3.3 – Тематические классы, рассматриваемые в исследовании

Код класса LCCS	Наименование класса	Описание класса
TNEC_MaO	Хвойные спелые насаждения	Класс возраста 6 и старше; класс бонитета I, II
TNEC_M	Хвойные средневозрастные насаждения	Класс возраста 3-4; класс бонитета I, II
TBDC_MaO	Лиственные спелые насаждения	Класс возраста 6 и старше; класс бонитета I-III
TBDC_M	Лиственные средневозрастные насаждения	Класс возраста 3-4; класс бонитета I-IV
TMC_MaO	Смешанные спелые насаждения	Класс возраста 6 и старше; класс бонитета II-III
TMC_M	Смешанные средневозрастные насаждения	Класс возраста 3-4; класс бонитета II-IV
TNBC_Y	Молодняки	Класс возраста 1-2; класс бонитета I-IV

Далее при помощи инструмента Create Fishnet (Построить сетку) в программном комплексе ArcGIS – 10.3 была сформирована регулярная сеть на территорию исследования с шагом ячейки – три километра (рисунок 3.3), которая в дальнейшем накладывалась на спутниковые изображения. Для дальнейшего анализа были использованы точки, попадающие только на лесные классы.

3.4.2. Оценка состояния лесного покрова на основе средних показателей растительности по данным MODIS

Главной задачей данного этапа работы была оценка возможности применения различных вегетационных индексов, полученных со спутниковых изображений, при исследовании фенологических характеристик лесных насаждений и ответных реакций вегетационных индексов на различных видах лесного покрова. Разработанный алгоритм работ включал следующие этапы:

- подбор временных рядов вегетационных индексов MODIS и их предварительная подготовка;
- получение значений спектральных индексов (NDVI и EVI, SAVI) для дальнейшей оценки состояния лесного покрова.

Подбор спутниковых снимков умеренного разрешения MERIS, MODIS на территорию исследования

Атмосферная коррекция спутниковых снимков была выполнена в модуле FLAASH в программном пакете ENVI. Спутниковые снимки были привязаны к системе координат WGS-84, которая позволила нанести на изображение местоположения тестовых участков.

В работе были использованы снимки низкого пространственного разрешения спектрорадиометра MODIS (USGS-EROS, <http://LPDAAC.usgs.gov>). Радиометр MODIS позволяет выполнять ежедневный мониторинг территорий, периодичность

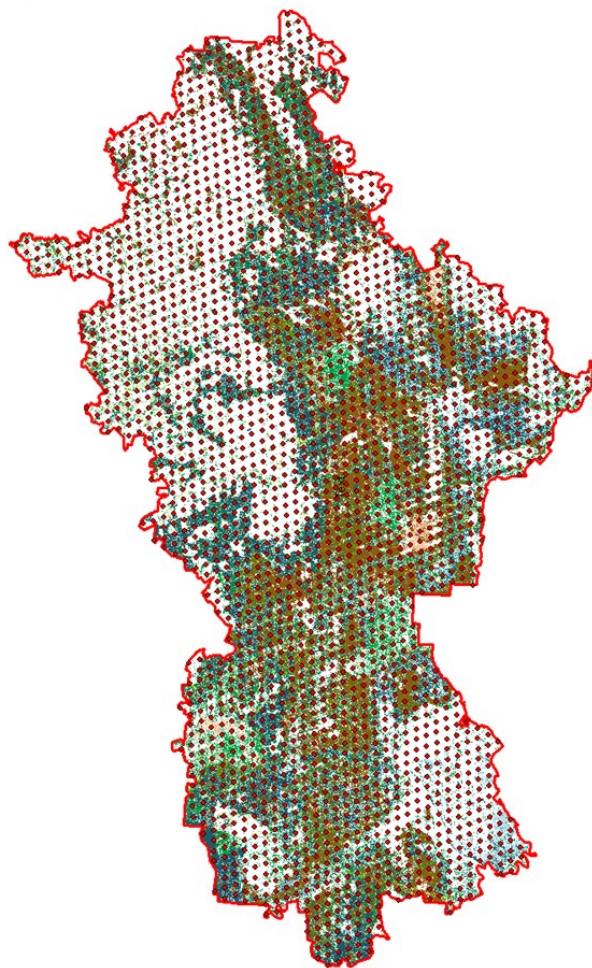


Рисунок 3.3 – Регулярная сеть на тематической карте Landsat 2014 г.

наблюдения которых связана с размерами исследуемых районов и их географическим положением. Анализ сезонных значений вегетационных индексов NDVI и EVI происходил на основе модуля MOD13Q1, включающего в себя 11 спектральных каналов и позволяющего получать композитные значения спектральных индексов изучаемой поверхности, усредненные за 16 дней (рисунок 3.4). MOD13Q1, имея географическую привязку, представляет собой минимальный уровень комбинирования ежедневных данных с пространственным разрешением 250 м.

Нормализованный относительный индекс растительности NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) определяется по классической формуле

$$NDVI = \frac{NIR - RED}{NIR + RED},$$

где NIR – отражение в ближней инфракрасной области спектра; RED – отражение в красной области спектра.

Индекс нового поколения EVI (рисунок 3.5) разработан на основе NDVI (Enhanced Vegetation Index – улучшенный вегетационный индекс):

$$EVI = (R_{nir} - R_{red}) \times (1+L) / (R_{nir} + C_1 R_{red} - C_2 R_{blue} + L),$$

где R_{nir} , R_{red} , R_{blue} – скорректированные (атмосферная коррекция) значения отражательной способности объектов наземного покрова в ближней инфракрасной, красной и голубой зонах спектра (0.841–0.876, 0.620–0.670, 0.459–0.479 мкм); L – поправочный коэффициент, учитывающий влияние почвы; C_1 , C_2 – коэффициенты, контролирующие вклад голубой спектральной зоны в коррекцию красной за рассеяние атмосферными аэрозолями.

В работе также был применен почвенный вегетационный индекс (ВИ):

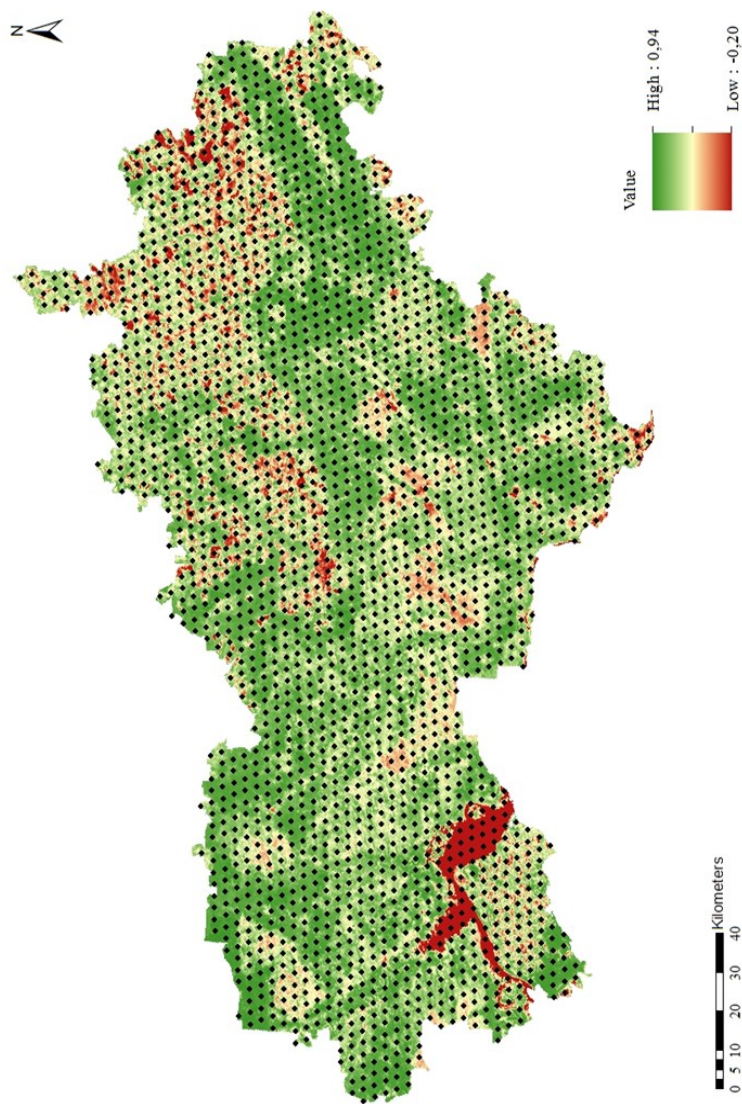


Рисунок 3.4 – Тематический растровый слой NDVI 2014 г. MODIS с регулярной сетью

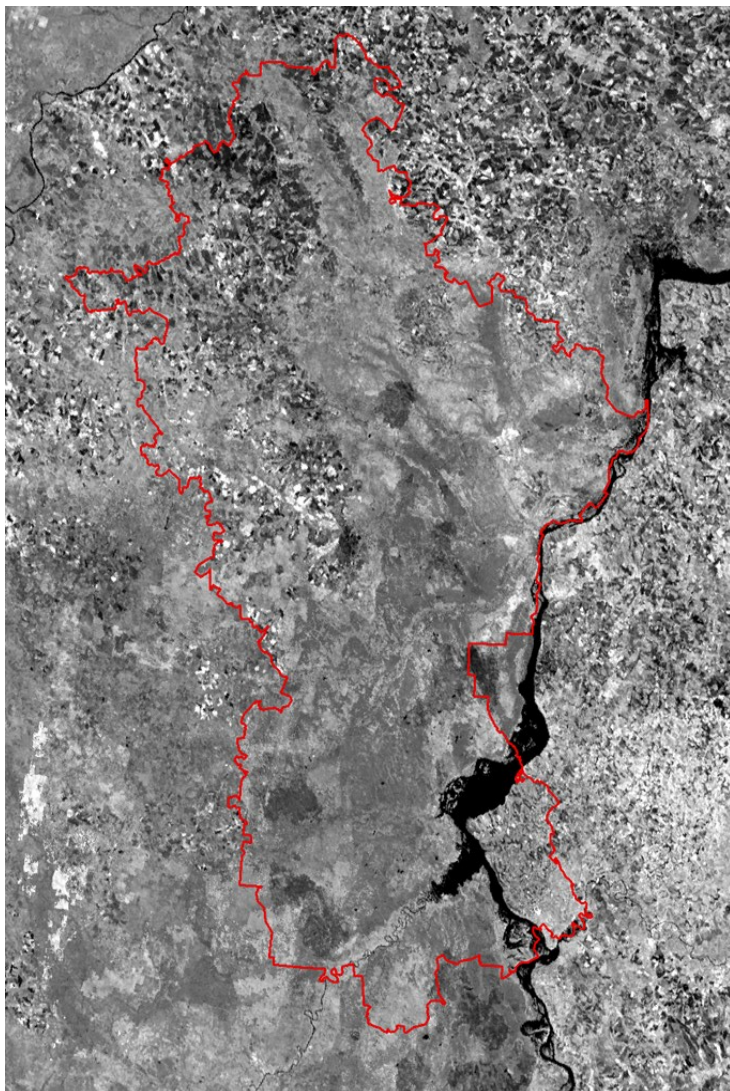


Рисунок 3.5 – 16-дневный композит вегетационного индекса EVI с нанесенной границей Республики Марий Эл

$$SAVI = \frac{R_{Nir} - R_{Red}}{R_{Nir} + R_{Red} + L} \times (1 + L),$$

где L – значение покрытия зеленой растительности. Значение L варьируется в зависимости от величины зеленого растительного покрытия. Обычно в областях без зеленого растительного покрытия $L=1$; в областях с умеренным зеленым растительным покрытием $L= 0,5$; а в областях с очень густым растительным покрытием $L= 0$.

Для временных рядов вегетационного индекса NDVI использовались 16-дневные композиты MODIS (MOD13Q1) с пространственным разрешением 250 м в синусоидальной проекции, что позволяет избежать атмосферного влияния на качество изображения и фенологических изменений в растительном покрове (USGS-EROS, <http://LPDAAC.usgs.gov>).

В работе использовался набор из 32524 временных рядов показателей NDVI MODIS за 2000-2017 годы (рисунок 3.6), полученный на территорию исследования с 10 апреля по 15 ноября, что позволяет исключить влияние таких факторов, как снеговой покров и участки местности, не покрытые растительностью.

3.4.3. Алгоритм анализа вегетационных индексов

В исследовании был разработан алгоритм анализа вегетационных индексов (ВИ) в специализированной программе TIMESAT-3.3, предназначенной для обработки временных рядов спутниковых снимков и определения фенологических показателей на основе этих данных (Jonsson, Ekludh, 2004). TIMESAT широко используется для сглаживания «шумов» и восстановления данных для временных рядов спутниковых данных с помощью математических функций с последующим извлечением значений ключевых фенологических индексов

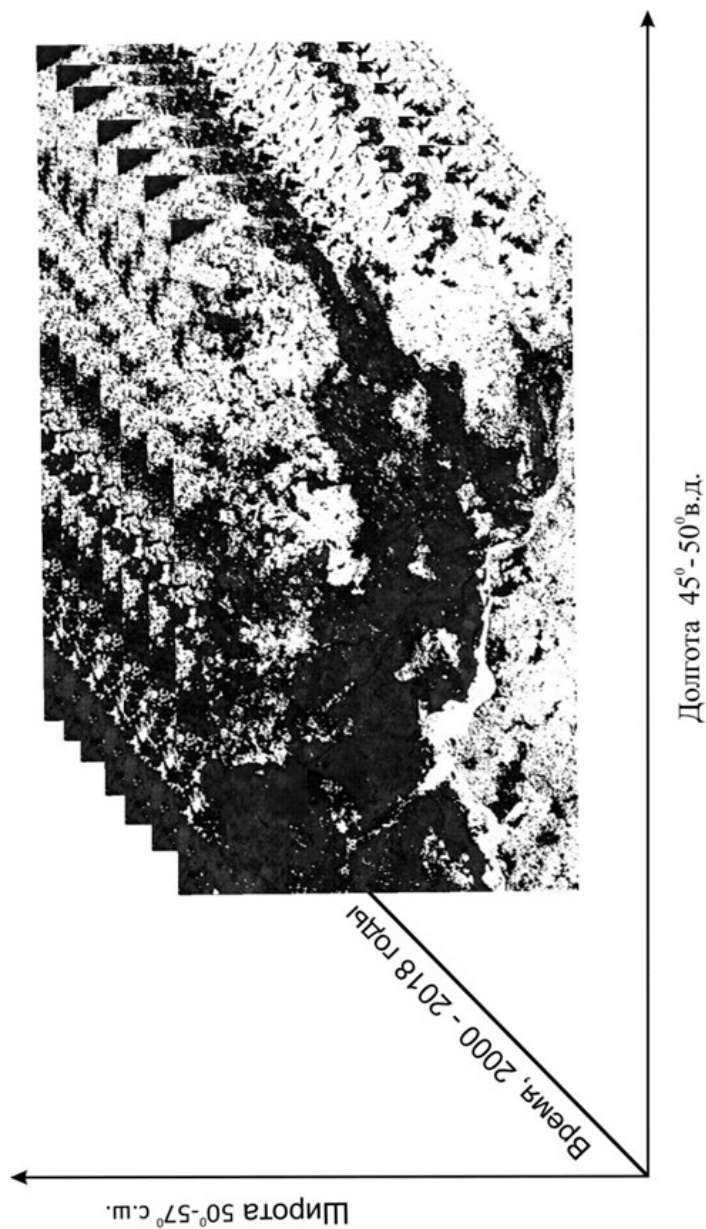


Рисунок 3.6 – Временной ряд изображений вегетационного индекса NDVI радиометра MODIS на территорию Марийского лесного Заволжья за период с 2000 по 2017 г.

(метрик) показателей. Эта программа позволяет получать и анализировать фенологические характеристики по спутниковым данным: начало и конец вегетационного периода, минимальное и максимальное значения ВИ, время наступления его максимума и значение интеграла под кривой его динамики, углы наклона на восходящем и нисходящем ее отрезках, сезонная амплитуда (таблица 3.3, рисунок 3.7).

Таблица 3.3 – Характеристика сезонных параметров, используемых в программе TIMESAT

Показатели	Описание
Начало вегетационного периода (SOS - Time for the start of the season)	Время, на которое левый край на кривой увеличился до установленного пользователем уровня (обычно от определенной части сезонной амплитуды), полученное от левого минимального уровня.
Конец вегетационного периода (EOS - time for the end of the season)	Время, на которое правый край на кривой уменьшился до уровня, установленного пользователем, измеренное от правого минимального уровня.
Продолжительность вегетационного периода (LOS - Length of season)	Время от начала до конца вегетационного сезона.
Базовый уровень (BL - Base level)	Среднее значение от минимальных левого и правого значений.
Середина вегетационного сезона (TMS - Time of mid-season)	Определяется как среднее значение времени, на которое левый край кривой увеличился до уровня 80%, а правый край снизился до уровня 80%.

Показатели	Описание
Максимальное значение данных для выбранной функции в течение сезона (MV - Maximum VI)	Может иметь место в разное время по сравнению с TMS
Амплитуда вегетационного периода (SA - Seasonal amplitude)	Разница между максимальным значением и базовым уровнем.
Степень (скорость) роста в начале сезона (RI – rate of increase)	Рассчитывается как соотношение разницы между левыми 20% и 80% уровнями на кривой и соответствующей разницей во времени.
Степень (скорость) снижения в конце сезона (RD – Rate of decrease)	Рассчитывается как абсолютное значение отношения разницы между правыми 20% и 80% уровнями на кривой и соответствующей разностью во времени. Таким образом, скорость снижения дается как положительная величина.
Большой сезонный интеграл (LInt - large integral)	Интеграл от функции, описывающей сезон от его начала и до конца. Не имеет значения, когда выравненная функция имеет отрицательные величины.
Малый сезонный интеграл (SInt - Small integral)	Интеграл от разности между функцией, описывающей сезон, и базовым уровнем от начала и до конца сезона.

Используемая в исследовании программа TIMESAT также может быть интегрирована в математический пакет MATLAB, представляющий собой пакет прикладных программ, высокоуровневый язык и интерактивную среду для программирова-

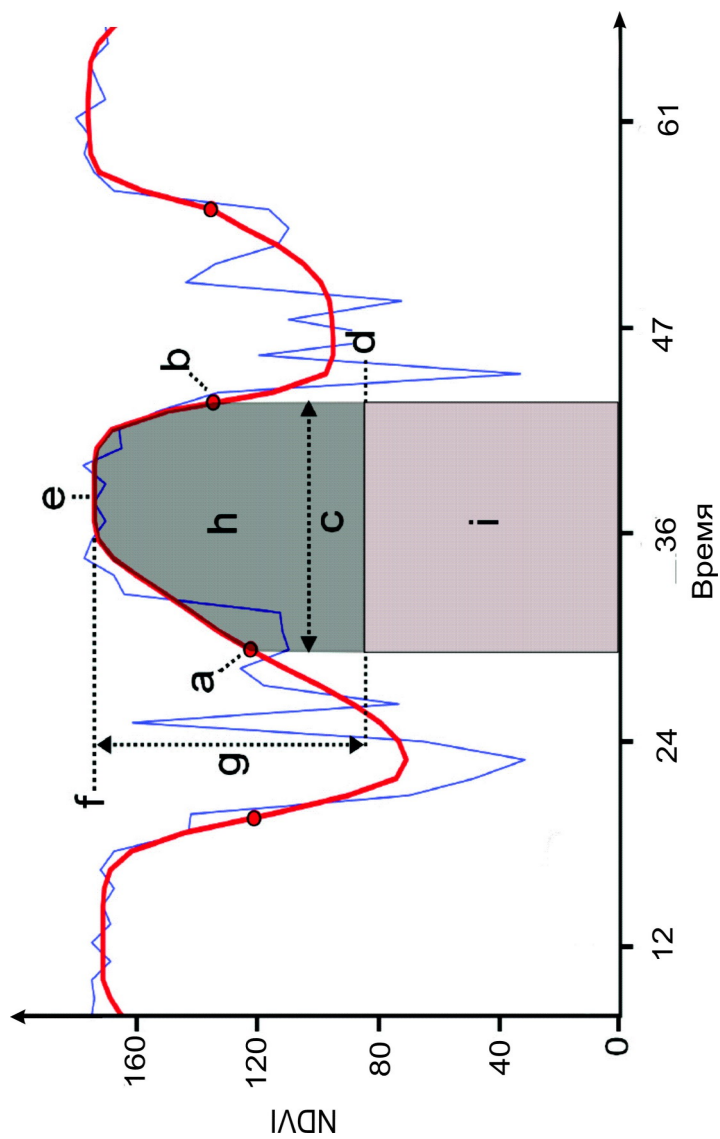


Рисунок 3.7 – Сезонные показатели, получаемые в программе TIMESAT: а – начало сезона (вегетационного периода), б – конец сезона (вегетационного периода), е – время середины сезона, f – максимальное значение, g – амплитуда, h – малое интегрированное значение, (h+i) – большое интегрированное значение (адаптировано Eklundh, Jönsson, 2011)

ния, численных расчетов и визуализацию результатов. Это позволяет анализировать большие массивы статистических данных, разрабатывать алгоритмы, создавать модели и приложения (рисунок 3.8).

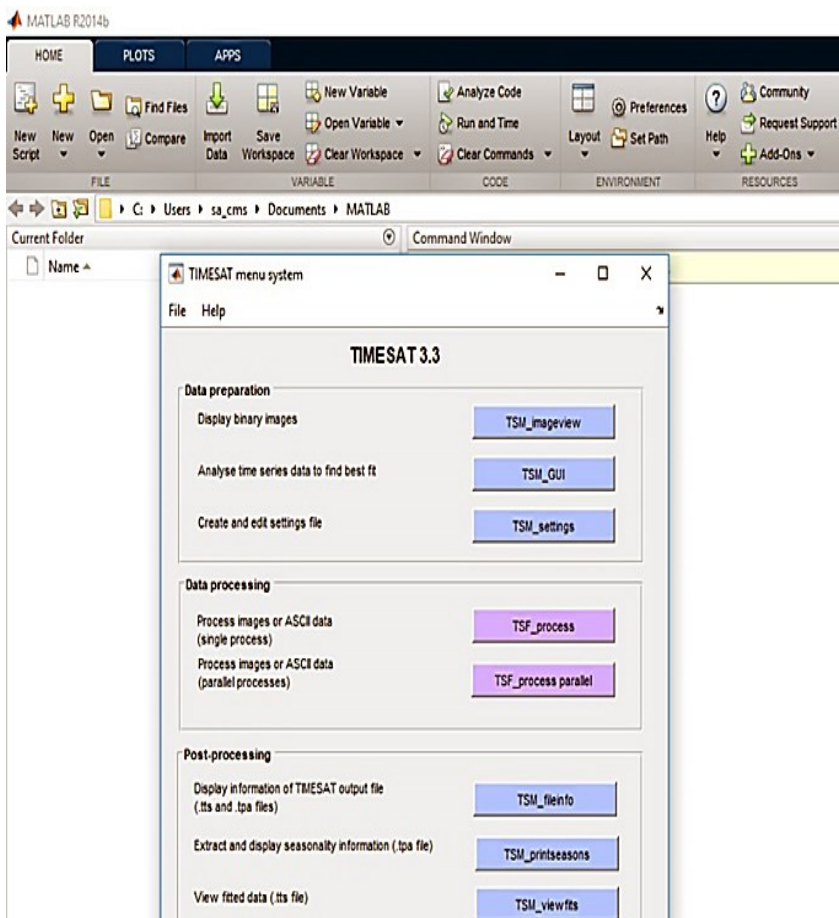


Рисунок 3.8 – Программный интерфейс TIMESET 3.3 в программе MatLab

Для оценки временных рядов вегетационных индексов были использованы шесть из одиннадцати сезонных показателей программы TIMESAT-3.3, которые позволяют проанализировать пространственно-временную динамику растительного (лесного) покрова в зависимости от изменения климата или землепользования (см. таблицу 3.3). Три показателя характеризуют продуктивность насаждений в течение вегетационного периода: «Амплитуда вегетационного сезона», «Максимальное значение данных для выбранной функции в течение сезона» и «Большой сезонный интеграл».

Другие три важных показателя программы TIMESAT-3.3 имеют непосредственное отношение к фенологическим фазам развития растительного (лесного) покрова: «Начало вегетационного периода», «Конец вегетационного периода» и «Продолжительность вегетационного периода» (Eklundh, Jöns-son, 2011).

Наиболее часто при исследовании временных рядов применяют пороговый метод, который позволяет определить начало вегетационного сезона (SOS) и его конец (EOS) на основе пороговых значений вегетационных индексов. При этом SOS определяется как день в году (DOY – Day of the year), когда ВИ пересекает заданный порог значений в восходящем тренде. Аналогично EOS определяется как DOY, когда ВИ пересекает тот же порог в нисходящем направлении (de Beurs, Henebry, 2010; Kuenzer et al., 2015). В программе TIMESAT начало вегетационного сезона по умолчанию определяется по нулевому значению NDVIratio (соотношение минимальных и максимальных значений NDVI в году) (Миклашевич, Барталев, 2016). Тем не менее, пользователь программы может задавать это значение самостоятельно.

Исследования временных рядов для региона северных широт, где наблюдается устойчивый снежный покров, показывают,

что порог роста в 20 % был относительно приемлемым для определения начала и конца вегетационного периода (Wang et al., 2015). В нашей работе мы тоже придерживаемся этого подхода при получении сезонных показателей.

Для анализа и визуализации пространственной изменчивости фенологических показателей, полученных по данным NDVI, были выбраны следующие индикаторы: начало и конец вегетационного периода, продолжительность (длина) сезона, размер интервала, а также максимальные значения параметра и стандартные отклонения, которые были выделены для каждого пикселя изображения спектрорадиометра MODIS.

Процедура группировки и анализа серии разновременных данных включала следующие этапы:

1. Преобразование исходных данных набора данных MODIS из формата HDR (High dynamic range - высокий динамический диапазон) в BIN (бинарный).
2. Компиляция полученных бинарных данных в единый файл формата TXT – Timesat_2.txt.
3. Визуализация пространственного распределения фенологических показателей ВИ с целью определения границ территории исследования.
4. Обработка данных Timesat_2.txt в подмодуле GUI (Versatile graphical user interface), представляющем из себя универсальный графический интерфейс пользователя модуля TIMESAT.
5. Визуализация пространственной изменчивости фенологических показателей ВИ за период с 2000 по 2017 год.

Общий алгоритм для решения поставленных задач представлен на рисунке 3.9.

Серия разновременных рядов NDVI по данным MOD13Q была обработана с использованием модуля TIMESAT TSF (Temporal Spatial Filter – временной пространственный фильтр)



Рисунок 3.9 – Алгоритм оценки временных рядов по данным MODIS

для извлечения изображений. Полученные данные прошли дополнительную обработку по сглаживанию временного ряда NDVI методом фильтрации от случайной составляющей временного ряда.

Общая аппроксимация рядов NDVI выполнялась с использованием фильтра Савицкого-Голея (Savitzky, Golay, 1964) в пакете TIMESAT, который часто применяется для снижения (сглаживания) уровня шумов, представленных в виде влияния аэрозольных загрязнений, дымки или погрешностей аппаратуры (Никонов и др., 2016). Для этого применяется полиномиальное уравнение второго порядка с шириной скользящего окна равного количеству композитов в году. Полином второй степени обеспечивает достаточно хорошую локальную аппроксимацию фенологической (сезонной) динамики значений спектрально-отражательных характеристик растительности (Барталев и др., 2016; Содномов и др., 2018). Сезонные данные были получены по сглаженным кривым в программе TIMESAT, на основе которых сформирован файл в формате «tra». Далее вновь полученные данные обрабатывались и анализировались в модуле TIMESAT_TFSfit2img.

Графическое представление извлеченных ключевых фенологических показателей, прошедших процедуру сглаживания с помощью математических функций значений временных рядов зашумленных спутниковых данных с использованием программы TIMESAT, отражено на рисунке 3.10.

Итоговые сезонные данные за 18 исследуемых лет включали 13 фенологических индексов, полученных после обработки и анализа каждого пикселя изображений NDVI на территорию исследования. Каждое индивидуальное изображение имело общее количество столбцов – 1817 и количество строк, равное 462, и в итоге включало более 800 000 значений по каждому оцениваемому параметру (индексу).

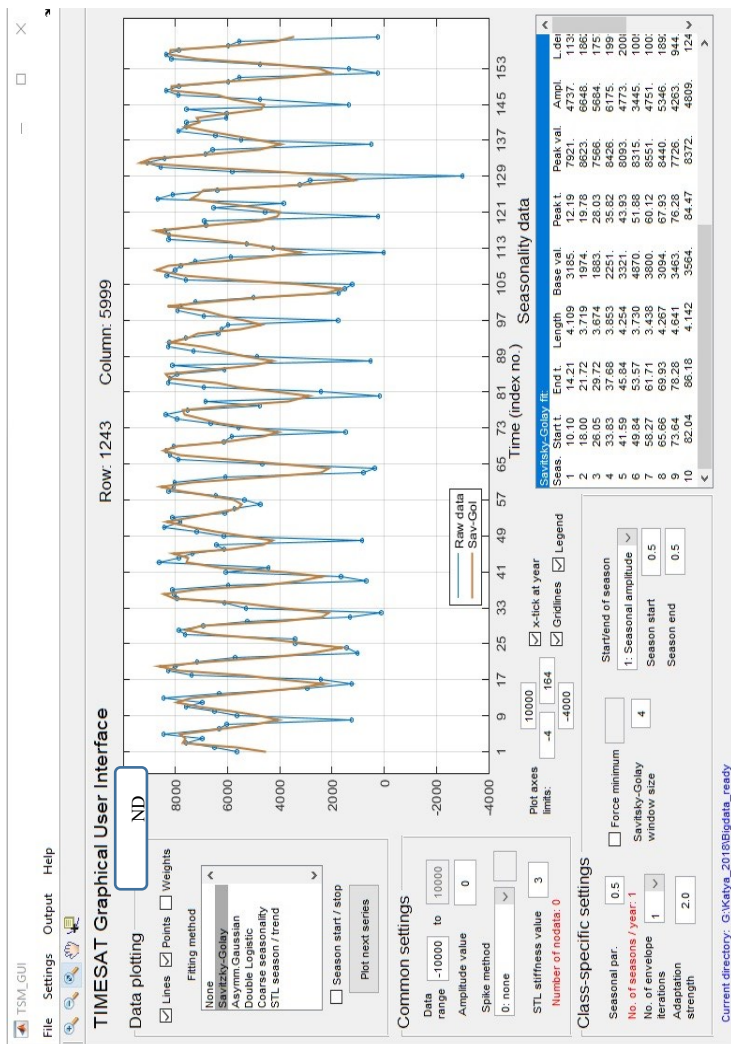


Рисунок 3.10 – Динамика ежегодных трендов максимумов NDVI по РМЭ за 2000-2018 гг. по данным одного пикселя изображения MODIS. Линия синего цвета представляет собой оригинальные данные NDVI. График линии коричневого цвета – выравненные значения с использованием функции Савицкого-Голея.

3.4.4. Климатические показатели и распределение классов наземного покрова

Оценка пространственно-временных взаимосвязей природных и антропогенных факторов успешно решается с применением средств анализа и моделирования окружающей среды в комплексных программных пакетах ГИС (НАО et al., 2015).

Для получения и оценки значений изучаемых показателей (максимальная температура подстилающей поверхности, атмосферные осадки, структура древостоя) была использована уже сформированная ранее регулярная сеть на территорию исследования с шагом ячейки – три километра (рисунок 3.11), которая

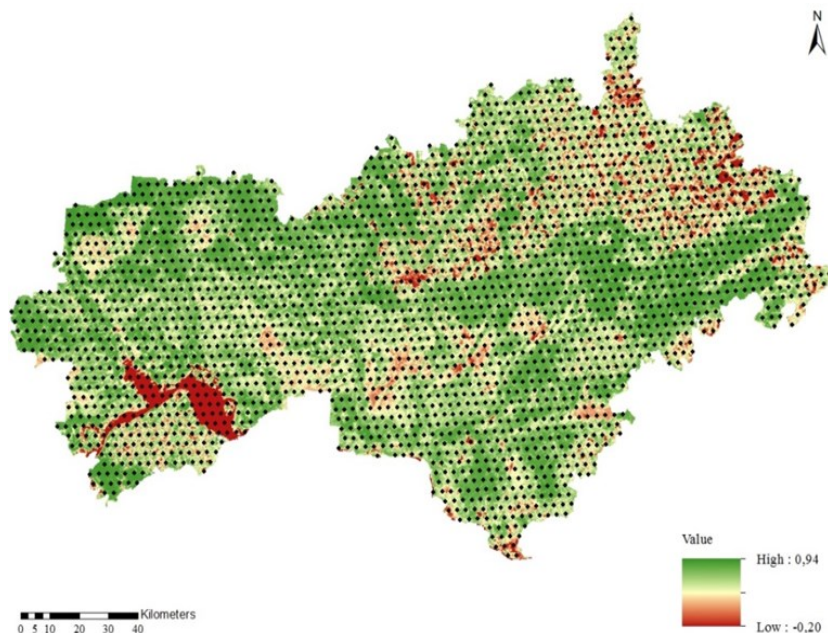


Рисунок 3.11 – Регулярная сеть на тематическом растровом слое NDVI 2014 г. MODIS

накладывалась на спутниковые изображения. Для всех классов лесного покрова определялись значения температуры подстилающей поверхности (LST – Land Surface Temperature), количество атмосферных осадков (P_R) в каждом точечном узле регулярной сети, попадающем в данный тематический класс наземного покрова за период 2000-2017 гг.

В ходе исследования все оцениваемые показатели определялись по данным значений, снятых с узлов (1537 точек) этой сети в пакете ArcGIS (рисунок 3.12). Для перевода значений температуры подстилающей поверхности в градусы Цельсия соответствующее значение пикселя исходного спутникового изображения умножалось на коэффициент 0,02 и из полученного значения вычиталось $272,15^{\circ}\text{C}$ (1K) (Sun, Kafatos, 2007).

Анализ пространственно-временного распределения растительного (лесного) покрова проводился по данным готовых тематических карт на основе снимков Landsat 2001 и 2014 гг., полученных Центром устойчивого управления и дистанционного мониторинга лесов ФГБОУ ВО «Поволжский государственный технологический университет (Губаев и др., 2012; Курбанов и др., 2015) (рисунок 3.13).

Каждому классу наземного покрова этой тематической карты был присвоен индекс от 1 до 9, позволивший оценить связь их пространственных вариаций с изучаемыми вегетационными индексами.

Таким образом, по данным точечной регулярной сети были получены фактические значения следующих показателей: температуры подстилающей поверхности (LST) в виде максимальных ($T_{\max}$) за вегетационный период; количество атмосферных осадков (P_R); пространственное распределение классов наземного покрова по тематическим картам 2001 и 2014 гг. и значения вегетационных индексов на территорию Марийского Заволжья за период с 2000 по 2017 год.

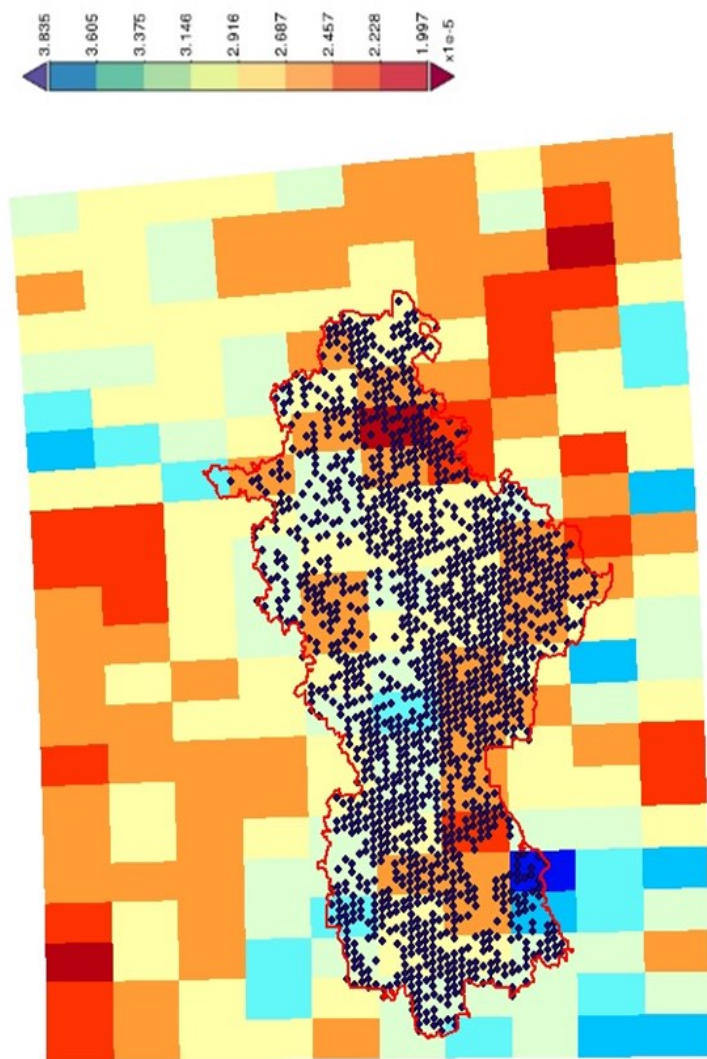


Рисунок 3.12 – Дифференциация территории РМЭ по количеству осадков ($\text{кг}\cdot\text{м}^{-2}$) за вегетационный период 2014 г. (май-сентябрь) по регулярной сети, наложенной на тематический растровый слой

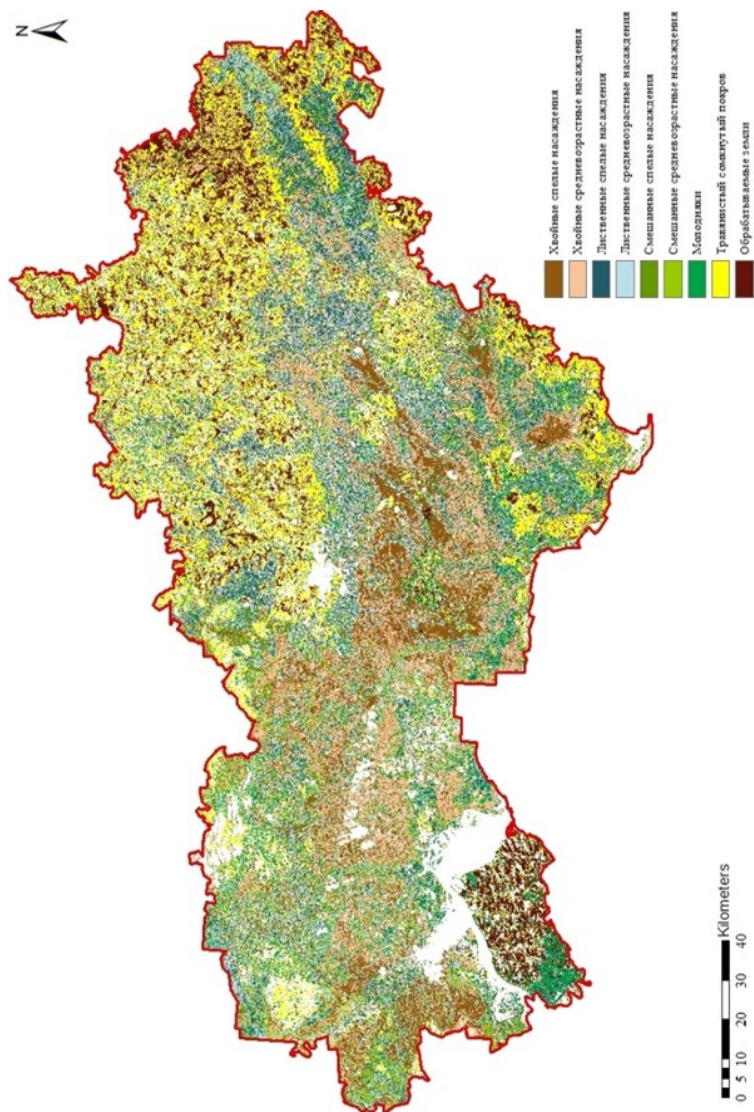


Рисунок 3.13 – Основные классы лесного покрова на тематической карте ЦУДМЛ 2014 г.

Для оценки пространственно-временного влияния климатических факторов и горизонтальной структуры состава растительного (лесного) полога на фенологические показатели был проведен комплексный анализ путем наложения тематических карт максимальных и минимальных значений вегетационного индекса NDVI, полученных методом анализа «горячих точек» (Hot Spot Analysis) за изучаемый период, на интерполированные карты среднеквадратических отклонений регрессионных уравнений.

Интерполированные карты были получены методом «кригинг», когда каждое значение рассчитываемой функции вычисляется как линейная комбинация от известных (исходных) точек (значений). Сами весовые коэффициенты вычисляются с помощью системы линейных уравнений кригинга (ArcMap 10.3. desktop.arcgis.com).

3.5. Результаты исследования

Результаты проведенного анализа показывают, что максимальные значения вегетационного индекса NDVI (0,81) наблюдаются для тематического класса TBDC_МаО, представленного лиственными спелыми насаждениями. Минимальные средне-многолетние значения NDVI (0,72) также соответствуют классу TNBC_Y (молодняки), что иллюстрирует рисунок 3.14. Общая динамика изучаемого вегетационного индекса за 2000 - 2017 гг. имеет неоднородный характер.

Большинство минимальных значений NDVI сосредоточено в северной части Марийского Заволжья, представленной в основном землями сельскохозяйственных угодий, а также участками с травянистой растительностью. Минимальные значения NDVI встречаются и в смешанных насаждениях практически на всей территории исследования, что отображено на рисунке 3.15.



Рисунок 3.14 – График распределения среднемноголетних значений NDVI и LST по классам лесного покрова

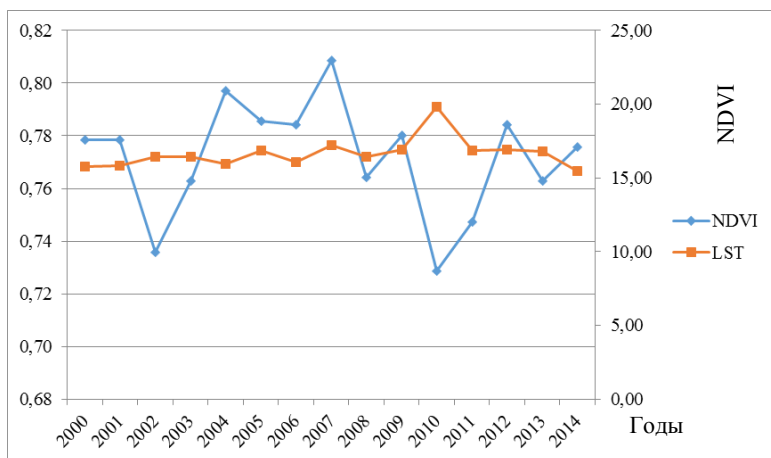


Рисунок 3.15 – Динамика распределения среднемноголетних значений NDVI и LST по годам

Высокие значения NDVI также представлены в центральной части Марийского Заволжья, где произрастают хвойные и лиственные насаждения.

За период с 2000 по 2009 год общая динамика NDVI (фитомассы) на территории исследования имеет неоднородный характер. Часть минимальных значений NDVI и соответствующих значений интерполированных стандартных отклонений наблюдается в северо-восточной части РМЭ, покрытой в основном землями сельскохозяйственных угодий и участками, зарастающими многолетними травами.

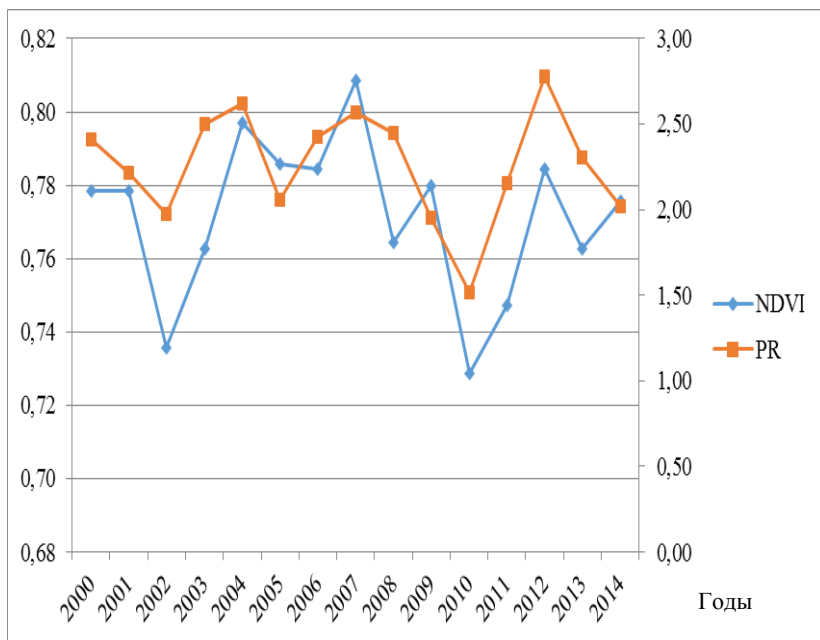


Рисунок 3.16 – Динамика распределения среднееголетних значений NDVI и Pr

По результатам графического анализа и по данным интерполяции распределения NDVI на территории исследования можно сделать вывод о том, что непосредственное влияние на динамику фитомассы растительности РМЭ оказывает количество осадков (рисунок 3.16). Отсутствие прямой корреляционной связи NDVI с показателем осадки, несмотря на их визуальную синхронность, можно объяснить сложностью пространственных взаимосвязей (автокорреляцией), которые значительно отличаются от классических методов оценки статистических данных. Кроме того, на полученных рисунках наблюдается некоторая асинхронность в динамике этих показателей, вызванная запаздыванием отклика растительного покрова на влияние осадков, что также отмечается и другими исследователями (Scheller, Mladenoff, 2005; He et al., 2005).

Минимальные значения NDVI встречаются и на лесных территориях с преобладанием лиственных и смешанных пород, а также хвойных средневозрастных насаждений. Максимум накопления фитомассы (NDVI) за исследуемые 15 лет выявлен для территории центральной, южной и северо-западной частей Марийского Заволжья, где сосредоточены спелые и перестойные насаждения хвойных и лиственных пород (рисунок 3.17).

Сложность в интерпретации полученных результатов объясняется большой территорией исследования Марийского Заволжья, в пределах которой кластеризация объектов наземного покрова представлена крайне неравномерно, что негативно сказывается на полученных данных. Улучшить результаты исследований можно, применив методы дифференциации большой площади исследования на более мелкие и достаточно однородные пространственные участки. Подтверждение сделанным выводам показано на тематических картах распределения значений средних NDVI, интерполированных методом «кригинг» в пакете ArcGIS (рисунок 3.17).

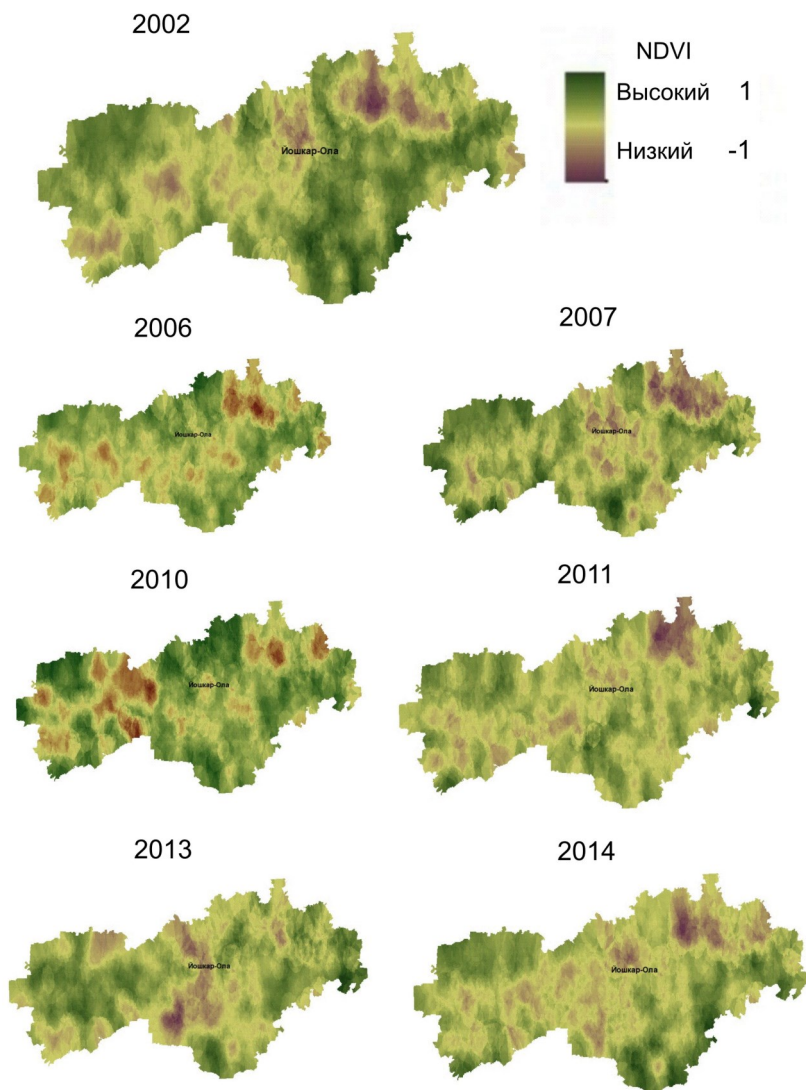


Рисунок 3.17 – Динамика пространственно-временного распределения NDVI по территории Марийского Заволжья

Возможность отслеживания аномалий природных явлений, их пространственные вариации и оценка степени влияния на растительный (лесной) покров по данным дистанционного зондирования представлена в работе на примере засушливого летнего сезона 2010 г. Анализ климатических данных сезона вегетации этого года показал значительные отклонения от стандартного тренда в сторону ухудшения практически всех оцениваемых нормативных показателей. Данный период в Марийском Заволжье (Среднем Поволжье) характеризуется практически полным отсутствием осадков в летний период, в сравнении с предыдущими годами. В 2010 г. среднесезонная температура повысилась почти на треть от среднего показателя за прошлые годы с одновременным увеличением длительности температурных аномалий. Засушливое лето 2010 г. также значительно повлияло на значения NDVI (см. рисунок 3.15). В тот экстремальный по природным условиям год наблюдалось явное снижение фитомассы на всей территории Марийского лесного Заволжья (см. рисунок 3.16).

Особенно эти аномалии наблюдались в районах, где были выявлены максимальные нарушения в древесном пологе в результате сплошных пожаров 2010 г. (Воробьев и др., 2012). Восстановление обычного режима выпадения осадков и температур в последующие годы показывают карты интерполяции с 2011 по 2014 гг., а также графики динамики средних климатических показателей за этот период.

Следует отметить, что анализ трендов климатических параметров за исследуемый период не выявил рост среднегодовых температур или осадков в связи с глобальными климатическими изменениями, как это отмечено в ряде работ зарубежных и отечественных авторов (Варламова, Соловьев, 2012; Zhou et al., 2003). Возможно, что это связано с относительно коротким изучаемым периодом времени.

Данные TIMESAT

Обработка и визуализация данных NDVI спектрорадиометра MODIS в пакете TIMESAT позволили получить средние фенологические показатели для участка лесного покрова на территории Куярского лесничества Республики Марий Эл. Для комплексного анализа в работе используется пространственное распределение всех древесных пород, включая хвойные, лиственные и смешанные древостои. Фенологический период каждого из 18 лет наблюдений рассматривался от середины апреля до середины ноября соответствующего года, что в сумме в среднем составило 210 дней. Выравненные данные NDVI, по которым были получены все фенологические показатели, приведены на рисунке 3.18.

Полученные средние показатели по SOS и EOS показывают относительно устойчивую динамику за исследуемый период (рисунок 3.19а, таблица 3.4). Некоторое смещение дней начала вегетационного сезона наблюдалось в 2001, 2005, 2009, 2015 и 2016 гг., когда SOS достигал более 140 дней от начала календарного года. На эти же годы приходится максимум дней конца вегетации (EOS), превышая 250 дней от начала календарного года. Продолжительность вегетационного сезона на исследуемом участке (LOS) в среднем колеблется от 96 до 154 дней (таблица 3.4). Максимальные периоды LOS приходились на 2001 (138 дней), 2010 (151 день), 2013 (121 день) и 2016 (154 дней) годы соответственно.

Анализ 18-летней динамики NDVI показывает существенное снижение фитомассы древостоя на исследуемом участке после 2010 года, что подтверждает точность выбранной площади, пройденной лесным пожаром (рисунок 3.19б). После этого года на исследуемом участке наблюдается устойчивая динамика накопления фитомассы.

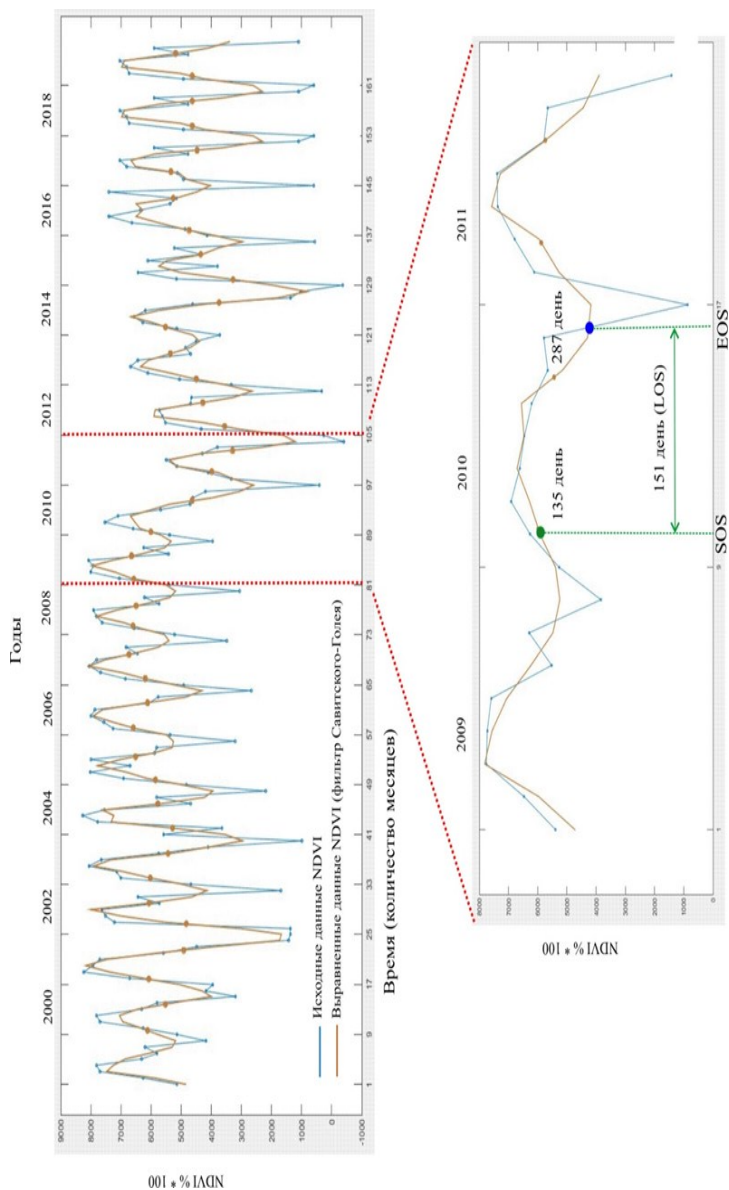
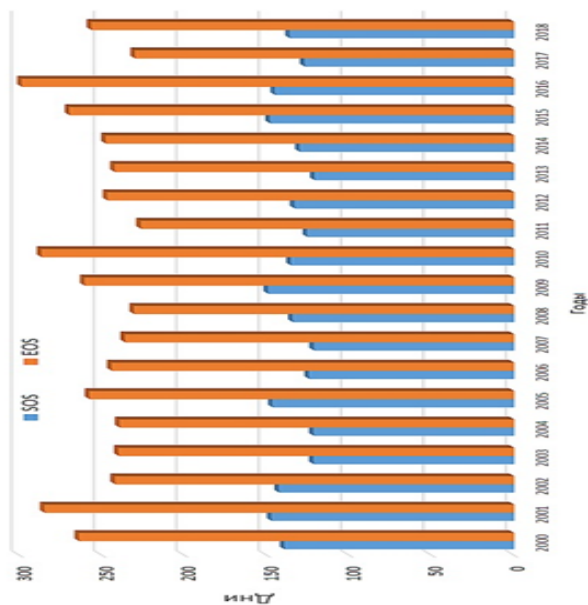


Рисунок 3.18 – Временной ряд NDVI лесного покрова Куярского лесничества за 2000-2018 гг. Первый и последний сегменты дублируются в программе TIMESAT для точности аппроксимации данных. SOS – день начала вегетационного сезона, EOS – день его окончания

a)



б)

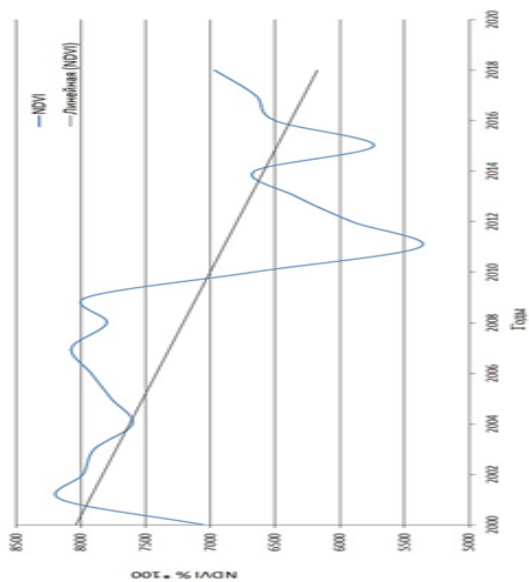


Рисунок 3.19 – Динамика: а) дней начала и конца вегетационного сезона лесного покрова изучаемого пикселя, полученных в программном пакете TIMESAT, б) максимальные значения NDVI

Таблица 3.4 – Фенологические показатели лесного покрова на исследуемый участок по данным MODIS NDVI

Годы	Начало сезона (SOS)	Продолжительность сезона (LOS)	Конец сезона (EOS)	Макс. значение NDVI % * 100	День, на который приходится	Амплитуда (SA)
2000	139	264	125	7051	204	2462
2001	147	285	138	8154	216	5316
2002	143	242	99	7986	199	5072
2003	122	240	118	7898	188	4338
2004	122	239	118	7603	182	4147
2005	147	258	111	7769	209	3168
2006	124	244	120	7923	189	3138
2007	121	236	115	8075	186	3220
2008	134	231	96	7801	185	2506
2009	149	261	111	7959	212	2694
2010	135	287	151	6674	202	2708
2011	126	226	101	5379	175	3477
2012	133	247	114	5907	193	3973
2013	121	242	121	6340	187	2820
2014	130	248	118	6661	187	4060
2015	148	270	122	5738	211	3844
2016	145	299	154	6502	232	3003
2017	127	230	103	6653	178	3491
2018	136	256	120	6970	199	4675

Выводы по главе 3

Разработан и апробирован алгоритм в программе TIMESAT для определения фенологических характеристик лесного покрова и оценки его долговременной динамики на основе анализа временных рядов вегетационного индекса NDVI, полученных со спектрорадиометра MODIS. Необходимым условием применения предложенного алгоритма для описания сезонной динамики лесного покрова является наличие набора входных спутниковых данных по вегетационным индексам за рассматриваемый период времени. Эти результаты демонстрируют потенциал анализа временных рядов NDVI для мониторинга временной динамики растительных поверхностей, предоставляя дополнительную информацию для традиционных классификаций и схем обнаружения изменений.

Восемнадцатилетние временные ряды NDVI, полученные по данным спектрорадиометра MODIS, позволили определить тенденции в сезонных показателях, влияющих на динамику продуктивности лесов Куярского лесничества Марийского Заволжья. Разработанный алгоритм и полученные данные являются важным материалом для оценки влияния происходящих климатических изменений на лесные экосистемы. Данные по сезонным показателям (SOS, EOS, LOS) также представляют собой ключевые индикаторы при исследовании биологической продуктивности лесов и смещении их ареалов произрастания.

Хотя использование NDVI для мониторинга фенологических явлений в смешанных хвойных и лиственных лесах имеет некоторые ограничения, результаты наших исследований показали, что этот ВИ может быть очень полезным инструментом при оценках последствий изменения окружающей среды на рост лесных экосистем. Авторы планируют доработать предложенный алгоритм с целью повышения точности выявления фенологических параметров с учетом типов леса, а также простран-

ственно-временного распределения NDVI на большей территории и в связи с метеорологическими параметрами.

В работе оценивались показатели взаимодействия многолетних значений спектрального вегетационного индекса NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) и сезонных климатических параметров: температуры подстилающей поверхности Земли (LST), максимальных температур за вегетационный период (T_{max}), количество осадков (Pr) и пространственное распределение состава лесного покрова (F_c).

Полученные средние показатели по SOS и EOS показывают относительно устойчивую динамику за исследуемый период. Некоторое смещение дней начала вегетационного сезона наблюдалось в 2001, 2005, 2009, 2015 и 2016 годы, когда SOS достигал более 140 дней от начала календарного года. На эти же годы приходится максимум дней конца вегетации (EOS), превышая 250 дней от начала календарного года.

Общий анализ трендов климатических параметров за исследуемый период не выявил рост среднегодовых температур или осадков в связи с глобальными климатическими изменениями, но позволил оценить аномальные изменения в засушливый период 2010 года.

Разработанная методика оценки влияния климатических факторов и структуры наземного покрова на фенологические показатели лесных насаждений позволяет визуализировать и статистически оценивать эти взаимосвязи. Ее рекомендуется использовать для оценки индикаторов устойчивости насаждений.

ГЛАВА 4. РАСПОЗНАВАНИЕ ЛЕСНЫХ НАСАЖДЕНИЙ ПО ДАННЫМ СПУТНИКА SENTINEL-2 НА ТЕРРИТОРИИ ПЕНЗЕНСКОЙ ОБЛАСТИ

4.1. Цель и задачи исследования

Цель работы – оценить приемлемость использования спутниковых изображений Sentinel-2 для картографирования (дешифрирования) породного состава лесных насаждений на примере двух лесничеств Пензенской области с использованием трех методов управляемой классификации. В ходе исследования также проведена детальная оценка точности результатов тематического картографирования.

4.2. Объекты и методика исследований

Объектами исследования явились лесные насаждения на территории Юрсовского и Ленинского лесничеств Пензенской области (рисунок 4.1), входящих в лесостепной район европейской части Российской Федерации. Территория Пензенской области расположена на древней платформе, чем обусловлена общая равнинность ее территории.

В породной структуре лесов исследуемых лесничеств Пензенской области преобладают мягколиственные древостои, на долю которых приходится 64 % (Юрсовское лесничество) и 48 % (Ленинское лесничество) площади покрытых лесной растительностью земель. Хвойные насаждения занимают соответственно 24 и 13 %, а твердолиственные – 11 и 38 % (Лесной план..., 2008).

Среди лесообразующих и целевых хвойных пород главенствующая роль принадлежит сосне обыкновенной (*Pinus sylvestris*) (98 и 89 %), а среди твердолиственных – дубу низкоствольному (*Quercus robur*) (68 и 87 %). Из мягколиственных пород значительный удельный вес приходится на березу по-

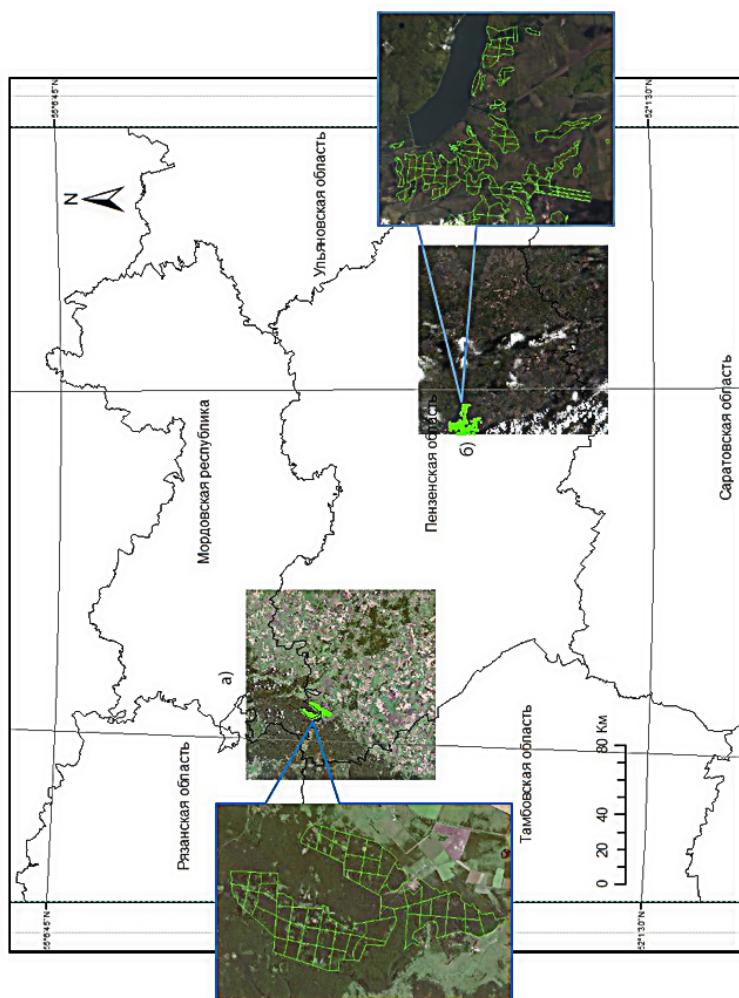


Рисунок 4.1 – Исследуемые объекты на карте Пензенской области: а) Юрсовское и б) Ленинское лесничество

вислую (*Betula pendula*) (69 % в Юрсовском лесничестве) и осину обыкновенную (*Populus tremula*) (58 % в Ленинском лесничестве).

В Пензенской области наблюдается тенденция усыхания дубовых насаждений, что, как и в других областях европейской части Российской Федерации, вызвано в первую очередь рубками наиболее высокопродуктивных насаждений, проводившихся в последние столетия. Формирующиеся после вырубki порослевые дубравы менее производительны и изначально менее устойчивы к неблагоприятным факторам среды, что приводит к их вырождению за 3-4 поколения (Иванов и др., 2012). В связи с этим на значительной площади вырубok происходит смена главной породы дуба на березовые, липовые, осиновые и кленовые древостой.

Картографической основой для составления планшетов масштаба 1:10000 для последней лесной инвентаризации служили планшеты предыдущего лесоустройства, топографические карты масштаба 1:25000 и геодезические данные землеустройства Пензенской области. На территорию исследуемых лесничеств были получены спутниковые снимки Sentinel-2 (таблица 4.1), сделанные в августе-сентябре 2017 г.

Таблица 4.1 – Характеристика используемых изображений MSI Sentinel-2

Номер сцены	Дата съемки	Покрывeние облаками, %
S2A_TILE_20170819_T38ULE	19.08.2017	5
S2B_TILE_20170821_T38UND	21.08.2017	10
S2A_TILE_20170915_T38UMD	15.09.2017	5
S2A_TILE_20170922_T37UGV	21.09.2017	5

Рабочей гипотезой для использования летне-осенних изображений Sentinel-2 стало предположение о более высокой спектральной делимости тематических классов лесного покрова по породному составу до начала процесса сезонной дефолиации на основе фенологических различий лиственных и хвойных древесных пород.

Спутниковые изображения Sentinel-2 на территорию исследования прошли атмосферную коррекцию в программном пакете QGIS 1.8.6. Далее были получены мультиспектральные композиты в естественных цветах на основе 4 спектральных каналов (4, 3, 2, 8), имеющие одинаковое пространственное разрешение 10 м (рисунок 4.2).

В 2016–2017 гг. на территории Юрсовского и Ленинского лесничеств Пензенской области во время проведения полевых работ были заложены тестовые участки (эталоны) в Кирилловском-Подвышенском и Ольшанском участковых лесничествах (рисунок 4.3). Подбор тестовых участков для валидации и оценки точности создаваемых тематических карт растительного (лесного) покрова проводился посредством уточнения существующих лесоустроительных материалов (таксационные описания и планы лесных насаждений), также использовались материалы спутниковой съемки высокого разрешения (Канопус-В, Ресурс-П). Главным условием при подборе тестовых участков была их представленность во всех классах наземного покрова и равномерное распределение по территории исследуемых лесничеств (рисунок 4.4).

Площадь тестового участка на местности исследуемого лесничества составляла не менее 1 га, что позволило провести его идентификацию на спутниковом снимке Sentinel-2. Оценка древостоев проводилась методом наземной глазомерно-измерительной таксации. Для каждого тестового участка на местности определяли состав (не менее 7 единиц главной поро-

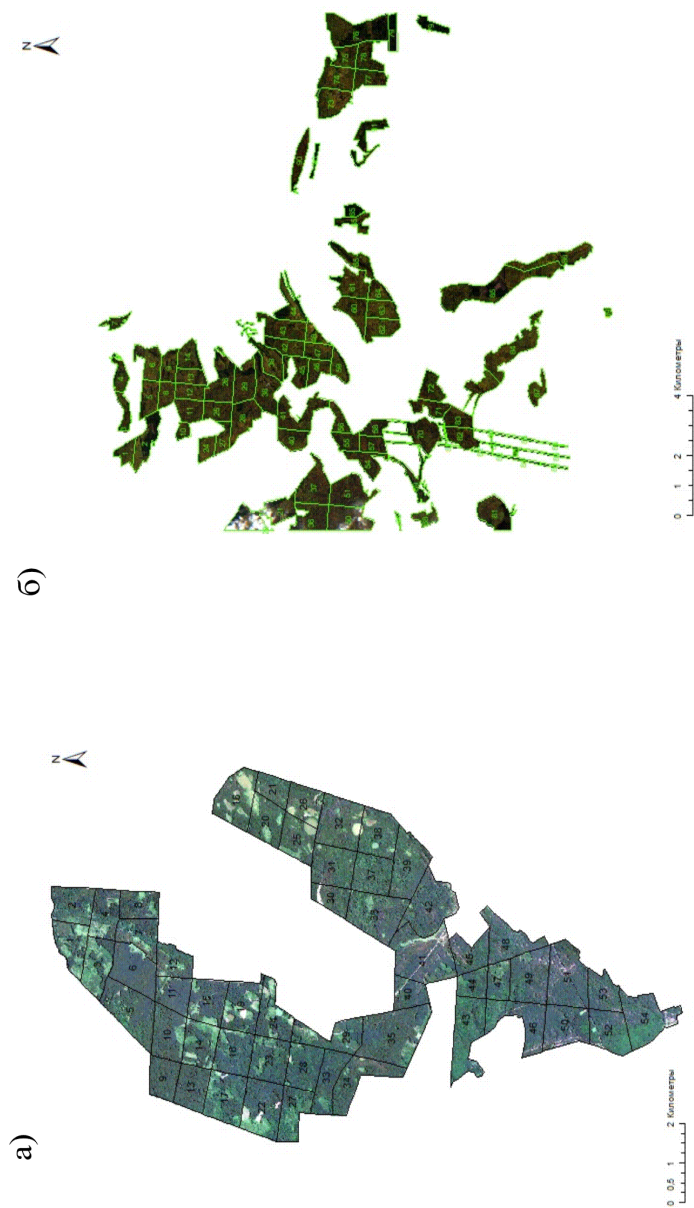


Рисунок 4.2 – Мультиспектральные композиты Sentinel-2 в естественных цветах, совмещенные с квартальной сетью: а) Кирилловское-Подвышенское участковое лесничество Юрсовского лесничества, б) Ольшанское участковое лесничество Ленинского лесничества

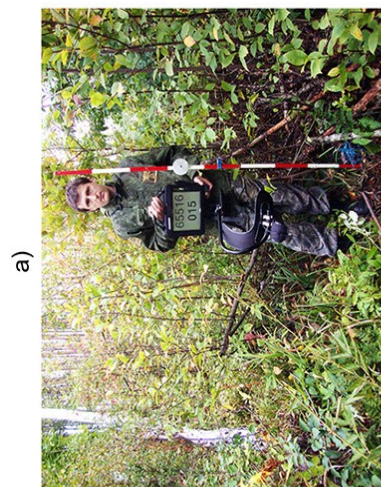
а)



б)



Рисунок 4.3 – Тестовые участки: а) Кирилловского-Подвышенского участкового лесничества (сосняки средневозрастные, лесные культуры), таксационное описание: 9С1Б, 40 лет, полнота 0,8; б) Ольшанского участкового лесничества (осинники спелые и перестойные), таксационное описание: 6Ос4.Лп. Возраст 60 лет, полнота 0,6.



a)



b)



c)



d)

Рисунок 4.4 – Тестовые участки в типичных лесных насаждениях исследуемых лесничеств: а) березовые, б) смешанные насаждения дуба, с) сосна, д) липа

ды), средние высоту и диаметр насаждения, относительную полноту, запас, а также возраст преобладающей породы древо-
стоя.

Каждый исследованный тестовый участок наземного покро-
ва Пензенской области привязывался на местности с помощью
GPS приёмника. За два полевых сезона были заложены 278 те-
стовых участков, большая часть из которых (60 %) была ис-
пользована для создания обучающей выборки для управляемой
классификации. Остальные 40 % тестовых участков были вклю-
чены в базу данных для последующей оценки точности темати-
ческого картографирования по спутниковым снимкам.

Описание полученных данных по древесным породам на
тестовых участках исследуемых лесничеств, распределенных по
выделам и соответствующим им пикселям на спутниковых
снимках, приведено в таблице 4 2.

Таблица 4.2 – Данные тестовых участков Юрсовского
и Ленинского лесничеств

Преобладающая порода	Количество выделов	Средний размер выдела, пикселей	Всего пикселей
Сосна обыкновенная	16	720,4	11526,4
Береза повислая	18	1111,8	20012,4
Дуб низкоствольный	12	496,5	5958
Осина обыкновенная	14	294,1	4117,4
Липа мелколистная	16	621,2	9939,2
Ольха серая	6	487,8	2926,8
Молодняки	14	1167,1	16339,4
Итого	96	699,9	70819,6

Оценка спектральной разделимости

В работе проведена оценка спектральной разделимости исследуемых классов лесного покрова на летних изображениях спутника Sentinel-2. Анализ разделимости тестовых (эталонных) участков проводился с использованием метода декомпозиции спектральных смесей (Spectral Mixture Analysis, SMA) (Елсаков, Марущак, 2011; Воробьев, Курбанов, 2017) для совокупности 4 спектральных каналов Sentinel-2. SMA – это методика оценки части (доли) каждого пикселя изображения, состоящего из нескольких классов наземного покрова (иногда также называемая субпиксельным анализом). Этот метод направлен на определение (анализ) состава каждого пикселя изображения.

Смешанные пиксели, состоящие из нескольких классов наземного покрова, могут вызвать сложность при проведении классификации изображения. Во время классификации такой пиксель может быть отнесен к нескольким классам или только к одному из них. SMA выявляет составные части смешанных пикселей путем прогнозирования доли пикселя, принадлежащего определенному классу, на основе спектральных характеристик его конечных элементов (компонентов).

SMA алгоритм преобразует яркость изображения в группы спектральных компонентов (endmembers - конечных элементов), которые соответствуют характеристикам исследуемых классов растительного покрова. Спектральные «конечные элементы» – это «чистые» спектры, соответствующие каждому из классов (Kuemmerle et al., 2006).

В ходе исследования на основе полевых данных (тестовых участков) были получены графики распределения средней спектральной яркости и стандартных отклонений для каждой исследуемой древесной породы (насаждения), которые позволяют статистически оценить спектральную разделимость между тематическими классами наземного покрова. Наименьшие стандарт-

ные отклонения от графика спектральной дисперсии (рисунок 4.5а) показывают, что коэффициенты яркости лесных пород в соответствующем спектральном канале имеют близкие значения. Максимальные значения стандартного отклонения свидетельствуют о значительной изменчивости спектральной яркости соответствующего класса леса.

Перекрывающиеся графики стандартных отклонений показывают спектральное сходство между этими классами наземного (растительного) покрова, что может привести к потенциальной ошибке при проведении управляемой классификации (рисунок 4.5).

На основе данных тестовых участков полевых исследований, анализа спектральной разделимости классов, экспертного анализа материалов лесоустройства и спутниковых снимков высокого разрешения на исследуемые участковые лесничества была сформирована легенда тематической карты (таблица 4.3), включающая 11 классов растительного (лесного) покрова. Каждый такой тематический класс включает основную древесную породу (не менее 7 единиц в составе) разного класса возраста и относительной полноты.

В процессе работы над спутниковыми изображениями удалось выделить два тематических класса для сосновых насаждений – средневозрастные (41-60 лет) и комбинирование нескольких групп возраста приспевающие (61-80 лет), спелые (81-120 лет) и перестойные (более 120 лет). Для лиственных пород такой дифференциации получить не удалось, поэтому береза, осина и липа представлены только одним тематическим классом, в который вошли две группы возраста – приспевающие (40-60 лет) и спелые (61-80 лет) насаждения. Липовые насаждения представлены только в Ольшанском лесничестве, в то время как ольховые лишь в Кириловском-Подвышенском участковом лесничестве.

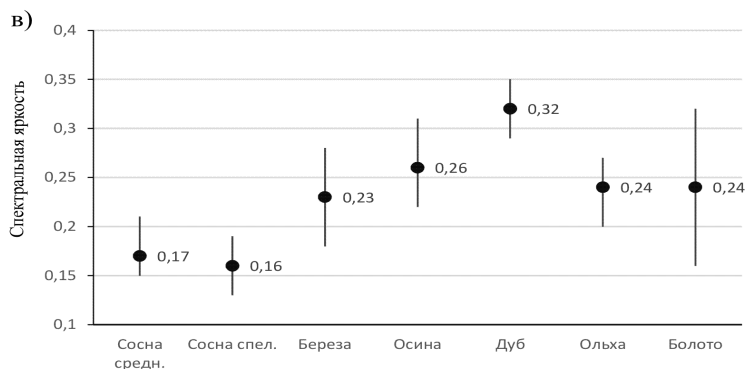
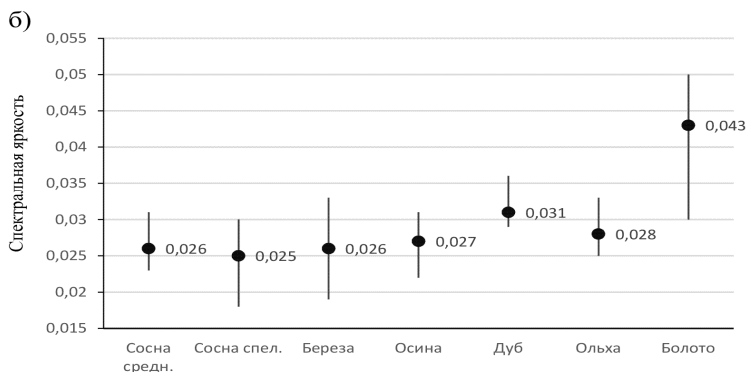
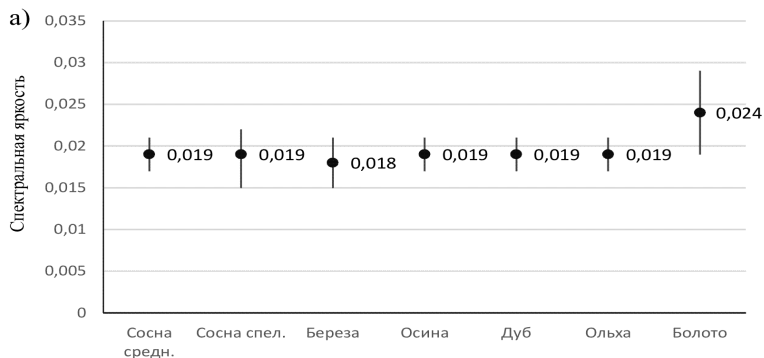
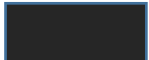


Рисунок 4.5 – Графики распределения средней спектральной яркости и стандартных отклонений для каждой исследуемой древесной породы на снимке Sentinel-2 от 19.08.2017 по спектральным каналам: а) второй, б) третий, в) восьмой

Таблица 4.3 – Легенда тематических классов лесных пород на территорию исследований

№	Наименование тематического класса (порода, группа возраста и относительная полнота)	Цвет
1	Сосна, средневозрастные, средне- и высокополнотные.	
2	Сосна, приспевающие, спелые и перестойные, средне- и высокополнотные.	
3	Береза, приспевающие и спелые, средне- и высокополнотные.	
4	Осина, приспевающие и спелые, средне- и высокополнотные.	
5	Липа, приспевающие и спелые, средне- и высокополнотные.	
6	Дуб, средневозрастные, приспевающие и спелые, средне- и высокополнотные.	
7	Ольха, спелые и перестойные, средне- и высокополнотные.	
8	Молодняки хвойных и лиственных пород естественного и искусственного происхождения.	
9	Не покрытый растительным покровом.	
10	Заболоченные участки.	
11	Смешанные хвойно-лиственные древостои, приспевающие, спелые и перестойные, средне- и высокополнотные.	

Молодые насаждения хвойных и лиственных пород также были объединены в один тематический класс (10-40 лет). Ольха выделена в отдельный класс, включающий две группы возраста – спелые (61-80 лет) и перестойные (более 80 лет).

Тематический класс «Дуб» представлен объединением трех групп возраста – средневозрастные (40-60 лет), приспевающие (61-80 лет) и спелые (81-120 лет) насаждения. Смешанные насаждения, в основном встречающиеся в Ольшанском участковом лесничестве, состоят из лиственных и хвойных пород разного возраста и полноты.

Вновь полученные тематические классы (обучающие выборки) были использованы для проведения управляемой классификации спутниковых данных Sentinel-2 на территорию исследуемых участковых лесничеств. Для этого в работе были использованы три алгоритма (pixel-based algorithms): картирование по спектральному углу (Spectral Angle Mapper, SAM), метод опорных векторов (Support Vector Machines, SVM), максимального правдоподобия (Maximum Likelihood Classification, MLC), которые широко используются в современных исследованиях (Gomez et al., 2016). Процедура классификации на основе трёх алгоритмов проводилась несколько раз для совокупности исследуемых спектральных каналов. В конечном итоге, за основу были приняты наборы параметров и классов лесного покрова, которые показали лучшие результаты классификации.

Анализ и классификация спутниковых изображений проводились в программном комплексе ENVI. Оценка точности классификации осуществлена с использованием 110 тестовых участков в модуле утилиты «Оценка точности» (Accuracy assessment) программного пакета ENVI. Для тестовых участков использовались наборы пикселей (полигоны) по классам лесного покрова, выделенные по материалам лесоустройства и данных полевых исследований. Процедура оценки состоит из наложения всех

полигональных тестовых слоев на классифицированное изображение (Курбанов и др., 2015). В результате была получена «матрица неточностей (ошибок)» (Confusion matrix), включающая основные показатели (статистики) при оценке точности тематических карт: общая точность классификации, коэффициент Каппа, а также коэффициенты «точность производителя» (producer's accuracy, PA) и «точность пользователя» (user's accuracy, UA).

4.3. Результаты исследований

График спектральных сигнатур и дисперсий для отдельного изображения Sentinel-2 от 19 августа 2018 года для Ольшанского участкового лесничества Пензенской области показывает сходство спектрально-отражательных свойств изучаемого полога древостоев различного породного состава (см. рисунок 4.5). Лесные насаждения показывают слабую спектральную изменчивость в видимом спектре, что особенно характерно для второго спектрального канала (см. рисунок 4.5а). Особенно близки по этим показателям сосна средневозрастная и спелая/перестойная, береза - осина, береза - ольха, что зачастую приводит к частичному перемешиванию их спектральных значений.

В то же время высокая разделяемость классов лесного покрова наблюдается в 3 (видимом) и 8 инфракрасном спектральном каналах Sentinel-2 (см. рисунок 4.5б, в). Несмотря на сложность в определении пороговых показателей при оценке разделяемости листовенных пород в составе древостоя, метод декомпозиции спектральных смесей позволяет выявить различие в классах лесного покрова на статистическом уровне значимости (0,95) по изображениям MSI Sentinel-2.

Результаты трех способов управляемой классификации представлены в виде генерализированных тематических карт спутниковых изображений Sentinel-2, полученных на основе полиго-

нальных векторных слоев на изучаемые участковые лесничества (рисунок 4.6), и таблицы точности классификации (таблица 4.4). Полученные карты растительного (лесного) покрова на территорию двух участковых лесничеств Пензенской области имеют высокий уровень детализации, поскольку они составлены на основе изображений спутника Sentinel-2 с пространственным разрешением 10 м.

Сравнение статистик точности пользователя UA и точность производителя PA на вновь полученные тематические карты наземного покрова на территорию Кирилловского-Подвышенского и Ольшанского лесничеств показывает, что для выявления большинства классов лучший результат демонстрирует способ классификации MLC (максимального правдоподобия). Об этом также свидетельствуют общая точность классификации 0,81 и коэффициент Каппа 0,76 на карты Кирилловского-Подвышенского лесничества, а также общая точность 0,76 и коэффициент Каппа 0,72 для Ольшанского участкового лесничества. Способ SVM является следующим по точности выделения заданных классов наземного покрова. Самые низкие статистики результатов управляемой классификации наблюдаются для способа SAM (таблица 4.4).

При классификации способом MLC высокую разделяемость в Кирилловском-Подвышенском участковом лесничестве показывают классы лесного покрова: «Сосна I» (PA 82,5%, UA 80,7%), «Сосна II» (PA 84,6%, UA 77,4%), «Береза» (PA 83,4%, UA 76,0%), «Дуб» (PA 83,4%, UA 76,0%) и «Молодняки» (PA 82,2%, UA 76,7%). В Ольшанском лесничестве при этом же способе классификации максимальные значения статистик имеют тематические классы – «Сосна I» (PA 87,7%, UA 79,9%), «Дуб» (PA 83,8%, UA 62,3%), «Молодняки» (PA 81,8%, UA 70,6%) и «Липа» (PA 81,7%, UA 85,0%). Наиболее сложными для дифференциации были классы «Осина» и «Ольха», которые

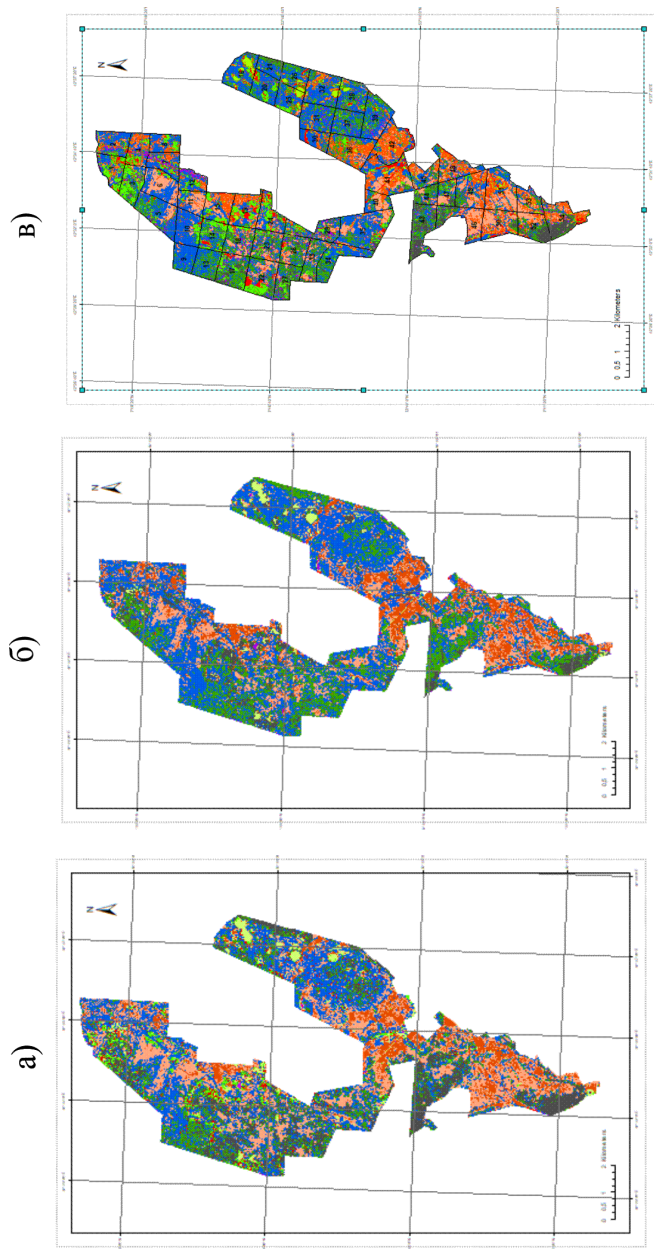


Рисунок 4.6 – Тематические карты изображения Sentinel-2 на территорию Кирилловского-Подвышенского участка лесничества, полученные способами управляемой классификации: а) спектральной угла, б) опорных векторов, в) максимального правдоподобия. Цвет классов наземного покрова представлен в таблице 4.3

Таблица 4.4 – Данные оценки точности тематических карт, полученных тремя способами классификации на основе изображений Sentinel-2

Классы наземного покрова	Кирилловское-Подвышенское лесничество						Ольшанское участковое лесничество					
	Точность производителя (РА%)			Точность пользователя (UA%)			Точность производителя (РА%)			Точность пользователя (UA%)		
	SAM	SVM	MLC	SAM	SVM	MLC	SAM	SVM	MLC	SAM	SVM	MLC
Сосна I	73,1	75,6	82,5	71,4	74,7	80,7	75,9	74,3	77,7	68,2	72,1	79,9
Сосна II	70,4	67,1	84,6	75,0	68,5	77,4	82,4	76,9	71,4	71,6	61,7	70,1
Береза	78,1	82,8	83,4	70,3	65,5	76,0	64,6	69,4	73,4	71,0	71,5	73,9
Осина	56,7	61,0	64,7	74,6	80,7	82,5	70,1	74,1	75,2	68,4	76,1	82,6
Дуб	79,0	86,5	89,3	70,6	71,8	77,4	67,4	67,2	83,8	60,1	61,8	62,3

Окончание таблицы 4.4

Ольха	76,0	61,0	73,2	68,9	70,8	80,8						
Молодняки	76,6	83,2	82,2	70,3	70,6	76,7	74,8	70,0	81,8	72,4	74,2	70,6
Смешанные							59,1	65,3	70,8	77,7	74,5	80,0
Липа							74,7	72,1	81,7	67,4	71,9	85,0
Непокрытые	78,6	79,7	75,5	86,6	79,7	85,8	67,3	76,0	72,9	70,4	72,8	78,4
Заболоченные	63,8	68,8	75,9	74,2	74,8	81,6						
Общая точность	SAM 0,71; SVM 0,74; MLC 0,81						SAM 0,69; SVM 0,71; MLC 0,76					
Коэффициент Каппа	SAM 0,67; SVM 0,7; MLC 0,76						SAM 0,64; SVM 0,65; MLC 0,72					

имеют схожие спектральные характеристики с березовыми и липовыми насаждениями.

Исследование показало, что при тематической классификации лесных насаждений по спутниковым снимкам Sentinel-2 следует учитывать группы и классы возраста древостоев. Особенно хорошо это проявилось при спектральном разделении классов хвойных пород (сосна). В работе удалось выделить два класса сосновых насаждений по возрасту, что может повысить точность картографирования (дешифрирования) при проведении лесоустроительных и лесоинвентаризационных работ. Также хорошо различаются спектральные границы между тематическим классом «Молодняки» (до 40 лет) и другими классами разных древесных пород старших групп возраста (средневозрастные, приспевающие, спелые и перестойные насаждения).

Полученные данные и методика тематического картографирования на основе снимков высокого пространственного разрешения Sentinel-2 могут быть использованы для повышения эффективности и оперативности проведения лесоустроительных работ, а также при мониторинге лесного фонда лесничеств между датами лесоустройства.

Выводы по главе 4

В породной структуре лесов исследуемых лесничеств Пензенской области преобладают мягколиственные древостои, на долю которых приходится 64 % (Юрсовское лесничество) и 48 % (Ленинское лесничество) площади покрытых лесной растительностью земель. Хвойные насаждения занимают соответственно 24 и 13 %, а твердолиственные – 11 и 38 %.

В Пензенской области наблюдается тенденция усыхания дубовых насаждений, что, как и в других областях европейской части Российской Федерации, вызвано в первую очередь рубка-

ми наиболее высокопродуктивных насаждений, проводившихся в последние столетия. В связи с этим на значительной площади лесных вырубок происходит естественная смена главной породы дуба на березовые, липовые, осиновые и кленовые древостои.

В процессе исследования были получены графики распределения средней спектральной яркости и стандартных отклонений для каждой исследуемой древесной породы (насаждения). Наименьшие стандартные отклонения от графика спектральной дисперсии показывают, что коэффициенты яркости лесных пород в соответствующем спектральном канале имеют близкие значения. Максимальные значения стандартного отклонения свидетельствуют о значительной изменчивости спектральной яркости соответствующего класса леса.

В ходе исследования удалось выделить два тематических класса для сосновых насаждений – средневозрастные (41-60 лет) и комбинирование нескольких групп возраста приспевающие (61-80 лет), спелые (81-120 лет) и перестойные (более 120 лет). Для лиственных пород такой дифференциации получить не удалось, поэтому береза, осина и липа представлены только одним тематическим классом, в который вошли две группы возраста – приспевающие (40-60 лет) и спелые (61-80 лет) насаждения. Липовые насаждения представлены только в Ольшанском лесничестве, в то время как ольховые лишь в Кириловском-Подвышенском участковом лесничестве.

График спектральных сигнатур и дисперсий для отдельного изображения Sentinel-2 для Ольшанского участковог лесничества показывает сходство спектрально-отражательных свойств изучаемого полога древостоев различного породного состава. В целом лесные насаждения показывают слабую спектральную изменчивость в видимом спектре, что особенно характерно для второго спектрального канала. Особенно близки по этим показателям

телям сосна средневозрастная и спелая/перестойная, береза - осина, береза - ольха, что зачастую приводит к частичному перемешиванию их спектральных значений.

Выявлена высокая разделимость классов лесного покрова в 3 (видимом) и 8 инфракрасном спектральном каналах изображений Sentinel-2. Несмотря на сложность в определении пороговых показателей при оценке разделимости лиственных пород в составе древостоя, метод декомпозиции спектральных смесей позволяет выявить различие в классах лесного покрова на статистически уровне значимости (0,95) по изображениям MSI Sentinel-2.

Полученные карты растительного (лесного) покрова на территорию двух участковых лесничеств имеют высокий уровень детализации, поскольку они составлены на основе изображений с пространственным разрешением 10 м.

Для выявления большинства тематических классов лучший результат демонстрирует способ классификации MLC (максимального правдоподобия). Об этом свидетельствуют общая точность классификации 0,81 и коэффициент Каппа 0,76 на карты Кирилловского-Подвышенского лесничества, а также общая точность 0,76 и коэффициент Каппа 0,72 для Ольшанского участкового лесничества.

При тематической классификации лесных насаждений по спутниковым снимкам Sentinel-2 следует учитывать группы и классы возраста древостоев, особенно при спектральном разделении классов хвойных пород.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Получение своевременных и точных данных о лесных экосистемах очень важно при принятии решений по международным соглашениям и устойчивому управлению лесами. В связи с этим специалистами все чаще используются методы дистанционного зондирования Земли, которые позволяют качественно и быстро вести учет изменений изучаемых объектов с необходимой периодичностью и точностью.

Авторами монографии проведен обширный анализ научной литературы по теме исследований, особенное внимание уделено публикациям ученых Европейского Союза. Для решения вопроса по оценке долговременной динамики лесного покрова на исследуемых территориях использованы временные ряды и комплексная программа TIMESAT. В результате предложена методика выявления взаимосвязи между вегетационными индексами подстилающей поверхности (лесного покрова) и климатическими параметрами. На основе данных временных рядов спектрорадиометра MODIS проанализированы также межсезонные изменения вегетационных индексов.

В ходе исследований разработана и апробирована на примере Сирийской Арабской Республики и Среднего Поволжья Российской Федерации методика управляемой классификации лесного покрова и оценки состояния лесных насаждений по данным изображений различного пространственного разрешения спутниковой системы Sentinel и спектрорадиометра MODIS. Выявлено пространственно-временное распределение изучаемых лесов на примере района сирийской Латакии, Марийского Заволжья и Пензенской лесостепной зоны.

Для решения поставленных задач были проанализированы значения двух спектральных вегетационных индексов – NDVI и EVI. Данная методика оценки состояния лесных насажде-

ний с использованием спектральных вегетационных индексов может быть применена для совершенствования уже имеющихся работ по мониторингу динамики лесного покрова. Графический анализ средних годовых значений NDVI и EVI показал сходную пространственную изменчивость.

Основным фактором, усложняющим возможности валидации созданных тематических карт, является высокая трудоемкость подбора тестовых (опорных) участков на исследуемых территориях лесного покрова, которые должны отвечать предъявляемым к ним требованиям репрезентативности и достоверности. В частности, удовлетворение требования достоверности опорных данных в Сирийской Арабской Республике было ограничено военными действиями в этом регионе, что не позволило провести специализированные наземные исследования для оценки точности картографирования. Поэтому в работе для валидации карт, полученных для территории Сирии, были использованы косвенные данные. К ним можно отнести отчёты по официальной государственной статистике изучаемых территорий, материалы лесной инвентаризации и лесоустройства, существующие тематические карты или результаты визуальной интерпретации спутниковых изображений более высокого разрешения.

Результаты проведенных исследований позволяют сделать следующие практические рекомендации производству.

Целесообразно использовать предложенные алгоритмы пространственно-временной оценки динамики лесного покрова по спутниковым снимкам при осуществлении дистанционного мониторинга и прогноза развития лесных пожаров, оценки степени повреждения лесов огнем и причиненного им ущерба, санитарного состояния лесов, оценки среды обитания и учета численности охотничьих ресурсов, а также оценки биологического разнообразия в лесах и их фрагментированности.

Использование разработанных пошаговых алгоритмов позволит автоматизировать оценку лесных ресурсов, возможность выявлять текущие изменения в лесном покрове и получать тематические карты лесного покрова.

Целесообразно внедрять в практику государственных лесоинвентаризационных и лесоустроительных работ методику, разработанную в данном исследовании, при проведении работ по оценке нарушений и выявлению изменений в лесном покрове по направлению «Дистанционный мониторинг состояния и использования лесов».

Рекомендуется использовать созданный набор ГИС-данных лесных участков и тематических карт динамики растительного (лесного) покрова для комплексного анализа данных в сочетании с экономическими, экологическими или социальными факторами для прогнозирования развития ситуации в лесном (сельскохозяйственном) секторе, как в нашем исследовании это выполнено на примере Сирийской Арабской Республики, Республики Марий Эл и Пензенской области Российской Федерации.

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.

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 пространственных 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.

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.

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 позиционирования 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.

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.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Алексеев, А.С. Метод определения таксационных характеристик насаждений по аэрофотоснимкам сверхвысокого разрешения / А.С. Алексеев, А.А. Михайлова, Д.М. Черниковский, В.И. Березин // Труды Санкт-Петербургского научно-исследовательского института лесного хозяйства. – 2017. – № 2. – С. 67-77.
2. Алексеев, А.С. Анализ производительности съемки участков лесного фонда с помощью беспилотного летательного аппарата Stopcam (на примере учебно-опытного лесничества Ленинградской области) / А.С. Алексеев, А.А. Никифоров // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. – 2013. – № 205. – С. 6-15.
3. Али, М.С. Картографирование растительного покрова Сирийской Арабской Республики по данным спутника MODIS / М.С. Али // Лесные экосистемы в условиях изменения климата: биологическая продуктивность и дистанционный мониторинг: сборник научных статей. [Электронный ресурс]. – Йошкар-Ола: ПГТУ, 2017. – № 3. – С. 74-84. – URL: <https://inter.volgatech.net/centre-for-sustainable-management-and-remote-monitoring-of-forests/forest-ecosystems-in-a-changing-climate/>
4. Атлас Мира. Азия – географический атлас. [Электронный ресурс]. – URL: <http://world-karta.ru/syria-map.html>
5. 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. – М.: ИКИ РАН, 2016. – 208 с.
6. 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.
7. Воробьев, О.Н. Дистанционный мониторинг городских лесов / О.Н. Воробьев, Э.А. Курбанов, А.В. Губаев, Ю.А. Полевщикова, Е.Н. Демишева, О.В. Коптелов // Вестник Поволжского государственного

технологического университета. Сер: Лес. Экология. Природопользование. – 2015. – № 1(25).– С. 5-21.

8. Воробьев, О.Н. Дистанционный мониторинг восстановительной динамики растительности на гарях Марийского лесного Заволжья / О.Н. Воробьев, Э.А. Курбанов // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2017. – № 2 (14) .– С. 124-134.

9. Губаев, А.В. Классификация наземного покрова Среднего Поволжья по спутниковым снимкам среднего разрешения / А.В. Губаев, Э.А. Курбанов, О.Н. Воробьев, С.А. Лежнин, Ю.А. Полевщикова // Лесные экосистемы в изменении климата: биологическая продуктивность и дистанционный мониторинг: сборник материалов международного научно-практического семинара [Электронный ресурс]. – Йошкар-Ола: Марийский государственный технический университет, 2011. – С. 7-18. – URL: <https://inter.volgatech.net/centre-for-sustainable-management-and-remote-monitoring-of-forests/forest-ecosystems-in-a-changing-climate/>

10. Демаков, Ю.П. Структура и закономерности развития лесов Республики Марий Эл: монография / Ю.П. Демаков. – Йошкар-Ола: ПГТУ, 2018. – 431 с.

11. Елсаков, В.В. Картирование растительного покрова бассейна р. Кожим (Приполярный Урал) с использованием материалов дистанционного зондирования / В.В. Елсаков, И.О. Марущак, В.М. Щанов // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2009. – Т.2, № 6. – С. 360-364.

12. Елсаков, В.В. Спектрозональные спутниковые изображения в выявлении трендов климатических изменений лесных фитоценозов западных склонов приполярного Урала / В.В. Елсаков, И.О. Марущак // Компьютерная оптика. – 2011. – Т. 35, № 2. – С. 281-286.

13. Жарко, В.О. Оценка распознаваемости древесных пород леса на основе спутниковых данных о сезонных изменениях их спектрально-отражательных характеристик / В.О. Жарко, С.А. Барталев // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2014. – Т. 11, № 3. – С. 159–170.

14. Жарко В.О. Исследование возможностей оценки запасов древесины в лесах Приморского края по данным спутниковой системы Pro-

ba-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. Жирин, В.М. Сезонная информативность многоспектральных космических снимков высокого разрешения при изучении породно-возрастной динамики лесов / В.М. Жирин, С.В. Князева, С.П. Эйдлина, Н.В. Зукерт // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2012. – Т. 9, № 1. – С. 87-94.

16. Жирин, В.М. Опыт лесоводственного анализа последствий пожаров по космическим изображениям / В.М. Жирин, С.П. Эйдлина, С.В. Князева // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2013. – Т. 10, № 3. – С. 243-259.

17. Иванов, А.И., Древесные растения Пензенской области / А.И. Иванов, А.С. Власов, Т.Г. Власова, С.А. Сашенкова. – Пенза: ПГСХА, 2012. – 299 с.

18. 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.

19. Критерии и индикаторы устойчивого управления лесами Российской Федерации. – М.: Федеральная служба лесного хозяйства России. – 1998. – 7 с.

20. Курбанов, Э.А. Углероддепонирующие насаждения Киотского протокола: монография / Э.А. Курбанов. – Йошкар-Ола, 2007. – 184 с.

21. Курбанов, Э.А. К вопросу об углероддепонирующих насаждениях / Э.А. Курбанов, О.Н. Воробьев, Л.С. Мошкина, А.В. Губаев, С.А. Лежнин, С.А. Незамаев // Вестник МарГТУ. – Йошкар-Ола: Марийский государственный технический университет. – 2008. – №3. – С. 5-17.

22. Курбанов, Э.А. Моделирование бюджета углерода лесных насаждений на примере сосняков Поволжья / Э.А. Курбанов // Лесной журнал. – 2009. – № 2. – С. 7-15.

23. 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 госу-

дарственного технологического университета. Сер.: Лес. Экология. Природопользование. – 2014. – № 1(21). – С. 18-32.

24. 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, 2015. – 126 с.

25. Курбанов, Э.А. Два десятилетия исследований растительного покрова по MODIS / Э.А. Курбанов // Лесные экосистемы в условиях изменения климата: биологическая продуктивность и дистанционный мониторинг: сборник научных статей: материалы международной конференции [Электронный ресурс]. – Йошкар-Ола: ПГТУ, 2016. – С. 123-132. – URL: <https://inter.volgatech.net/centre-for-sustainable-management-and-remote-monitoring-of-forests/forest-ecosystems-in-a-changing-climate/>

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. Лесной план Пензенской области 2008 [Электронный ресурс]. – URL: <http://minleshoz.pnzreg.ru/osnovnye-napravleniya/lesnoe-khozyaystvo/lesnoy-plan/>

28. Матвеев, С.М. Дендроиндикация динамики состояния сосновых насаждений Центральной лесостепи: монография / С.М. Матвеев. – Воронеж: Издательство Воронежского государственного университета, 2003. – 269 с.

29. Матвеев, С.М. Дендроклиматический анализ 200-летнего древостоя сосны обыкновенной в Воронежском биосферном заповеднике / С.М. Матвеев, Д.А. Тимащук // Лесоведение. – 2019. – № 2. – С. 93-104

30. Матвеев, С.М. Повторяемость сильных засух и многолетняя динамика радиального прироста сосны обыкновенной в Усманском и Хреновском борах Воронежской области / С.М. Матвеев, С.В. Матвеева, Ю.Н. Шурыгин // Журнал Сибирского федерального университета. Серия: Биология. – 2012. – Т. 5, № 1. – С. 27-42.

31. Медведева, М.А. О связи фенологического развития растительности таежной зоны с величиной NDVI, определенной по спутниковым данным / М.А. Медведева, В.В. Елсаков, И.Ю. Савин, С.А. Барталев // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2010. – Т. 7, № 1. – С. 319–329.

32. Миклашевич, Т.С. Метод определения фенологических характеристик растительного покрова на основе временных рядов спутниковых данных / Т.С. Миклашевич, С.А. Барталев // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2016. – Т. 13, № 1. – С. 9–24.

33. Мишулина О.А. Статистический анализ и обработка временных рядов / О.А. Мишулина // М.: МИФИ, 2004. - 180 с.

34. Никонов, А.В. Фильтрация методом Савицкого-Голея спектральных характеристик чувствительности матричных фотоприемных устройств / А.В. Никонов, Р.В. Давлетшин, Н.И. Яковлева, П.С. Лазарев // Успехи прикладной физики. – 2016. – Т. 4, № 2. – С. 198 – 205.

35. Парижское соглашение ООН на русском языке [Электронный ресурс] – URL: [http://unfccc.int/resource/docs/2015/cop21/rus/109r.pdf/](http://unfccc.int/resource/docs/2015/cop21/rus/109r.pdf)

36. Пахучий В.В. Оценка изменчивости площади участков островного местонахождения сосны кедровой сибирской в связи с их географическим положением в Республике Коми / В.В. Пахучий, Л.М. Пахучая // Лесные экосистемы в условиях изменения климата: биологическая продуктивность и дистанционный мониторинг: сборник научных статей. – Йошкар-Ола: ПГТУ, 2018. – Вып. 4. – С. 82-92.

37. Перепечина, Ю.И. Определение лесистости и количественных характеристик лесов по космическим снимкам Sentinel-2 (на примере Шебекинского муниципального района Белгородской обл.) [Электронный ресурс] / Ю.И. Перепечина, О.И. Глушенков, Р.С. Корсинов // Лесохозяйственная информация: электронный сетевой журнал. – 2017. – № 4. – С. 85–93. – URL: <http://lhi.vniilm.ru/>

38. Приказ «Об утверждении санитарных правил в лесах Российской Федерации» // Собрание законодательства РФ. – М, 2005. – №. 350.

39. Рамочная конвенция Организации Объединенных Наций об изменении климата, 1992. – URL: http://www.un.org/ru/documents/decl_conv/conventions/climate_framework_conv.shtml.

40. Содномов, Б.В. Алгоритм оценки долговременных вариаций MODIS NDVI / Б.В. Содномов, А.А. Аюржанаев, Б.З. Цыдыпов, Е.Ж. Гармаев // Журнал сибирского федерального университета. – 2018. – Т. 11, № 1. – С. 61-68.

41. Ступишин, А.В. Физико-географическое районирование Среднего Поволжья / А.В. Ступишин. – Казань, 1969. – 124 с.

42. Терехин, Э.А. Оценка изменения лесистости в современный период на юге Среднерусской возвышенности с использованием материалов разновременных космических съёмок/ Э.А. Терехин, Ю.Г. Чендев // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. – 2018. – Т. 15, № 3. – С. 114-126.

43. ФАО. Состояние лесов мира 2016. Леса и сельское хозяйство: проблемы и возможности землепользования. – Рим, 2016. – 116 с.

44. Френкель, М.О. Межрегиональный экомониторинг Волжского бассейна / М.О. Френкель. – Киров, 1997. – 178 с.

45. Шалаев, В.С. Направления исследований лесной продукции в мире: от Любляны до Солт-Лейк-Сити // Вестник МГУЛ – Лесной вестник, 2015. – Вып. 1(19). – С. 229-232.

46. Шалаев, В.С. Лес и климат (исторический экскурс) / В.С. Шалаев, В.К. Тепляков // Лесные экосистемы в изменении климата: биологическая продуктивность и дистанционный мониторинг: сборник материалов международной научно-практической конференции [Электронный ресурс]. – Йошкар-Ола: Поволжский государственный технологический университет, 2017. – С. 54-63. – URL: <https://forecos.volgatech.net/>

47. Шалаев, В.С. Об исследованиях «лесной продукции» / В.С. Шалаев // Лесные экосистемы в изменении климата: биологическая продуктивность и дистанционный мониторинг: сборник материалов международной научно-практической конференции [Электронный ресурс]. – Йошкар-Ола: Поволжский государственный технологический университет, 2018. – С. 59-64. – URL: <https://forecos.volgatech.net/>

48. Швецов Е.Г. Мониторинг изменений растительности на территории Средней Сибири за период 1990-2015 гг. по данным Landsat / Е.Г. Швецов, Е.И. Парфенова, Н.М. Чебакова // Лесные экосистемы в условиях изменения климата: биологическая продуктивность и дистанционный мониторинг: сборник научных статей. – Йошкар-Ола: ПГТУ, 2018. – Вып. 4. – С. 30-39. – URL: <https://forecos.volgatech.net/>

49. Шиятов, С.Г. Пространственно-временная динамика лесотундровых сообществ на Полярном Урале / С.Г. Шиятов, М.М. Терентьев, В.В. Фомин // *Экология*. – 2005. – №2. – С. 83-90.

50. Adelabu, S. A review of remote sensing of insect defoliation and its implications for the detection and mapping of *Imbrasia belina* defoliation of Mopane Woodland / S. Adelabu, O. Mutanga, M.A. Cho // *The African Journal of Plant Science and Biotechnology*. – 2012. – Vol. 6. – P. 1-13.

51. Adelabu, S. Evaluating the impact of red-edge band from RapidEye image for classifying insect defoliation levels / S. Adelabu, O. Mutanga, E. Adam // *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*. – 2014. – Vol. 95. – P. 34-41.

52. Acuna, M. Impact of climate change on Australian forest operations / M. Acuna, M. Strandgard // *Australian Forestry*. – 2017. – Vol. 80, №5. – P. 299-308.

53. Al-Fares, W. Historical land use/land cover classification using remote sensing. A case study of the Euphrates river basin in Syria / W. Al-Fares // *Springer*. – 2013. – P. 1-204.

54. Allen, C.D. A global overview of drought and heat-induced tree mortality reveals emerging climate change risks for forests / C.D. Allen, A.K. Macalady, H. Chenchouni, D. Bachelet, N. McDowell, M. Vennetier // *Forest Ecology and Management*. – 2010. – Vol. 259, № 4. – P. 660-684.

55. Al-Mahmoud, H. The War Economy in the Syrian Conflict/ Al-M. Hamoud. [Electronic resource] – URL: <http://carnegie.ru/2015/12/15/war-economy-in-syrian-conflict-government-s-hands-off-tactics-pub-62202>.

56. Anav, A. Growing season extension affects ozone uptake by European forests / A. Anav, A. De Marco, P. Friedlingstein, F. Savi, P. Sicard, S. Sitch, M. Vitale, E. Paoletti // *Science of the total environment*. – 2019. – Vol. 669, № 15. – P. 1043-1052.

57. Aksenov, D. Atlas of Russia's Intact Forest Landscapes / D. Aksenov, D. Dobrynin, M. Dubinin // Biodiversity Conservation Center, Greenpeace Russia, International Socio-Ecological Union, World Resources Institute, Moscow, Russia, 2002.

58. Anderson, K. Earth observation in service of the 2030 Agenda for Sustainable Development / K. Anderson, B. Ryan, W. Sonntag, A. Kavvada, L. Friedl // *Geo-Spatial Information Science*. – 2017. – № 20. – P. 77–96.

59. Astola, H. Comparison of Sentinel-2 and Landsat 8 imagery for forest variable prediction in boreal region / H. Astola, T. Häme, L. Sirro, M. Molinier, J. Kilpi // *Remote Sensing of Environment*. – 2019. – Vol. 223. – P. 257-273
60. Belgiua, M. Sentinel-2 cropland mapping using pixel-based and object-based time-weighted dynamic time warping analysis / M. Belgiua, O. Csilik // *Remote Sensing of Environment*. – 2018. – Vol. 204. – P. 509-523.
61. Bjerke, J.W. Record-low primary productivity and high plant damage in the Nordic Arctic Region in 2012 caused by multiple weather events and pest outbreaks / J.W. Bjerke, S.R. Karlsen, K.A. Hogda et al. // *Environmental Research Letters*. – 2014. – Vol. 9, №8. – P. 084006 (1-14).
62. Blaschke, T. Geographic object-based image analysis – towards a new paradigm / T. Blaschke, G.J. Hay, M. Kelly, S. Lang, P. Hofmann, E. Addink, R.Q. Feitosa, F. van der Meer, H. van der Werff, F. van Coillie, et al. // *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*. – 2014. – Vol. 87. – P. 180-191.
63. Bonan, G.B. Forests and climate change: forcings, feedbacks, and the climate benefits of forests /G.B. Bonan // *Science*. – 2008. – № 320. – P. 1444–1449.
64. BP Statistical Review of World Energy. – 2017. – 66th edition. – url: <https://www.bp.com/en/global/corporate/energy-economics/statistical-review-of-world-energy.html>
65. Brown, M.E. Evaluation of multi-sensor semi-arid crop season parameters based on NDVI and rainfall / M.E. Brown, K.M. de Beurs // *Remote Sensing of Environment*. – 2008. – Vol. 112, №. 5. – P. 2261-2271.
66. Brown, M.E. Global phenological response to climate change in crop areas using satellite remote sensing of vegetation, humidity and temperature over 26 Years / M.E. Brown, K.M. De Beurs, M. Marshall // *Remote sensing of environment*. – 2012. – № 126. – P. 174–183.
67. Buermann, W. Recent shift in Eurasian boreal forest greening response may be associated with warmer and drier summers / W. Buermann, P.R. Bikash, M. Jung, G.M. MacDonald, C.J. Tucker, M. Reichstein // *Geophysical research letters*. – 2014. – № 41. – P. 1995–2002.

68. Calvao, T. Mapping Mediterranean scrub with satellite imagery: biomass estimation and spectral behavior / T. Calvao, J.M. Palmeirim // *International journal of remote sensing*. – 2004. – Vol. 25. – P. 3113-3126.

69. Cano, E. Improved forest-cover mapping based on MODIS time series and landscape stratification / E. Cano, J.F. Denux, M. Bisquert, L. Hubert-Moy, V. Cheret // *International Journal of Remote Sensing*. – 2017. – Vol. 38, № 7. – P. 1865-1888.

70. Caviglia-Harris, J. Detecting and interpreting secondary forest on an old Amazonian frontier / J. Caviglia-Harris, M. Toomey, D.W. Harris, K. Mullan, A.R. Bell, E.O. Sills, D.A. Roberts // *Journal of Land Use Science*. – 2015. – Vol. 10, №4. – P. 442-465.

71. Chandler, R.E. Exploratory Analysis: Statistical methods for trend detection and analysis in the Environmental Sciences / R.E. Chandler, E.M. Scott // Chichester, UK: John Wiley & Sons, Ltd, 2011. – P. 25-59.

72. Chen, Y. Enhancing Land Cover Mapping through Integration of Pixel-Based and Object-Based Classifications from Remotely Sensed Imagery / Y. Chen, Y. Zhou, Y. Ge, R. An, Y. Chen // *Remote Sensing*. – 2018. – Vol. 10, № 77. – P. 1-15.

73. 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.

74. Coops, N. Prediction and assessment of bark beetle-induced mortality of lodgepole pine using estimates of stand vigor derived from remotely sensed data / N. Coops, R. Waring, M. Wulder, J. White // *Remote Sensing of Environment*. – 2009. – Vol. 113, №5. – P. 1058-1066.

75. Cutler, M.E.J. Estimating tropical forest biomass with a combination of SAR image texture and Landsat TM data: An Assessment of Predictions Between Regions / M.E.J. Cutler, D.S. Boyd, G.M. Foody, A. Vetrivel // *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*. – 2012. – Vol. 70. – P. 66–77.

76. de Beurs, K.M. Spatio-temporal statistical methods for modelling land surface phenology/ K.M. de Beurs, G.M. Henebry // Chapter 9. In I.L. Hudson, M.R. Keatley, eds. *Phenological Research. Methods for environmental and climate change analysis*. Springer. New York, 2010. – P. 117-208.

77. de Kok, R. Applications of Sentinel-2 data for agriculture and forest monitoring using the absolute difference (ZABUD) index derived from the AgroEye software (ESA) / R. de Kok, P. Wężyk, M. Papież, L. Migo // Proceedings SPIE 10421, Remote Sensing for Agriculture, Ecosystems, and Hydrology XIX, 104211A. – 2017. – 15 p.

78. Du, J. Detecting the effects of climate change on canopy phenology in coniferous forests in Semi-Arid mountain regions of China / J. Du, Z. He, J. Yang, L. Chen, X. Zhu // International Journal of Remote Sensing. – 2014. – № 35. P. – 6490-6507.

79. ESA Introducing Sentinel-2. – url: http://www.esa.int/Our_Activities/Observing_the_Earth/Copernicus/Sentinel-2/Introducing_Sentinel-2

80. 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.

81. Eklundh, L. Mapping insect defoliation in Scots pine with MODIS time-series data / L. Eklundh, T. Johansson, S. Solberg // Remote sensing of environment. – 2009. – Vol. 113, №7. – P. 1566-1573.

82. Eklundh, L. Timesat 3.1 Software Manual / L. Eklundh, P. Jönsson // Lund University/ 2011. Sweden. – URL: <http://web.nateko.lu.se/TIME-SAT/timesat.asp>

83. Etteieb, S. Mediterranean forest mapping using hyper-spectral satellite imagery / S. Etteieb, M. Louhaichi, C. Kalaitzidis, I.Z. Gitas // Arabian journal of geosciences. – 2013. – Vol. 6, № 12. – P. 5017–5032.

84. FAO/WFP crop and food security assessment mission to the Syrian Arab Republic / FAO. – 2016. – P. 1 -91.

85. FAO. The State of the World's Forests 2018 - Forest pathways to sustainable development. – Rome, 2018. – 118 p.

86. Fensholt, R. Greenness in semi-arid areas across the globe 1981–2007 — an Earth Observing Satellite based analysis of trends and drivers / R. Fensholt, T. Langanke, K. Rasmussen, A. Reenberg, S.D. Prince, C. Tucker, et al. // Remote Sensing of Environment. – 2012. – Vol. 121. – P. 144-158.

87. Forests of Syria. United Nation Development Programme (UNDP) / Report. INC-SY_V&A_Forest-Ar. – 2009. – 41 p.

88. Frampton, W.J. Evaluating the capabilities of Sentinel-2 for quantitative estimation of biophysical variables in vegetation / W.J. Frampton, J. Dash, G. Watmough, E.J. Milton // *ISPRS Journal of photogrammetry and remote sensing*. – 2013. – Vol. 82. – P. 83-92.

89. Frantz, D. Phenology-adaptive pixel-based compositing using optical earth observation imagery / D. Frantz, A. Röder, M. Stellmes, J. Hill // *Remote Sensing of Environment*. – 2017. – Vol. 190. – P. 331-347.

90. Frazier, R.J. Analyzing spatial and temporal variability in short-term rates of post-fire vegetation return from Landsat time series / R.J. Frazier, N.C. Coops, M.A. Wulder, T. Hermosilla, J.C. White // *Remote Sensing of Environment*. – 2018. – № 205. – P. 32-45.

91. Fu, Y.H. Larger temperature response of autumn leaf senescence than spring leaf-out phenology / Y.H. Fu, S. Piao, N. Delapierre, F. Hao, H. Hänninen, Y. Liu, et al. // *Global Change Biology*. – 2017. – Vol. 24. – P. 2159-2168.

92. Galos, B. Case study for the assessment of the biogeophysical effects of a potential afforestation in Europe [Electronic resource] / B. Galos, S. Hagemann, A. Hänsler, G. Kindermann, D. Rechid, K. Sieck, C. Teichmann, D. Jacob // *Carbon Balance and Management*. – 2013. – URL: <http://www.cbmjjournal.com/content/8/1/3>

93. Gallant, A. Challenges in Complementing Data from Ground-Based Sensors with Satellite-Derived Products to Measure Ecological Changes in Relation to Climate—Lessons from Temperate Wetland-Upland Landscapes / A. Gallant, W. Sadinski, J. Brown, G. Senay, M. Roth // *Sensors (Basel)*. – 2018. – Vol. 18, № 3, ID 880.

94. Gill, T. A method for mapping Australian woody vegetation cover by linking continental-scale field data and long-term Landsat time series / T. Gill, K. Johansen, S. Phinn, R. Trevithick, P. Scarth, J. Armston // *International Journal of Remote Sensing*. – 2017. – Vol. 38, № 3. – P. 679-705.

95. Ghobadi, G.J. Forest fire risk zone mapping from geographic information in northern forests of Iran (Case study, Golestan province) / G.J. Ghobadi, B. Gholizadeh, O.M. Dashliburun // *International Journal of Agriculture and Crop Sciences*. – 2012. – Vol. 4, № 18. – P. 818-824.

96. Gomariz-Castillo, F. Improving classification accuracy of multi-temporal Landsat images by assessing the use of different algorithms, textual and ancillary information for a Mediterranean semiarid area from 2000

to 2015 / F. Gomariz-Castillo, F. Alonso-Sarría, F. Canovas-Garcia // Remote Sensing. – 2017. – Vol. 9, № 1058. – P. 1-23.

97. Gomez, C. Optical remotely sensed time series data for land cover classification: A review // C. Gomez, J.C. White, M.A. Wulder // ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing. – 2016. – Vol. 116. – P. 55-72.

98. Gond, G. Vegetation structure and greenness in Central Africa from Modis multi-temporal data / V. Gond, A. Fayolle, A. Penneç, G. Cornu, P. Mayaux, P. Camberlin, et al. // Philosophical transactions of the royal society (open access). – 2013. – 8 p.

99. 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.

100. Grotti, M. Spatio-temporal variability in structure and diversity in a semi-natural mixed oak-hornbeam floodplain forest /M. Grotti, F.Chianucci, N. Puletti, M.J. Fardusi, C. Castaldi, P. Corona // Ecological Indicators. – 2019. – Vol. 104. – P. 576-587.

101. 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.

102. Hao, P. Feature selection of time series MODIS data for early crop classification using random forest: A case study in Kansas, USA / P. Hao, Y. Zhan, L. Wang, Z. Niu, M. Shakir // Remote Sensing. – 2015. – Vol. 7, №5. – P. 5347-5369.

103. Huttich, C. On the suitability of MODIS time series metrics to map vegetation types in dry savanna ecosystems: a case study in the Kalahari of NE Namibia / C. Huttich, U. Gessner, M. Herold, B. Strohbach, M. Schmidt, M. Keil, S. Dech // Remote Sensing. – 2009. – Vol. 1. – P. 620-643.

104. Hill, J. Land degradation and soil erosion mapping in a Mediterranean ecosystem / J. Hill, W. Mehl, M. Altherr // In Hill J., Mégier J. (eds) Imaging spectrometry – a tool for environmental observations. Eurocourses: Remote Sensing, Springer, Dordrecht. – 1994. – Vol. 4.

105. Hill, M.J. Vegetation index suites as indicators of vegetation state in grassland and savanna: An analysis with simulated Sentinel 2 data for a

North American transect / M.J. Hill // Remote sensing of environment. – 2013. – Vol. 137. – P. 94–111.

106. Horion, S. Studying interactions between climate variability and vegetation dynamic using a phenology based approach / S. Horion, Y. Cornet, M. Erpicum, B. Tychon // International journal of applied earth observation and geoinformation. – 2013. – № 20. – P. 20–32.

107. Hosiolo, A. Mapping forest type and tree species on a regional scale using multi-temporal sentinel-2 data / A. Hosiolo, A. Lewandowska // Remote Sensing. – 2019. – Vol. 11, № 8. – ID: 929.

108. Iyad, Al-K. NDVI Monitoring changes in vegetation cover in the areas of agricultural stability of Syria using plant culture 2012-2000 for the time series MODIS/ Al-K. Iyad, K. Warda // Syrian Journal of Agricultural Research. – 2016. – Vol. 3. – P. 188-205.

109. Immitzer, M. First Experience with Sentinel-2 data for crop and tree species classifications in Central Europe / M. Immitzer, F. Vuolo, C. Atzberger // Remote Sensing. – 2016. – Vol. 8, № 166. – P. 1-27.

110. IPCC. The effects of climate change on agriculture, land resources, water resources and biodiversity/ Washington, DC: Intergovernmental Panel on Climate Change. – 2007. – 243 p.

111. IPCC. International Panel on Climate Change. Special report: Global Warming of 1.5°C [Electronic resource]. – 2018. – URL: <http://www.ipcc.ch>

112. IPCC. International Panel on Climate Change. Climate change and Land [Electronic resource]. – 2019. – URL: <http://www.ipcc.ch/>

113. Jonsson, P. TIMESAT – a program for analyzing time-series of satellite sensor data/ P. Jönsson, L. Eklundh // Computers and Geosciences. – 2004. – Vol. 30. – P. 833- 845.

114. Jwan, A. Image Classification in Remote Sensing / A. Jwan, B.M. Shattri, H.Z. Mohd Shafri // Journal of Environment and Earth Science. – 2013. – Vol. 3, № 10. – P. 141-147.

115. Kamel, D. Vegetation Index User's Guide / D. Kamel, B.M. Armando, S. Ramon, H. Alfredo // (MOD13 Series). – 2015. – Version 3. – Collection 6. – P. 1-32.

116. 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.

117. 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.

118. 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.

119. Kim, D. Global, Landsat-based forest-cover change from 1990 to 2000 / D. Kim, J.O. Sexton, Pr. Noojipady, C. Huang, A. Anand, S. Channan, M. Feng, J.R. Townshend // *Remote Sensing of Environment*. – 2014. – № 155. – P. 178-193.

120. 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.

121. Koutsias, N. Classification analyses of vegetation for delineating forest fire fuel complexes in a Mediterranean test site using satellite remote sensing and GIS / N. Koutsias, M. Karteris // *International Journal of Remote Sensing*. – 2003. – Vol. 24, № 15. – P. 3093-3104.

122. Koutsias, N. Do Factors Causing Wildfires Vary in Space? Evidence from Geographically Weighted Regression / N. Koutsias, J. Martínez-Fernández, B. Allgöwer // *GIScience and Remote Sensing*. – 2010. – Vol. 47, № 2. – P. 221-240.

123. Kuemmerle, T. Separating grassland and shrub vegetation by multi-date pixel adaptive spectral mixture analysis / T. Kuemmerle, A. Röder, J. Hill // *International Journal of Remote Sensing*. – 2006. – Vol. 27. – P. 3251-3271.

124. Kuenzer, C. Remote sensing time series: Revealing land surface dynamics / C. Kuenzer, S. Dech, W. Wagner. – Springer. – 2015. – 441 p.

125. Kupkova, L. Classification of tundra vegetation in the Krkonose Mts. National Park using APEX, AISA Dual and Sentinel-2A data / L. Kupkova, L. Cervena, R. Sucha, J. Jakesova // *European Journal of Remote Sensing*. – 2017. – Vol. 50. – P. 29-46.

126. Kurbanov, E. Carbon sequestration after pine afforestation on marginal lands in the Povolgie region of Russia: A case study of the potential for a Joint Implementation activity / E. Kurbanov, O. Vorobiev, A. Gubayev, L. Moshkina, S. Leznin // *Scandinavian Journal of Forest Research*. – 2007. – № 22. – P. 488-499.

127. Lara, B. Assessing the performance of smoothing functions to estimate land surface phenology on temperate grassland / B. Lara, M. Gandini // *International Journal of Remote Sensing*. – 2016. – Vol. 37, № 8. – P. 1801-1813.

128. Laurin, G.V. Discrimination of tropical forest types, dominant species, and mapping of functional guilds by hyperspectral and simulated multispectral Sentinel-2 data / G.V. Laurin, N. Puletti, W. Hawthorne, V. Liesenberg, P. Corona, D. Papale, et al. // *Remote Sensing of Environment*. – 2016. – Vol. 176. – P. 163-176.

129. Leinenkugel, P. Characterisation of land surface phenology and land cover based on moderate resolution satellite data in cloud prone areas: a novel product for the Mekong basin / P. Leinenkugel, C. Kuenzer, N. Opel, S. Dech // *Remote Sensing of Environment*. – 2013. – № 136. – P. 180–198.

130. Liang, L. Validating satellite phenology through intensive ground observation and landscape scaling in a mixed seasonal forest / L. Liang, M.D. Schwartz, S. Fei // *Remote Sensing of Environment*. – 2011. – Vol. 115. – P. 143–157

131. 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. – 2017, Springer International Publishing. – P. 173-192.

132. Lopatin, E. Russian Federation forest resources assessment based on free medium resolution remote sensing data / E. Lopatin, A. Alexeyev // *International forestry review*. – 2014. – Vol. 16, № 5. – P. 206-207.

133. Lu, D. The roles of textural images in improving land-cover classification in the Brazilian Amazon / D. Lu, G. Li, E. Moran, L. Dutra, M. Batistella // *International Journal of Remote Sensing*. – 2014. – Vol. 35. – P. 8188–8207.

134. Madsen, H. Time series analysis /H. Madsen. - 1st Edition Chapman and Hall/CRC. – 2007. – 392 p.
135. Moleele, N. Assessment of vegetation indexes useful for browse (forage) prediction in semi-arid rangelands / N. Moleele, S. Ringrose, W. Arnberg, B. Lunden, C. Vanderpost // International Journal of Remote Sensing. – 2001. – Vol. 22. – P. 741–756.
136. Mercier, A. Evaluation of Sentinel-1 and 2 time series for land cover classification of forest-agriculture mosaics in temperate and tropical landscapes / A. Mercier, J. Betbeder, F. Rumiano, J. Baudry, V. Gond, L. Blanc // Remote Sensing. – 2019. – Vol. 11, № 8.– ID: 979.
137. Meroni, M. Near real-time vegetation anomaly detection with MODIS NDVI: Timeliness vs. accuracy and effect of anomaly computation options / M. Meronia, D. Fasbendera, F. Rembolda, C. Atzbergerb, A. Klischb // Remote Sensing of Environment. – 2019. – Vol. 221. – P. 508–521.
138. Mertes, C.M. Detecting change in urban areas at continental scales with MODIS data / C.M. Mertes, A. Schneider, D. Sulla-Menashe, A.J. Tatem, B. Tan // Remote Sensing of Environment. – 2015. – Vol. 158. – P. 331-347.
139. 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.
140. Ng, W.T. Assessing the Potential of Sentinel-2 and Pléiades Data for the Detection of Prosopis and Vachellia spp. in Kenya / W.T. Ng, P. Rima, K. Einzmann, M. Immitzer, C. Atzberger, S. Eckert // Remote Sensing. – 2017. – Vol. 9, № 74. – P. 1-29.
141. Noi, P.T. Comparison of Random Forest, k-Nearest Neighbor, and Support Vector Machine Classifiers for Land Cover Classification Using Sentinel-2 Imagery/ P.T. Noi, M. Kappas // Sensors. – 2017. – Vol. 18, № 1. – P. 1-20.
142. Ogris, N. Sanitary felling of Norway spruce due to spruce bark beetles in Slovenia: A model and projections for various climate change scenarios / N. Ogris, M. Jurc // Ecological Modelling. – 2010. – Vol. 221, № 2. – P. 290-302.

143. Olsen, K.H. The clean development mechanism's contribution to sustainable development: a review of the literature / K.H. Olsen // *Climatic Change*. – 2007. – Vol. 84. – P. 59-73.

144. Olsson, P.O. Near real-time monitoring of insect induced defoliation in subalpine birch forests with MODIS derived NDVI / P.O. Olsson, J. Lindström, L. Eklundh // *Remote sensing of environment*. – 2016. – Vol. 181. – P. 42-53.

145. 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.

146. 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. Inglada, N. Champion, G. Dedieu // *Remote sensing of environment*. – 2016. – Vol. 187. – P. 156-168.

147. Piao, S. Variations in satellite-derived phenology in China's temperate vegetation / S. Piao, J. Fang, L. Zhou, P. Ciais, B. Zhu // *Global Change Biology*. – 2006. – Vol. 12, № 4. – P. 672-685.

148. Pignatti, S. Evaluating Hyperion capability for land cover mapping in a fragmented ecosystem: Pollino National Park, Italy/ S. Pignatti, R.M. Cavalli, V. Cuomo, L. Fusilli, S. Pascucci, M. Poscolieri, F. Santini // *Remote Sensing of Environment*. – 2009. – Vol 113, № 3. – P. 622-634.

149. Pouteau, R. Predicting Tropical Tree Species Richness from Normalized Difference Vegetation Index Time Series: The Devil Is Perhaps Not in the Detail / R. Pouteau, T.W. Gillespie, P. Birnbaum // *Remote Sensing*. – 2018. – Vol. 10 (5). – P. 1-15.

150. Puletti, N. Use of Sentinel-2 for forest classification in Mediterranean environments / N. Puletti, F. Chianucci, C. Castaldi // *Annals of silvicultural research*. – 2017.

151. Räsänen, A. Usability of one-class classification in mapping and detecting changes in bare peat surfaces in the tundra / A. Räsänen, V. Elsakov, T. Virtanen // *International Journal of Remote Sensing*. – 2019. – Vol. 40, № 11. – P. 4083-4103.

152. 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.

153. Rujoiu-Mare, M.R. Land cover classification in Romanian Carpathians and Subcarpathians using multi-date Sentinel-2 remote sensing imagery / M.R. Rujoiu-Mare, B. Olariu, B.A. Mihai, C. Nistor, I. Savulescu // *European Journal of Remote Sensing*. – 2017. – Vol. 50. – P. 496-508.

154. Savitzky, A. Smoothing and differentiation of data by simplified least squares procedures / A. Savitzky, M. J. E. Golay // *Analytical Chemistry*. – 1964. – № 36. – P. 1627-1639.

155. Seetharaman, K. Texture characterization, representation, description, and classification based on full range Gaussian Markov random field model with Bayesian approach / K. Seetharaman, N. Palanivel // *International Journal of Image and Data Fusion*. – 2013. – Vol. 4. – P. 342-362.

156. Sidor, C.G. Forest vulnerability to extreme climatic events in Romanian Scots pine forests / C.G. Sidor, J.J. Camarero, I. Popa, O. Badea, E.N. Apostol, R. Vlad // *Science of the total environment*. – 2019. – Vol. 678. – P. 721-727

157. Scheller, R.M. Simulated effects of climate change, fragmentation, and inter-specific competition on tree species migration in northern Wisconsin, USA / R.M. Scheller, D.J. Mladenoff // *Climate Research*. – 2008. – Vol. 36, № 3. – P. 191-202.

158. Scharnweber, T. Drought matters – Declining precipitation influences growth of *Fagus sylvatica* L. and *Quercus robur* L. in north-eastern Germany / T. Scharnweber, M. Manthey, C. Criegee, A. Bauwe, C. Schröder, M. Wilmking // *Forest Ecology and Management*. – 2011. – Vol. 262, № 6. – P. 947-961

159. Sheeren, D. Tree species classification in temperate forests using Formosat-2 satellite image time series / D. Sheeren, M. Fauvel, V. Josipovic, M. Lopes, C. Planque, J. Willm, J.F. Dejoux // *Remote Sensing*. – 2016. – Vol. 8, № 734. – P. 1-29.

160. Shwan, O.H. Spatiotemporal assessment of vegetation indices and land cover for Erbil city and its surrounding using Modis imageries/ O.H. Shwan, K. Ferenc, T. Zalán // *Journal of Environmental Geography*. – 2017. – Vol. 10. – P. 31-39.

161. Solberg, S. Mapping gap fraction, LAI and defoliation using various ALS penetration variables / S. Solberg // *International Journal of Remote Sensing*. – 2010. – Vol. 31, №5. – P. 1227-1244.

162. Sun, D. Note on the NDVI–LST relationship and the use of temperature related drought indices over North America / D. Sun, M. Kafatos // *Geophysical Research Letters*. – 2007. – Vol. 34, №24. – P. 24406 (1-4).

163. Tang, X. Overview of the key technologies for high-resolution satellite mapping / X. Tang, J. Xie // *International Journal of Digital Earth*. – 2012. – Vol. 5, № 3. – P. 228-240.

164. The Montreal Process Criteria and Indicators for the Conservation and Sustainable Management of Temperate and Boreal Forests. Fifth Edition. – P. 30. – URL: <http://www.montrealprocess.org>

165. Thiago, S.T. Relationships between MODIS phenological metrics, topographic shade, and anomalous temperature patterns in seasonal deciduous forests of south Brazil / S.T. Thiago, L.S. Galvão, F.M. Breunig, R. Balbinot, W. Gaida // *International Journal of Remote Sensing*. – 2015. – Vol. 36, № 18. – P. 4501-4518.

166. Transforming our world: The 2030 Agenda for Sustainable development. United Nations.—2015. URL: <https://sustainabledevelopment.un.org/content/documents/21252030%20Agenda%20for%20Sustainable%20Development%20web.pdf>

167. Tchebakova, N.M. The effects of climate, permafrost and fire on vegetation change in Siberia in a changing climate / N.M. Tchebakova, E.I. Parfenova, A.J. Soja // *Environmental Research Letters*. – 2009. – Vol. 4. – P. 1-9.

168. Vayreda, J. Recent climate changes interact with stand structure and management to determine changes in tree carbon stocks in Spanish forests / J. Vayreda, J. Martinez-Vilalta, M. Gracia, J. Retana // *Global Change Biology*. – 2012. – Vol. 18, №3. – P. 1028-1041.

169. Verkerk, P.J. Spatial distribution of the potential forest biomass availability in Europe / P.J. Verkerk, J.B. Fitzgerald, P. Datta, M. Dees, G.M. Hengeveld, M. Lindner, S. Zudin // *Forest Ecosystems*. – 2019. – Vol. 6, № 1. – ID: 5.

170. Verrelst, J. Machine learning regression algorithms for biophysical parameter retrieval: Opportunities for Sentinel-2 and-3 / J. Verrelst,

J. Munoz, L. Alonso, J. Delegido, J.P. Rivera, G. Camps-Valls, J. Moreno // *Remote Sensing of Environment*. – 2012. – Vol. 118. – P. 127-139.

171. Viccaro, M. Spatial modelling approach to evaluate the economic impacts of climate change on forests at a local scale / M. Viccaro, M. Cozzi, L. Fanelli, S. Romano // *Ecological Indicators*. – 2019. – Vol. 106. – ID: 105523.

172. Wang, C. Assessing phenological change and climatic control of Alpine grasslands in the Tibetan Plateau with MODIS time series / C. Wang, H. Guo, L. Zhang, S. Liu, Y. Qiu, Z. Sun // *International Journal of Biometeorology*. – 2015. – № 59. – P. 11-23.

173. Wang, Q. Fusion of Landsat 8 Oli and Sentinel-2 MSI data / Q. Wang, G.A Blackburn, A.O. Onojeghuo // *IEEE Trans Geosci // Remote Sensing*. – 2017.

174. Wang, Q. Spatio-temporal fusion for daily Sentinel-2 images / Q. Wang, P.M. Atkinson // *Remote Sensing of Environment*. – 2018. – Vol. 204. – P. 31- 42.

175. Wittke, S. Comparison of two-dimensional multitemporal Sentinel-2 data with three-dimensional remote sensing data sources for forest inventory parameter estimation over a boreal forest / S. Wittke, X. Yu, M. Karjalainen, J. Hyypä, E. Puttonen // *International journal of applied Earth observation and Geoinformation*. – 2019. – Vol. 76. – P. 167-178.

176. WMO (World Meteorological Organization). WMO statement on the state of the Global Climate in 2018. – Geneva, 2019. – 39 p.

177. Yuan, F. Spatial patterns of land surface phenology relative to monthly climate variations: US Great Plains / F. Yuan, C. Wang, M. Mitchell // *GIScience & Remote Sensing*. – 2014. – Vol. 51, №. 1. – P. 30-50.

178. Yousefpour, R. Forestry professionals' perceptions of climate change, impacts and adaptation strategies for forests in south-west Germany / R. Yousefpour, M. Hanewinkel // *Climatic Change*. – 2015. – Vol. 130. – P. 273–286.

179. Zarco-Tejada, P.J. Chlorophyll content estimation in an open-canopy conifer forest with Sentinel-2A and hyperspectral imagery in the context of forest decline / P.J. Zarco-Tejada, A. Hornero, P.S.A. Beck,

T. Kattenborn, P. Kempeneers, R. Hernández-Clemente // Remote sensing of environment. – 2019. – Vol. 223. – P. 320-335.

180. Zheng, H. Performance evaluation of downscaling Sentinel-2 imagery for Land Use and Land Cover classification by Spectral-Spatial features / H. Zheng, P. Du, J. Chen, J. Xia, E. Li, Z. Xu, et al. // Remote Sensing. – 2017. – Vol. 9, № 1274. – P. 1-17.

181. Zhou, L. Relation between interannual variations in satellite measures of northern forest greenness and climate between 1982 and 1999 / L. Zhou, R. K. Kaufmann, Y. Tian, R. B. Myneni, C. J. Tucker // Journal of geophysical research. – 2003. – Vol. 108, № D1, 4004.

Научное издание

Воробьев Олег Николаевич
Курбанов Эльдар Аликрамович
Демишева Екатерина Николаевна
Меньшиков Сергей Андреевич
Али Махер Саид
Смирнова Любовь Николаевна
Тарасова Людмила Владимировна

**ДИСТАНЦИОННЫЙ МОНИТОРИНГ
УСТОЙЧИВОСТИ ЛЕСНЫХ ЭКОСИСТЕМ**

Монография

Под общей редакцией проф. Э.А. Курбанова

Редактор *Л.С. Емельянова*
Компьютерная верстка и дизайн обложки *С.А. Лежнин*

Подписано в печать 31.06.19. Формат 60х84
Печать цифровая. Усл. печ. л. 9,65.
Тираж 200 экз. Заказ № 5229

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

Scientific publication

Vorobiev Oleg Nikolayevich
Kurbanov Eldar Alikramovich
Demisheva Ekaterina Nikolaevna
Menshikov Sergey Andreevich
Ali Maher Said
Smirnova Lyubov Nikolayevna
Tarasova Lyudmila Vladimirovna

**REMOTE MONITORING OF FOREST
ECOSYSTEMS SUSTAINABILITY**

Monograph

Edited by Professor E.A. Kurbanov

Editor *L.S. Yemelyanova*
Computer layout and cover design *S.A. Lezhnin*

Signed to print 31.06.19. Format 60x84
Digital printing. Printed sheets 9,65.
Edition 200 copies. Order № 5229

Volga State University of Technology
424000 Yoshkar-Ola, pl. Lenina, 3

Printed from the original layout in Ltd “Vertola» Republic Mari El
Yoshkar-Ola, ul. Lva Tolstogo, 45

ISBN 978-5-8158-2122-4



9 785815 821224 >